



Ministerium
für Infrastruktur
und Landwirtschaft



Anlage zum Verwendungsnachweis - 3. Gemeinsamer Sachbericht **Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft (LFE)**

Vorhabensbezeichnung:

„Konzeption für die Nachnutzung einer Biogasanlage als Kombinationsanlage für Wollwäsche und Pflanzenfaseraufschluss zum Aufbau einer Wertschöpfungskette nachhaltige Textilien aus regionaler Erzeugung und Verarbeitung“

Projekt-Nr.: **2023 LFE 0002**

Name der Kooperation: **biogas4textile**

Laufzeit: **01.08.2023 - 30.04.2025**

Gefördert nach der Förderrichtlinie „LFE - Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft in Thüringen“ durch das Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (TMIL) und den Europäischen Landwirtschaftsfonds zur Entwicklung des ländlichen Raumes (ELER).

Zusammensetzung der Kooperation:

Lead-Partner	Baur Nonwoven GmbH 07950 Zeulenroda-Triebes, Adolph-Herbst-Str. 13	Thüringen
Kooperationspartner	Ökotrend Projekt- und Marketing GmbH 99091 Erfurt, Mühlweg 16	Thüringen
	Agrarproduktion Großromstedt GmbH & Co. KG 99518 Bad Sulza, In Großromstedt 1A	Thüringen
	LAWO Agrar GmbH (LAWO) 07937 Zeulenroda-Triebes, Hainweg 11	Thüringen
	Pahren Agrar Verwaltungs- u. Vermarktungs GmbH 07937 Zeulenroda-Triebes, Hainweg 11	Thüringen
	VOFA Vogtlandfaser GmbH&Co.KG (VOFA) 07937 Zeulenroda-Triebes, Hainweg 11	Thüringen
	Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft & Energie (IBKE) 99423 Weimar, Steubenstraße 23	Thüringen
	Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) 09125 Chemnitz, Annaberger Str. 240	Sachsen
	FARMHUS materials GmbH (FHm) 04722 Roßwein, OT Littdorf, An der Schnauder 22	Sachsen
	Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK) 07407 Rudolstadt, Breitscheidstraße 97	Thüringen
Assoziierte Partner	Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) 07743 Jena, Naumburger Straße 98	Thüringen
	Deutscher Naturfaserverband e.V. (DNV) 07937 Zeulenroda-Triebes, Hainweg 11	Thüringen
	Landesverband Thüringer Schafzüchter e.V. 99087 Erfurt, Stotternheimer Straße 19	Thüringen

Inhaltsverzeichnis

1 Erfüllungsstand der Arbeitspakete des Vorhabens	5
2 Biogasanlagen in Kombination mit Wollwäsche und Bastfaseraufschluss	6
2.1 Aufgabenstellung / Zielsetzung des Vorhabens	6
2.2 Aktueller gesetzlicher Rahmen zur Nutzung von Energie aus Biogasanlagen	7
2.3 Analyse in Thüringen verfügbarer Biogasanlagen für die Zwecke des Projektes	9
3 Betrieb einer Anlage zur Wollwäsche mit Anbindung an eine Biogasanlage	10
3.1 Technisch-rechtliche Möglichkeiten des Einsatzes von Abwässern der Wollwäsche ..	10
3.2 Einschätzung der Folgen auf die Vergütung der Biogasanlage	10
3.3 Folgenabschätzung hinsichtlich der Nutzung der Gärreste als Düngemittel	11
3.4 Einschätzung des TLVwA hinsichtlich des Genehmigungsprozesses	11
4 Untersuchungen einer Wollwaschanlage mit Anbindung an eine Biogasanlage	12
4.1 Beschreibung der untersuchten Beispiel-Anlage	12
4.2 Beschreibung des Prozesses der Wollwäsche an der Referenzanlage	14
4.3 Energiebedarf der Wollwäsche	16
4.3.1 Bedarf an Prozesswärme	16
4.3.2 Strombedarf der Wollwäsche	18
4.4 Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen	18
4.5 Ergebnisse der Laboruntersuchungen	20
4.6 Schlussfolgerungen bezogen auf die Wollwäsche	24
5 Untersuchungen an einer Anlage zum Bastfaser-Nassaufschluss für Industriehanf mit Anbindung an eine Biogasanlage	25
5.1 Grundlagen	25
5.2 Verwertung von Stängelspitzenmaterial	27
5.2.1 Gewinnung/Ernte	27
5.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen zu Stängelspitzenmaterial	28
5.3 Verwertung von Abwässern aus der enzymatischen Degummierung von Industriehanf 31	
5.3.1 Ausgangssituation / Aufgabenstellung	31
5.3.2 Charakterisierung des Prozesses der enzymatischen Wasserröste	32
5.3.3 Laboruntersuchung von Reaktorwasser aus der Degummierung von Hanfbast	33
5.3.4 Behandlung der Abwässer aus einer enzymatischen Degummierung von Hanf	35
5.4 Untersuchungen zur Anbindung an eine Biogasanlage	38
5.4.1 Ermittlung kapazitiver Grundlagen	38
5.4.2 Ermittlung des Wasserbedarfes für eine enzymatische Degummierung	39
5.4.3 Ermittlung des Bedarfes an Prozesswärme für eine enzymatische Degummierung ..	40
5.5 Schlussfolgerungen bezogen auf die enzymatische Degummierung	40
6 Untersuchungen zu Anforderungen an die Bereitstellung textil verarbeitbarer Naturfasern aus regionalem Aufkommen in Thüringen	42
6.1 Grundlagen: Warum Wolle und Bastfaseraufschluss gerade in Thüringen?	42
6.2 Anforderungen an die Bereitstellung von Wolle aus regionalem Aufkommen	42
6.2.1 Anforderungen an die Wollwäsche	42
6.2.2 Energetische Betrachtung	43
6.2.3 Konzeption für eine Moderne Wollwäsche	43
6.2.4 Stoffmengen/Materialströme	46
6.2.5 Wärmeerzeugung	46
6.2.6 Wärmespeicher	46
6.2.7 Abschließende Betrachtung zum Thema nachhaltige Wollwäsche	47
6.3 Anforderungen an die Bereitstellung von Bastfasern für eine textile Verwendung	47
6.3.1 Anbau und Ernte von Industriehanf	47
6.3.2 Bestimmung des Fasergehalts	49

6.4	Textiler Aufschluss von Hanffasern	50
6.4.1	Gewinnung Hanffasern aus feldgeröstetem Hanfstroh für technische Fasern	50
6.4.2	Gewinnung von Hanffasern aus nicht feldgeröstetem Hanfstroh	51
6.4.3	Feinaufschluss mittels Nassaufschlussverfahren	54
6.4.4	Ergebnisse der Aufschlussversuche	55
6.4.5	Versuche zur textilen Verarbeitbarkeit mit ausgewählten Faservarianten	59
6.5	Verfahrenskonzept einer Pilotanlage zum Hanffaseraufschluss	61
6.6	Schlussfolgerungen für den regionalen Aufschluss textil verspinnbarer Hanffasern ...	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Anlagenaufstellung Rohwaschanlage Fabr. Fleissner, Bj. 1999.....	13
Abbildung 2	Waschprinzip einer Siebtrommelwaschanlage.....	13
Abbildung 3	Angelieferte Rohwolle.....	14
Abbildung 4	Voröffnung der Rohwolle	15
Abbildung 5	Zuführung der geöffneten Rohwolle in die Waschanlage	15
Abbildung 6	Etablierte Verfahrensstufen zur Gewinnung textiler Bastfasern	26
Abbildung 7	Erntesituation Stängelspitzen und Hanfstroh/Hanfbast	27
Abbildung 8	Stängelspitzenmaterial nach der Ernte	28
Abbildung 9	Kleintechnische Versuchsanlage "Bioreaktor".....	33
Abbildung 10	Konzept einer Wollwaschanlage mit nachhaltiger Energieerzeugung	44
Abbildung 11	Energiekonzept Faser Trocknung.....	45
Abbildung 12	Aufbau Wärmespeicher	47
Abbildung 13	Installation Wärmespeicher	47
Abbildung 14	Testmaterial Anlieferungszustand bzw. nach der Trocknung.....	49
Abbildung 15	Bearbeitung der Fasermuster beim TITK	49
Abbildung 16	Walzenreinigungsmaschine und gereinigte, eingekürzte Hanffasern.....	49
Abbildung 17	Aufschlussanlage und aufgeschlossene, feldgeröstete Hanffasern	51
Abbildung 18	Spezialerntemaschine für Feldentholz von frisch-grünem Hanf.....	52
Abbildung 19	Hanffasern feldentholt, von links: Bestand, entholt, getrocknet, eingelagert....	52
Abbildung 20	Prototypanlage Rollenaufschluss, Finalprodukt flächiges aufgewickeltes Faserband.....	53
Abbildung 21	Maschinenkonfiguration Faseraufschluss TEMAFA.....	53
Abbildung 22	Faserfeinheit der getesteten Proben	58
Abbildung 23	Endengeordnete Faserbärte (Probenvorbereitung für die Faserlängenmessung am Almeter)	58
Abbildung 24	Faserlänge der getesteten Proben	59
Abbildung 25	Faserfestigkeit der getesteten Proben.....	59
Abbildung 26	Faserprobe B9930 / OE-Garn 70/30 CLY/HA B9930 48 tex [Nm 21] / Kleinrundstricktest E26	60
Abbildung 27	Verfahrenskonzept Hanffaseraufschluss	61

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1:</i>	<i>Ausgewählte Biogasanlagen</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 2</i>	<i>Übersicht Abwasserproben Wollwaschanlage</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 3</i>	<i>Ergebnisse der Laboruntersuchung 1 Abwasser Wollwäsche</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 4</i>	<i>Ergebnisse der Laboruntersuchung 2 Abwasser Wollwäsche</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 5</i>	<i>Ergebnisse der Laboruntersuchung 3 Abwasser Wollwäsche</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 6</i>	<i>Ergebnisse der Laboruntersuchung zu Gasbildungspotenzialen</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 7</i>	<i>Ergebnisse der Laboruntersuchung von Hanfstängelspitzen.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 8</i>	<i>Gaserträge von gängigen Substraten für Biogasanlagen</i>	<i>300</i>
<i>Tabelle 9</i>	<i>Ergebnisse Laboruntersuchung Abwasser der biologisch-enzymatischen Degummierung</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 10</i>	<i>Fasergehalt ausgewählter Hanfsorten nach Grob- bzw. Feinaufschluss ..</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 11</i>	<i>Ausgewählte Technologievarianten der Versuche</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 12</i>	<i>Textilphysikalische Faserparameter nach dem Aufschluss</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 13</i>	<i>Kardierung ausgewählter Faservarianten (Walzenkarde STFI)</i>	<i>60</i>

1 Erfüllungsstand der Arbeitspakete des Vorhabens

AP1: Projekttreffen, Projektcontrolling, Projektabrechnung, Berichtswesen

Folgende Projekttreffen wurden unter Teilnahme der Projektpartner durchgeführt:

Datum	Art des Projekttreffens	Ort der Durchführung
20.11.2023	Auftakttreffen mit Beratungen zum Arbeitsprogramm	VOFA Pahren GmbH & Co.KG 07937 Zeulenroda-Triebes – OT Läwitz
22.04.2024	Projekttreffen	VOFA Pahren GmbH & Co.KG 07937 Zeulenroda-Triebes – OT Läwitz
14.08.2024	Projekttreffen	Ökotrend Projekt- und Marketing GmbH 99091 Erfurt
09.04.2025	Projekttreffen Projektabschluss mit Beratungen zum Bericht	VOFA Pahren GmbH & Co.KG 07937 Zeulenroda-Triebes – OT Läwitz

Darüber hinaus wurden regelmäßig arbeitsplanbezogene Projektberatungen zwischen den Kooperationspartnern in unterschiedlichen Zusammensetzungen durchgeführt.

Das Projektcontrolling wurde regelmäßig und zeitnah ausgeübt, Projektabrechnungen wurden quartalsweise erstellt und gegenüber der Thüringer Aufbaubank (TAB) abgerechnet.

Bei der Durchführung des Projektes stellte sich heraus, dass durch Verschiebungen von Schwerpunkten zwischen den einzelnen Arbeitspaketen und den Projektteilnehmern eine Reihe wichtiger und auch zusätzlicher Teilaufgaben bearbeitet werden mussten. Im Rahmen der Projektkoordinierung ist es gelungen, diese Aufgaben bei Einhaltung der geplanten Aufwendungen für das Projekt in die Bearbeitung aufzunehmen. Dazu wurde ein Antrag zur kostenneutralen Verlängerung des Projektes über den ursprünglichen Endtermin 31.01.2025 hinaus bis zum 30.04.2025 bei Einhaltung der genehmigten Projektmittel gestellt und durch die TAB jeweils genehmigt.

AP 2: Evaluierung Biogasanlagen-Bestand in Thüringen und von Kriterien der Eignung für das Projekt

Der Bestand an Biogasanlagen in Thüringen wurde mit Beachtung der Besonderheiten der einzelnen Anlagen listenmäßig erfasst.

Nach einer Probennahme an einer realen Wollwäsche und der Bereitstellung von Abwasserproben aus einer Anlage zur enzymatischen Degummierung von Hanf wurden Analysen dieser Proben im Labor durchgeführt, um eine Datenbasis für den Austausch mit Betreibern von Biogasanlagen und Genehmigungsbehörden zu schaffen. Das Vorhaben wurde an das Thüringer Landesverwaltungsamt herangetragen, um eine Voreinschätzung der genehmigungsrechtlichen Gesamtsituation und Machbarkeit einzuholen.

Im Ergebnis der Evaluierung ist das Einbringen von Abwässern aus dem Hanfaufschluss und der Wollwäsche in Biogasanlagen prinzipiell möglich und sinnvoll.

Das Thüringer Landesverwaltungsamt hat darauf hingewiesen, dass nach Gesprächen mit potenziell geeigneten Biogasanlagenbetreibern vor allem die Kontaktaufnahme mit der jeweiligen verantwortlichen lokalen Genehmigungsbehörde unumgänglich ist.

Das AP konnte vollständig erfüllt werden.

AP 3: Analyse und Bewertung des Standes Wissenschaft und Technik hinsichtlich industrietauglicher Lösungen sowie des erforderlichen FuE-Bedarfs für die Errichtung von Prozesslinien zum Aufschluss von Bastfaserpflanzen zur Gewinnung fein-textiler Fasern

Im Rahmen der Projektdurchführung wurden die definierten Teilaufgaben aus dem Arbeitspaket 3 gemäß Anhang zur Projektskizze Anlage 1/Tabelle 1 mit folgenden Entwicklungsschwerpunkten bearbeitet:

- Analyse von Grundlagen für ein verfahrenstechnologisches Gesamtkonzept praxistauglicher Prozessstufen zur Gewinnung von textil nutzbaren Hanffasern
- Auswahl und Beschaffung geeigneter Rohmaterialien unter den konkreten Anwendungsbedingungen der Projektpartner
- Durchführung von Aufschlussversuchen zur Prüfung der Eignung von Verfahrensstufen bis hin zur Demonstration der aufgeschlossenen Fasern in einer typischen Einsatzumgebung (TRL 6)
- Ableitung funktioneller und konstruktiver Zielparameter für erforderliche Prozessmodule

Die Zielstellungen des Arbeitspaketes wurden erfüllt. Im Zuge der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass weitergehende Untersuchungen zur Gewinnung fein-textiler Faserqualitäten notwendig sind. Soweit im Rahmen des Projektes möglich, wurden diese Zusatzaufgaben bearbeitet.

AP 4: Diskussion Kriterien für Wollwäsche, Wasch-/Abwasserversuche und Wasser-recycling

Die Zielstellungen des Arbeitspaketes wurden vollständig erreicht.

AP 5: Auswahl Biogasanlage(n) für die Errichtung einer Kombianlage incl. Einbeziehung Industrie-Altstandorte

Die Zielstellungen des Arbeitspaketes wurden vollständig erreicht.

Zu den Detailergebnissen siehe die jeweiligen Ausführungen in den entsprechenden Gliederungspunkten des Berichtes.

2 Biogasanlagen in Kombination mit Wollwäsche und Bastfaseraufschluss

2.1 Aufgabenstellung / Zielsetzung des Vorhabens

Aufgrund der Tatsache, dass Anlagen zur Wollwäsche ebenso wie Anlagen zum Hanffasernassaufschluss Energie in Form von Strom und/oder Wärme benötigen und bei diesen Prozessen außerdem organisch belastetes Abwasser anfällt ist es naheliegend, beide Technologien in Verbindung mit Biogasanlagen zu sehen.

Biogasanlagen, die meist Strom für die Stromnetzeinspeisung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erzeugen, weisen oft hohe Wärmeüberschüsse auf und sind technisch grundsätzlich in der Lage, Reststoffe mit organischen Komponenten, die anaerob biologisch abbaubar sind, so zu verarbeiten, dass Gärreste als organische nährstoffhaltige Düngemittel entstehen. Eine Kreislaufführung von Nährstoffen kann sichergestellt werden. Aus diesen Gründen sollen die Möglichkeiten der Verknüpfung der Technologien untersucht und im Folgenden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst werden.

Gemäß der Aufgabenstellung vom 31.03.2023 für ein Kooperationsvorhaben zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktivität und Nachhaltigkeit (EIP-AGRI) soll durch die Tätigkeit einer operationellen Gruppe eine Konzeption für die Nachnutzung einer Biogasanlage als eine Kombinationsanlage für Wollwäsche und zum Pflanzenfaseraufschluss für Bastfaserpflanzen erarbeitet werden. Das Projekt bildet die Grundlage für den zukünftigen Aufbau einer regionalen

Wertschöpfungskette für nachhaltige Textilien aus regionalen Rohstoffen (Pflanzenfasern und Schafwolle) und schafft die Voraussetzungen für eine auf die Erhöhung der erzeugernahen Wertschöpfung gerichtete Verarbeitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse.

Die Zielsetzung des Vorhabens besteht aufgabengemäß u.a. in

- Schaffung von Lösungen für die Probleme:
 - Waschen von einheimischer Schafwolle
 - Konditionierung und Aufschluss von einheimischen Faserpflanzen (v.a. Hanf und Flachs) zu hochwertigen textilen Faserrohstoffen
- Erarbeitung von Lösungsvorschlägen für die Schwerpunktthemen
 - Bereitstellung von Energie und Wärme für Wollwäsche und Bastfaseraufschluss
 - Behandlung von (tw. geruchsintensiven) Abwässern aus den beiden Prozessen durch den Einsatz einer Biogasanlage
- Evaluierung des Biogasanlagenbestandes in Thüringen hinsichtlich der problemorientierten Auswahl geeigneter Anlagen
- Erhöhung der Wertschöpfung von Biogasanlagen über Energieproduktion hinaus
- Konzeption für eine moderne Wollwäsche
- Konzeption für eine moderne Anlage zum Pflanzenfaseraufschluss
- Konzeption Abwasserbehandlung – Abwasserrecycling/Filter

Sowohl beim Faseraufschluss als auch bei der Wollwäsche sind dabei die aktuellen Erkenntnisse aus Wissenschaft, Forschung und Praxis miteinander zu kombinieren und an die Bedingungen des Betriebs einer Biogasanlage unter Thüringer Bedingungen anzupassen.

2.2 Aktueller gesetzlicher Rahmen zur Nutzung von Energie aus Biogasanlagen

Für die Energieversorgung von Anlagen zur Wollwäsche bzw. zum Bastfasernassaufschluss mit Wärme aus einer Biogasanlage gibt es bis 2031 die Möglichkeit der Nutzung des KWK-Bonus für Biogasanlagen, die nach dem EEG 2004 oder EEG 2009 vergütet werden. Der KWK-Bonus (Kraft-Wärme-Kopplung) bewirkt eine Erhöhung der EEG-Vergütung für jede nach der Positivliste des EEG genutzte thermische Kilowattstunde. Er führt zu einer teilweisen „Bezahlung“ der Anlagenbetreiber für die Abwärmenutzung durch einen Dritten, so dass in der Regel von diesem ein Preis für die Wärmenutzung unterhalb des Marktpreisniveaus zu zahlen wäre. Ab einer Inbetriebnahme einer Biogasanlage nach dem EEG 2012 entfällt der KWK-Bonus für genutzte Abwärme und es wird als Erfüllungsoption für einen Erhalt der EEG-Vergütung eine mindestens 60 %ige Erzeugung des Stromes in Kraft-Wärme-Kopplung, der Einsatz von mindestens 60 Masseprozent Gülle oder die Direktvermarktung des Stromes (nicht der Wärme) vorausgesetzt.

Da alle Anlagen im EEG 2012 von Anfang an eine der drei Optionen wählen mussten, ist nicht zu erwarten, dass die Anforderung, 60 % KWK-Stromanteil zu erreichen, dazu führt, dass ein Anlagenbetreiber seine Wärme besonders günstig anbietet. Ab dem EEG 2014 gibt es keine Boni für die Wärmenutzung und auch keine Verpflichtung, einen bestimmten Anteil der Wärme zu nutzen. Allerdings sind die EEG-Vergütungen ab dem EEG 2014 so eingerichtet, dass bei einer Zusammensetzung der Inputstoffe mit einem nennenswerten Anteil nachwachsender Rohstoffe in der Regel die ausschließliche Vermarktung des Stromes im EEG nicht auskömmlich ist, um die Biogasanlage wirtschaftlich zu betreiben. Damit ist es für alle Biogasanlagen verpflichtend, die eine EEG-Vergütung ab EEG 2012 in Anspruch nehmen, ausgekoppelte Wärme zu Marktkonditionen zu verkaufen. Auch für Anlagen, die nach dem EEG 2004 und EEG 2009 vergütet werden, ist davon auszugehen, dass nach Auslaufen von deren EEG-Vergütung 20 Jahre nach Inbetriebnahme ein Weiterbetrieb der Anlage in Kraft-Wärme-Kopplung die Bezahlung der Abwärme erfordert.

Für die Auswahl einer Biogasanlage zur Aufstellung einer Wollwäsche in Thüringen ist es demnach von Vorteil, eine Anlage zu finden, welche im EEG 2009 in Betrieb gegangen ist und damit noch eine

ausreichend lange EEG-Laufzeit hat, um die Entwicklung des Projektes einer Wollwäsche-Anlage respektive Aufschlussanlage für Bastfasern an der Biogasanlage vorzunehmen und ggf. in den ersten Jahren nach deren Inbetriebnahme von einem verringerten Wärmepreis durch den KWK-Bonus zu profitieren.

Ansonsten ist jede Biogasanlage mit EEG-Vergütung über das Jahr 2031 hinaus geeignet, sofern nicht anderweitig genutzte Abwärme aus den BHKWs weggekühlt und damit vernichtet wird. Gleichzeitig sollte eine relevante Menge (>1 GWh) nicht nur zu einer bestimmten Jahreszeit, sondern ganzjährig zur Verfügung stehen und ein ausreichendes Platzangebot zur Aufstellung der Wollwäsche- bzw. Aufschlussanlage (idealerweise in einer leeren Halle oder im direkten Umfeld des Agrarbetriebes/des Biogasanlagenbetreibers) vorhanden sein.

Im Anhang 3 des EEG 2009 ist eine Positivliste für die Nutzung von Wärme aufgeführt, welche zur Auszahlung des KWK berechtigt. In dieser Liste ist unter Punkt 2 „die Wärmeeinspeisung in ein Netz mit einer Länge von mindestens 400 m und mit Verlusten durch Wärmeverteilung und -übergabe, die unter 25 % des Nutzwärmebedarfs der Wärmekundinnen und -kunden liegen“ eine Möglichkeit dargestellt, wie die Nutzung von Abwärme einer Biogasanlage mittels Wollwäsche / Bastfaseraufschlussanlage zum Erhalt des KWK-Bonus berechtigt. Dafür muss ein existierendes oder neues Wärmenetz zur Wärmeversorgung genutzt werden. Unter 3. der Positivliste ist zudem die Nutzung als Prozesswärme für industrielle Prozesse im Sinne der 4. BImSchV der Nummer 10.10.1 (Anlagen zur Vorbehandlung - Waschen, Bleichen, Mercerisieren - oder zum Färben von Fasern oder Textilien mit einer Verarbeitungskapazität von 10 t oder mehr Fasern oder Textilien je Tag) aufgeführt. Hierbei könnte allerdings die hohe Verarbeitungskapazität von 10 t Fasern je Tag eine unüberwindliche Hürde für die Nutzung des KWK-Bonus darstellen.

Neben der Deckung des hohen Wärmebedarfs ist auch die Möglichkeit einer Nutzung des erzeugten Stromes aus den Biogas-BHKW zur Deckung des Strombedarfes der Anlagen gegeben. Rein rechtlich ist die Abgabe des Stromes an Dritte für den Betreiber der Biogasanlage neben einer Einspeisung desselben nach Konditionen des EEG möglich. Neben den Kriterien einer eigenen Stromleitung zwischen BHKW und Verbraucher sowie keiner zu großen räumlichen Distanz ($<4,5$ km) sind dafür aber einige administrative Pflichten, wie die Anmeldung bei der Zollverwaltung und die Abführung entsprechender Steuern und Abgaben notwendig. Dass sich die Belieferung der Anlagen für den Betreiber lohnt, ist neben den Kosten der Stromerzeugung vor allem davon abhängig, wie sich die Erzeugungskosten für Strom und die Umlagen auf den Strom zukünftig entwickeln. Bei sinkenden Erzeugungskosten bei gleichzeitig steigenden Netzentgelten sowie Umlagen ist in den nächsten Jahren voraussichtlich kein Strompreis unter 20 ct/kWh zu erwarten. Unter diesen Voraussetzungen kann der Bezug von Biogasstrom über eine Direktleitung von der Biogasanlage zur Wollwäsche/Aufschlussanlage sowohl für den Biogasanlagenbetreiber als auch für den Betreiber der Anlagen interessant sein, welche Strom unter Marktpreisniveau beziehen können. Hierbei kann auch von Vorteil sein, dass die neueren EEGs ab dem EEG 2017 nicht mehr die volle installierte Leistung als Bemessungsleistung für eine EEG-Vergütung zugrunde legen, sondern nur 50 % (EEG 2017) bzw. 45 % (EEGs 2021 und 2023).

Das am 31.01.2025 beschlossene Biomassepaket der Bundesregierung sieht nur noch eine Vergütung in 2.920 Betriebsstunden pro Jahr mit der höchsten Stromeinspeisung in das Stromnetz vor. Die Leistung, welche außerhalb dieser Betriebsstunden in das Stromnetz eingespeist wird, erhält nur noch den Marktstrompreis. Gerade Biogasanlagen mit hohem kontinuierlichen Wärmebedarf und ohne Wärmespeicher werden dann voraussichtlich größere Mengen Strom zum Marktstrompreis einspeisen müssen, sofern keine Investition in Speicherkapazitäten erfolgt. Diese Strommengen könnten für die Nutzung durch die Anlagen zur Wollwäsche bzw. Faseraufschluss interessant sein. Damit ist bei einem Einsatz von überwiegend preisgünstigen Rest- und Abfallstoffen in der Biogasanlage eine Möglichkeit gegeben, die überschüssigen Strommengen oberhalb der

Bemessungsleistung zu besseren Preisen zu vermarkten als zum Börsenpreisniveau. Zudem verbessert sich die Fahrweise des BHKW, da die Regelung eines Mindestabrufs an Leistung von 85 % der installierten Leistung an 1.000 Stunden im Jahr ab dem EEG 2021 so leichter zu erfüllen ist, indem Überschussstrom neben der Eigenstromnutzung und Abgabe an eine Wollwäsche /Faseraufschlussanlage als EEG-Strom vermarktet werden kann und so ein nahezu durchgängiger Betrieb des BHKW bei hoher Last möglich wird.

2.3 Analyse in Thüringen verfügbarer Biogasanlagen für die Zwecke des Projektes

Für die Auswahl einer potenziell geeigneten Biogasanlage in Thüringen zum Anschluss an Anlagen zur Wollwäsche bzw. Bastfaseraufschluss wurden Daten aus anderen Projekten zusammengetragen und verglichen. Die nachfolgende Tabelle zeigt potenziell geeignete Standorte, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da nur ca. 80 Anlagen aus Thüringen in die Bewertung nach verschiedenen Kriterien mit einer Eignung zum Anschluss an eine Wollwäsche und eine industrielle Degummierung von Hanf eingeschlossen wurden.

Tabelle 1: Ausgewählte Biogasanlagen

Unternehmen	Standort	EEG-Auslauf	Kommentar
KWK-bonusfähig			
NAWARO Bad Langensalza GmbH	Zimmern	2030	Bisher kaum externe Wärmenutzung, viele alte Stallgebäude verfügbar, planen Richtung Biogasaufbereitung zu gehen (keine Abwärme-Überschüsse mehr)
Agrofarm Knau e.G.	Laskau	2029	Mit 380 kWel Leistung eher kleine Biogasanlage
Jungrinderaufzucht Gleichamberg GmbH	Gleichamberg	2029	Geht möglicherweise in Richtung Biomethaneinspeisung; dann keine Abwärme mehr verfügbar
Agrargenossenschaft Königsee e.G.	Königsee	2027	Nahes EEG-Auslaufdatum; durch doppelte Überbauung aber ähnliche Bemessungsleistung in Zukunft; geht möglicherweise Richtung Biomethaneinspeisung
nicht KWK-bonusfähig			
Milch-Land GmbH Veilsdorf	Veilsdorf	2021/2031	Befindet sich bereits in der Anschlussvergütung; Stromvergütung nach 2031 unklar
AGN - Agrargesellschaft mbh Neunheilingen	Neunheilingen	2027/2032	Zwei Biogasanlagen an einem Standort; Überlegung Richtung Biomethaneinspeisung
Agrargenossenschaft Teichel eG	Teichel	2034	Kommt erst aus einem Sanierungsverfahren
Nessetalmilch GmbH	Nessetal	2032	Keine ausreichenden Daten zur Bewertung der Wärmenutzung

3 Betrieb einer Anlage zur Wollwäsche mit Anbindung an eine Biogasanlage

3.1 Technisch-rechtliche Möglichkeiten des Einsatzes von Abwässern der Wollwäsche

Je nach Aufbau der einzelnen Bäder einer Wollwasch-Anlage und den Abzugsmöglichkeiten der Abwässer aus den Bädern hat das Waschwasser einen bestimmten TS (Trockensubstanz)- und CSB-Gehalt (Der CSB -Wert gibt die Menge an Sauerstoff an, die benötigt wird um alle im Wasser enthaltenen organischen Verbindungen, einschließlich der schwer abbaubaren - z.B. Pflanzenschutzmittel - und einige anorganische Stoffe durch chemische Oxidation abzubauen), welcher maßgeblich ist für den zu erwartenden Biogasertrag. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass das Waschwasser einen TS-Gehalt zwischen nahe Null und 2 % und damit einen sehr niedrigen TS-Gehalt im Vergleich zu konventionellen Substraten aufweist. Soll aus dem Abwasser der Wollwäsche ein nennenswerter Biogasertrag und damit monetärer Ertrag für den Betreiber gewonnen werden, müssen große Mengen des Waschwassers in der Biogasanlage verwertet werden. Der Einsatz großer Mengen Abwasser mit dem Ziel einer relevanten Biogaserzeugung steht allerdings im Konflikt mit der dadurch zusätzlich notwendigen Gärrestlagerkapazität der Anlage.

Neben der Regelung einer gasdichten Verweilzeit der eingesetzten Substrate von mindestens 150 Tagen in der Biogasanlage ab dem EEG 2017 und in nach dem 31.12.2011 neu errichteten Gärrestlagern ist die Düngeverordnung mit einer Lagerkapazität für organische Düngemittel von 6 Monaten einzuhalten. Die Lagerkapazitäten der Biogasanlagen sind in der Regel so ausgelegt, dass neben der notwendigen Lagerkapazität für die anfallenden Gärreste kaum zusätzliche Lagerkapazität „auf Vorrat“ vorhanden ist. Der Einsatz großer Mengen an Abwasser aus der Wollwäsche führt demnach dazu, dass die Lagerkapazität für Gärrest an den meisten Biogasanlagen ausgebaut werden muss bzw. technische Einrichtungen zur Verringerung des Gärrestvolumens (Gärrestverdampfer, Gärresttrockner, Separatoren, etc....) nachgerüstet werden müssten. Der Zubau von Lagerkapazität ist mit Preisen von mindestens 100 €/m³ Lagerkapazität zu veranschlagen und damit deutlich zu teuer, als dass bei einem Gasertrag aus dem Waschwasser mit einem TS-Gehalt von 2 % ausreichend Energie erzeugt und vermarktet werden kann, die diese Investition amortisiert. Es ist demnach sinnvoll, das Abwasser nur in solchen Biogasanlagen einzusetzen, die ohnehin Wasser zur Verdünnung der Einsatzstoffmischung einsetzen, um deren technische Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. In Thüringen sind viele Anlagen in Nachbarschaft zu Stallanlagen errichtet worden, um die Reststoffe der Tierhaltung zu verarbeiten. Diese Anlagen nutzen in der Regel größere Mengen Gülle und sind zur Prozessführung nicht auf die Zumischung von Wasser angewiesen. Nur ein untergeordneter Teil der Biogasanlagen in Thüringen wird dagegen hauptsächlich mit nachwachsenden Rohstoffen und größeren Mengen an Festmist betrieben, bei welchen teilweise eine Zumischung von Wasser zur besseren Pump- und Rührfähigkeit notwendig ist. Von den oben dargestellten Anlagen setzen nur die Anlagen Zimmern, Gleichamberg und Neunheilingen größere Mengen Feststoffe als flüssiges Substrat ein, sodass ein zusätzlicher Einsatz von Wasser als realistisch erscheint, wobei in allen Anlagen der Güllebonus in Anspruch genommen wird. Ein Hinweis darauf, dass die genannten Biogasanlagen tatsächlich Wasser einsetzen, besteht aktuell nicht.

3.2 Einschätzung der Folgen auf die Vergütung der Biogasanlage

In einer Stellungnahme einer Fachanwaltskanzlei zum Einsatz von Abwässern aus der Wollwäsche wurde klargestellt, dass im Fall der Verstromung von Biogas unter folgenden Voraussetzungen nach allen Fassungen des EEG ein Anspruch auf EEG-Förderung besteht:

„Der Anspruch besteht, wenn in einem BHKW ausschließlich Biomasse im Sinne der BiomasseV eingesetzt wird. Gemäß § 2 Absatz 3 Nummer 2 BiomasseV gilt durch anaerobe Vergärung erzeugtes Biogas stets als Biomasse, sofern zur Vergärung nicht die folgenden Stoffe eingesetzt worden sind:

- gemischte Siedlungsabfälle,
- Hafenschlick oder sonstige Gewässerschlämme und -sedimente
- tierische Nebenprodukte (mit einigen Ausnahmen)
- mehr als 10 Masseprozent Klärschlamm.

Mithin besteht der Förderanspruch bei Biogas aus der Abwasserreinigung generell als auch aus Abwasser der Wollwäsche im Speziellen“.

In den verschiedenen Fassungen des EEG 2009 und 2012 ist Biogas aus Abwässern aus einer Wollwäsche weder in der Positivliste für den Bonus aus nachwachsenden Rohstoffen oder der Positivliste für rein pflanzliche Nebenprodukte geführt noch in den Einsatzstoffvergütungsklassen 1 und 2 erwähnt. Es kann nur die Grundvergütung für den Anteil des Stroms aus diesem Biogas in Anspruch genommen werden. Zudem besteht die Gefahr, dass bei Einsatz des Wollwaschwassers der Verlust des NawaRo-Bonus im EEG 2009 droht, da es nicht in der Positivliste Erwähnung findet. Der Einsatz des Abwassers in einer Biogasanlage im EEG 2009 sowie die Auswirkungen auf die EEG-Vergütung müssen vorher mit dem Netzbetreiber geklärt werden. Bei drohendem Verlust des NawaRo-Bonus ist von einem Einsatz in der Biogasanlage abzusehen.

Mit allen weiteren EEGs wird für einen Vergütungsanspruch immer auf die Biomasseverordnung in der zum Zeitpunkt der Bekanntmachung geltenden Fassung verwiesen – damit wird das Abwasser aus der Wollwäsche klar unter Biomasse einzuordnen sein und kann eingesetzt werden. Der Strom wäre auf jeden Fall nach EEG zu vermarkten oder als Eigenstrom selbst in der Anlage zu verbrauchen. Auch eine direkte Weiterleitung des Stromes an die Wollwasch-Anlage über eine eigene Stromleitung ist möglich. Weiterhin muss der Einsatz des Abwassers aus der Wollwäsche unabhängig vom Vergütungsanspruch der Biogasanlage durch das EEG durch die für die Anlage zuständige Genehmigungsbehörde als Einsatzstoff genehmigt werden. Zudem wäre die Erfassung des Biogasertrages des Waschwassers durch regelmäßige Beprobung notwendig, um zusammen mit der eingesetzten Menge des Waschwassers den Stromanteil zu bestimmen, der aus dem Biogas aus dem Waschwasser erzeugt wird.

3.3 Folgenabschätzung hinsichtlich der Nutzung der Gärreste als Düngemittel

Unbehandeltes Abwasser ist aus Sicht der EU grundsätzlich als Abfall zu werten. Davon ausgehend, dass das Abwasser aus der Wollwäsche als Abfall klassifiziert wird, ändert sich die Eigenschaft der Gärreste in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage, wenn dieses Abwasser als Einsatzstoff eingesetzt wird. Dies kann zu zusätzlichen Auflagen zur Prozessführung (ggf. Hygienisierung), Nachweisführung und Meldepflichten führen. Dies ist mit der zuständigen Genehmigungsbehörde im Detail zu klären, da hier erhebliche Ermessensspielräume bestehen, die ausgenutzt werden sollten. Die Gärreste verlieren düngerechtlich den Status als Wirtschaftsdünger, was grundsätzlich nicht als kritisch einzustufen ist. Allerdings wird dies für die Landwirte in der Regel zu Mehraufwendungen in der Dokumentation und Beprobung (z.B. auf Schwermetalle) der organischen Düngemittel führen. Es existieren auch Verpächter, die die Ausbringung von als Abfall klassifizierten Düngemitteln auf ihren Flächen ausschließen. Die Details hinsichtlich der Anforderungen liegen darüber hinaus auch im Ermessen der Genehmigungsbehörden.

3.4 Einschätzung des TLVwA hinsichtlich des Genehmigungsprozesses

Für eine Genehmigung des Einsatzes des Abwassers aus der Wollwäsche in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage ist nach einer ersten Stellungnahme des Thüringer Landesverwaltungsamtes (TLVwA) eine Kategorisierung des Abwassers nach Kreislaufwirtschaftsgesetz notwendig. Dieses definiert einen Abfall als Stoff, dessen sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Damit scheint eine Beteiligung des Betreibers der Biogasanlage an der Wollwasserwäsche als notwendig, sollte das Abwasser der Wollwäsche als Abfall und nicht als Nebenprodukt des Waschprozesses kategorisiert werden.

Bei einer Zuordnung des Abwassers in den Abfallbereich kann das Abwasser ggf. nicht mehr der Ziffer 1.15 des Anhang 1 der 4. BImSchV im Allgemeinen zugeordnet werden, sondern wäre einer der Ziffern aus 8.6 des Anhang 1 der 4. BImSchV zuzuordnen, welchem ggf. ein normales Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung zuzuordnen wäre. Sollte das Abwasser der Kategorie Gülle zugeordnet werden, was aber als nicht wahrscheinlich anzunehmen ist, besteht die Chance einer Zuordnung zu 8.6.3.2 des Anhang 1 der 4. BImSchV und einem vereinfachten Genehmigungsverfahren.

Neben der allgemeinen Kategorisierung in den Abfallbereich ist im Genehmigungsverfahren zu ermitteln, ob es sich um einen gefährlichen oder nicht gefährlichen Abfall handelt. Dazu ist die Analyse des Abwassers in einem Labor notwendig. Anhand der Inhaltsstoffe des Waschabwassers und der im Waschprozess eingesetzten Waschmittel erfolgt dann eine Einstufung des Abwassers. Eine Kategorisierung des Waschwassers als gefährlicher Abfall aufgrund der aus der Wolle ausgewaschenen organischen- und anorganischen Verschmutzungen kann ausgeschlossen werden. Sofern im Abwasser wassergefährdende Stoffe festgestellt werden, stellt zudem die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) weitere Hürden auf, welche ggf. größere Investitionen in Aufbereitungstechnik notwendig machen. Sofern das Abwasser einem Punkt der Liste aus § 3 Absatz 2 AwSV zugeordnet wird, sind keine zusätzlichen Anforderungen neben den schon bestehenden Anforderungen an die Vergärungsanlage zu erwarten.

Zur Prüfung der genehmigungsrechtlichen Vorgaben ist eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit der regional zuständigen immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsbehörde sowie die Klärung der Eigenschaften des Abwassers hinsichtlich der Zuordnung in den Abfallbereich mit der zuständigen unteren Abfallbehörde notwendig, sobald ein Biogasanlagenbetreiber am Einsatz des Abwassers interessiert ist.

4 Untersuchungen einer Wollwaschanlage mit Anbindung an eine Biogasanlage

4.1 Beschreibung der untersuchten Beispiel-Anlage

Um eine möglichst praxisnahe Datengrundlage für die weiteren Bewertungen zu schaffen, wurden Untersuchungen und Beprobungen an einer real existierenden Anlage durchgeführt, die von der Anlagenkapazität und von den durchzuführenden technologischen Schritten der Reinigung den Zielstellungen einer in Thüringen zu errichtenden Anlage nahe kommt. Der Lead-Partner des Vorhabens Baur Nonwoven GmbH arbeitet im Rahmen geschäftlicher Kontakte mit dem Öztaler Schafwollzentrum Regensburger GmbH, A-6441 Umhausen, dem Eigentümer dieser Anlage zusammen.

Die bestehende Wollwaschanlage in Umhausen wurde im Jahr 1997 projektiert und im Jahr 1998 geliefert. Nach dem Aufbau der eigentlichen Anlage wurden zusätzliche Ergänzungen im Bereich Voröffnung der Rohwolle und der Abwasserbehandlung nötig.

Grundsätzlich wurde die Anlage zur Wäsche von Wollen im Feinheitsbereich von 19-30µ und einer Faserlänge zwischen 30-120 mm konzipiert.

Es wurde von einem Rendement von 65-70 % (Gutfasern, 30-35 % Abgänge) und einer Anlagenleistung von 115 kg/h gewaschener Wolle ausgegangen.

Gewaschen werden sollen ausschließlich Wollen aus den alpinen Regionen. Hier ist ein entsprechend geringer Wollfettanteil zu erwarten.

Dies führte, aus heutiger Sicht, zu einer nicht ausreichenden Auslegung der Anlage bezüglich der Behandlungsstufen (5-6 Bäder wären notwendig), des Frischwasserbedarfs, sowie daraus resultierend einer zu niedrigen Energiebereitstellung für die Wasseraufbereitung und den Trocknungsprozess.

Die eigentliche Inbetriebnahme der Anlage erfolgte in den Jahren 1999 und 2000.

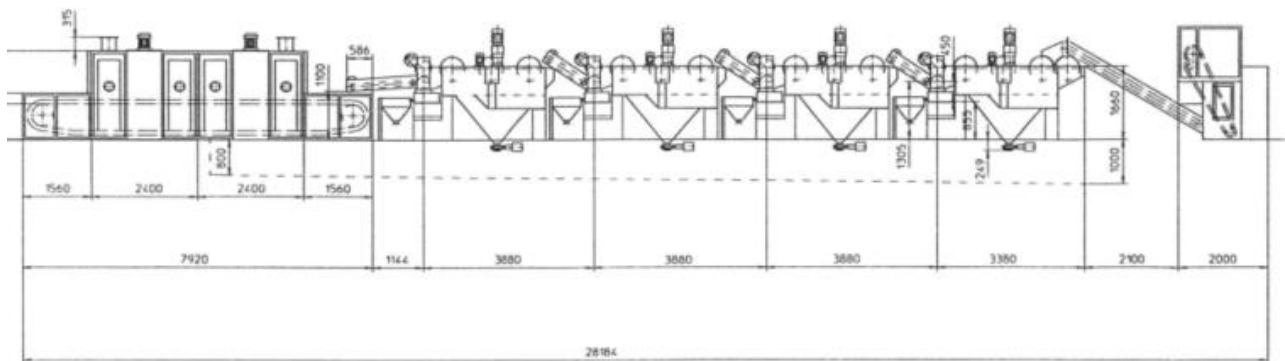


Abbildung 1 Anlagenaufstellung Rohwaschanlage Fabr. Fleissner, Bj. 1999

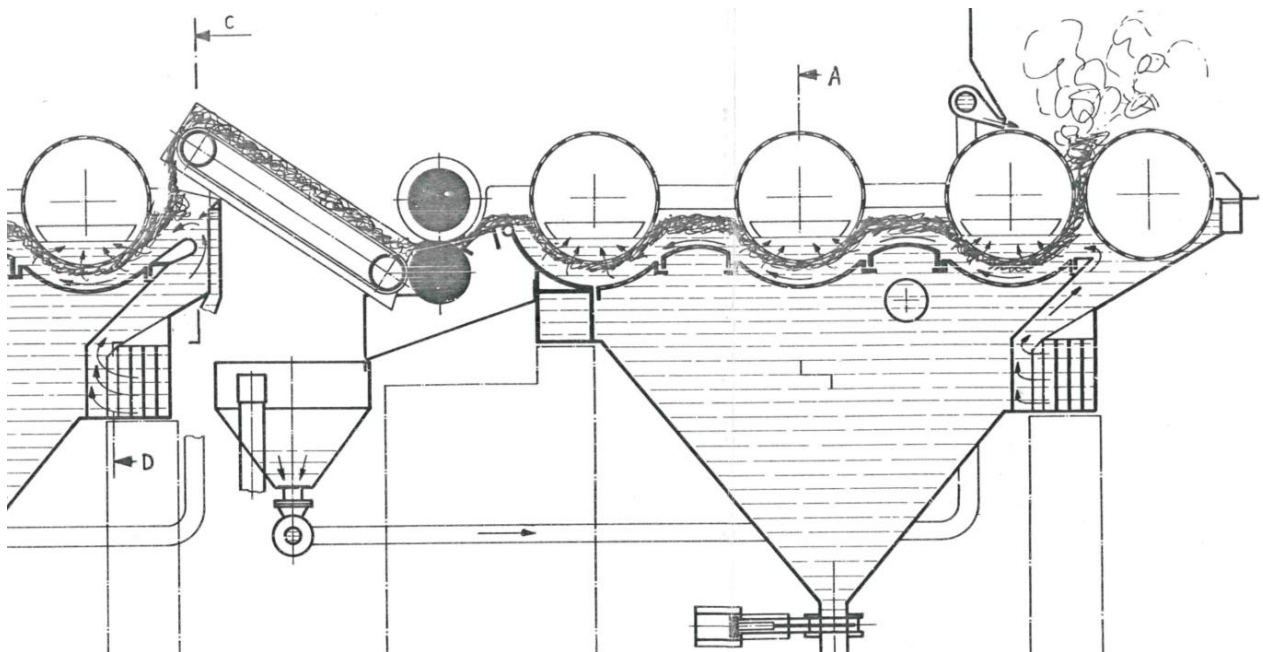


Abbildung 2 Waschprinzip einer Siebtrommelwaschanlage

Das wesentliche Merkmal einer Rohwollwaschanlage auf der Basis von Siebtrommeln beruht auf der Durchströmung und dem gleichzeitigen Transport der Rohwolle auf einer sich drehenden Einheit. Eine Propellerpumpe, im seitlichen des Bades angesetzten Pumpenkasten, fördert über Seiten- und Verdichterkanäle die Waschflotte im Kreislauf durch das Bad. Durch den Durchflusswiderstand der Siebtrommeln und des zu waschenden Materials, welches an der unteren Trommelhälfte anliegt und der Arbeit der Pumpe, stellt sich zwischen dem eigentlichen Badbehälter und den Seitenkanälen ein Niveauunterschied ein, der je nach Pumpendrehzahl eine mehr oder weniger starke Durchströmung des Wollvlieses bewirkt.

In den einzelnen Bädern können, je nach Temperatur und Einsatz von Hilfsmitteln, verschiedene Effekte erzielt werden.

Während in der Planungsphase im Jahr 1998 der Fokus auf einer „kurzen“ Anlage, sowie der Energieverbrauch kein grundsätzliches Problem darstellte (hier war eine Hackschnitzelanlage installiert), änderten sich die Anforderungen im Laufe der Inbetriebnahme. 2020 wurde die Hackschnitzelanlage durch eine Gasheizung ersetzt.

Die nachträglich installierte Abwasseraufbereitung mittels eines 2-Phasen-Decaners sowie einer Umkehrosmoseanlage erwies sich als nicht geeignet, um die anfallenden Prozessabwässer zuverlässig aufzuarbeiten.

Da die ortsbefindliche Kläranlage entsprechende Kapazitäten aufwies wurden die Prozessabwässer kostenpflichtig über diesen Weg verwertet. Die Waschkapazität von 300t/Jahr wurde auf 100t/Jahr reduziert.

Auf Grund eines geringeren Frischwassereinsatzes wurde ein höherer Restfettanteil auf der Waschwolle akzeptiert. Dies erwies sich für den Einsatz als Filzwolle und bei der Weiterverarbeitung mittels Färbens als nicht übermäßig hinderlich.

Für einen modernen Spinnprozess ist dieser hohe Restfettgehalt aber nicht akzeptabel.

Durch einen diskontinuierlichen Betrieb der Anlage und der höheren Zuführung von Frischwasser und geänderten Anlageneinstellungen konnten aber grundlegende Erkenntnisse bzgl. einer zeitgemäßen Wollwäsche gewonnen werden.

Eine energetische Betrachtung sowie ein Konzept für eine Prozesswasserbehandlung folgen in einem weiteren Punkt.

Der Prozess der Wollwäsche an dieser Referenzanlage kann gemäß Pkt. 4.2 charakterisiert werden. Neben der Wollannahme von regionalen Kleinerzeugern und der eigentlichen Wollwäsche werden der Hauptteil der gewaschenen Wolle weiterverkauft, aber auch Teile auf eigenen Maschinen verarbeitet und daraus verschiedene Produkte hergestellt.

4.2 Beschreibung des Prozesses der Wollwäsche an der Referenzanlage

Der Aufbereitungsprozess der Rohwolle beginnt mit der Entnahme der Rohwolle (Vliese) aus Ballen (s. Abbildung 3), welche mehr oder weniger stark zusammengepresst sind, um den Transportumfang zu verringern. Die Ballen werden manuell geöffnet und die Wolle auf einen Fördertisch eines Ballenöffners geworfen (s. Abbildung 4). Die Ballen und die darin verpackte Wolle weisen unterschiedliche Qualitäten und Verunreinigungen auf, die stark von der Haltung, Pflege der Schafe und den Bedingungen bei der Schur abhängen. Als Störstoffe haften grobe Reste von Kot, Stroh, Heu oder industrielle Abfälle wie Verpackungsmaterial an der Wolle.



Abbildung 3 Angelieferte Rohwolle



Abbildung 4 Voröffnung der Rohwolle



Abbildung 5 Zuführung der geöffneten Rohwolle in die Waschanlage

Nach einer Vereinzelung und Auflockerung der Wolle und ersten Störstoffabscheidung wird die Wolle über ein Förderband über einen Kastenspeiser mit Wiegeeinrichtung einer weiteren Dosiereinheit zugeführt (s. Abbildung 5). Diese vereinzelt die Wolle weiter und führt sie über ein weiteres langsam laufendes Förderband dem ersten Bad der Wollwäsche zu. In diesem ist eine Soll-Temperatur von 56°C vorgesehen und es wird Natronlauge (50- $<75\%$ Natriumhydroxid) zu dosiert, um die Wolle von groben Verunreinigungen wie anhaftendem Kot und mineralischen Bestandteilen zu reinigen. Die Wolle wird innerhalb des Bades über drei Lochtrommeln unter Wasser gedrückt und über Siebwannen geführt. Durch an die Trommeln angelegten Unterdruck wird die Durchströmung der Wolle und damit der Reinigungseffekt erhöht.

Am Ende des ersten Bades wird die Wolle durch ein Quetschwalzenpaar gepresst und der größte Teil des Waschwassers aus der Wolle abgeschieden. Ein Teil des aufgenommenen Wassers lässt sich mechanisch nicht entfernen und wird in das zweite Bad verschleppt. Mit dem in der Wolle gespeicherten Restwasser werden auch darin gelöste Bestandteile der Verunreinigungen in das zweite Bad übertragen. Über ein Förderband gelangt die feuchte Wolle in das zweite Bad. Auch in diesem sind drei Lochtrommeln installiert, welche die oben aufschwimmende Wolle unter die Wasseroberfläche und über die Siebwannen drücken.

In diesem Bad wird eine Temperatur von 58°C angestrebt. Nach der groben Abscheidung des Wassers aus der wassergesättigten Wolle über die Doppelwalze, gelangt die Wolle über ein Förderband in das dritte Bad. Durch dieses wird die Wolle, wie in den anderen Bädern auch, mittels der Trommeln und Siebwannen geführt. In diesem Bad wird eine Temperatur von 52°C angestrebt.

In den ersten drei Bädern werden neben den oben beschriebenen eingesetzten Substanzen Waschmittel genutzt, um die Wolle zu reinigen. Neben Lavan CBW und Losin OC-HY wird dem Waschwasser in geringen Mengen Alvirol ABF zugemischt. Bei Lavan CBW handelt es sich um ein schaumarmes Wasch- und Detachiermittel auf Basis des Fettalkohols Polyglykolether, welches sehr gute Benetzungseigenschaften aufweist. Das Waschmittel weist ein sehr gutes Emulgiervermögen besonders von Ölen, Fetten und Wachsen bei niedrigen Behandlungstemperaturen auf und ist damit zur

Lösung der Wollfette im Waschwasser geeignet. Losin OC-HY ist ein schaumarmes Wasch-, Reinigungs- und Nassdetachiermittel zum Entfernen von Öl-, Fett-, Harz- und Teerverschmutzungen sowie Silikonölen und synthetischer Schichten. Das Waschmittel besteht aus einer Mischung aus Fettalkoholethoxylaten und biologisch abbaubaren Fettlösemitteln. Dieses Waschmittel ist neben seiner wollefett-lösenden Eigenschaften auch dazu geeignet, weitere schwer lösliche Verbindungen im Waschwasser zu emulgieren. Alvirol wird zur Enthärtung des Wassers verwendet, wobei die Wasserhärte im Ötztal mit 0°dH bereits im Härtebereich weich liegt. Alle drei Waschmittel stammen von der Textilcolor AG. Kommt es während der Wäsche zur vermehrten Schaumbildung wird außerdem TC-Entschäumer 61 in geringer Menge per Hand zugegeben. Dabei handelt es sich um ein Schaumdämpfungsmittel aus Basis einer Silikonemulsion. Nach der weitgehenden Entwässerung der Wolle durch ein Quetschwalzenpaar erfolgt im vierten Bad eine Spülung der Wolle. In das Waschwasser des vierten Bades wird neben 80 %iger Essigsäure als Reinigungsmittel auch 35 %ige Wasserstoffperoxid-Lösung als Bleichmittel dosiert, um Reste an organischen Verbindungen in der Wolle zu oxidieren und die Wolle so zu entfärben um ein möglichst gleichbleibendes Aussehen der Wolle nach der Wäsche zu gewährleisten. Das Wasser des vierten Bades ist weitgehend frei von Verfärbungen. Allerdings wird auch in diesem Bad der Wolle noch anhaftendes Fett ausgewaschen. Auch in diesem Bad beträgt die angestrebte Wassertemperatur 52°C. Nach der groben Entwässerung durch ein Quetschwalzenpaar gelangt die Wolle über ein Förderband in einen Bandrockner und wird in diesem so weit getrocknet, dass die Wolle lagerfähig wird. Nach der Trocknung erfolgt eine weitere Auflockerung der Wolle und ein Ausscheiden von letzten, der Wolle anhaftenden Verunreinigungen und sehr kurzer Wollfasern durch einen Stufenreiniger.

Die Wolle wird in eine Mischkammer geblasen. Hier kann ein Feuchtigkeitsausgleich erfolgen.

Danach wird die Wolle über einen Luftkanal zu einer Presse transportiert und dort in mehreren Schichten zu Ballen gepresst. Diese werden vor Ort auf Paletten gelagert und zum Teil in der eigenen Produktion von Wollprodukten verwertet und zum Teil an Kunden, welche Ihre Wolle zur eigenen Verarbeitung/Verwendung in der Wollwäsche reinigen lassen, verschickt.

4.3 Energiebedarf der Wollwäsche

4.3.1 Bedarf an Prozesswärme

Die Wäsche der Wolle ist ein energieintensiver Prozess. Neben dem zum Betrieb der Maschinen notwendigen Strom wird besonders viel Energie zur Erwärmung des Wassers in den Bädern und zur Trocknung der Wolle nach dem Waschen benötigt. Die Erwärmung der ersten beiden Bäder der Wollwäsche im Ötztal erfolgt über Heißdampf, welcher mit einem Ölbrenner erzeugt wird. Daneben wird eine Gasheizung eingesetzt, welche das Wasser für die Bäder drei und vier erwärmt und Wärmeenergie für die Trocknungsluft des Bandrockners zur Verfügung stellt. Der Energiebedarf je Kilogramm gewaschener Wolle ist im Wesentlichen davon abhängig, wie viel Liter Wasser für den Waschgang eingesetzt werden. In der Literatur wird ein Wasserbedarf von 20-30 l/kg Wolle beschrieben, um eine ausreichende Reinheit der Wolle zu erreichen. Die Wollwäsche im Ötztal arbeitet mit ca. 3,5 l Wasser/kg Rohwolle. Dadurch ist der Energiebedarf je Kilogramm gewaschener Wolle deutlich geringer, da weniger Wasser von ca. 6°C auf ca. 60°C erwärmt werden muss. Die Wolle wird während des Waschprozesses heller, je höher die eingesetzte Menge Wasser ist. Durch die Zugabe von Bleichmitteln kann der Wasserbedarf reduziert werden. Allerdings leidet dabei die Qualität der Fasern, sodass das Verwertungsportfolio zurückgeht und die Wolle nicht mehr für alle Weiterverarbeitungen geeignet ist.

Bei einem Wasserbedarf von 3,5 l/kg Wolle, einer Verarbeitungskapazität von ca. 500 kg Wolle/Tag und einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz von 50 K ergibt sich ein Energiebedarf von:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = \left(3,5 \frac{\text{l}}{\text{kg}} \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K} = 366.625 \frac{\text{kJ}}{\text{d}} = 102 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Daneben wird eine hohe dauerhafte Leistung für die Erwärmung der Luft zur Trocknung der Wolle benötigt. Der Energiebezug des Trockners lässt sich über den Gasverbrauch der Gasheizung unter Abzug der für die Beheizung der Bäder 3 und 4 benötigten Wärme herleiten. Bei der Ablesung des Zählerstandes zwischen 9:20 Uhr und 9:57 Uhr am 02.07.24 bei gleichbleibender Frischwasserzufuhr von 330 l/h, und leicht absinkenden Temperaturen in Bad 4 wurde eine Erdgasmenge von 6,2 m³ verbraucht. Damit ergibt sich ein stündlicher Bedarf von 10,05 m³/h. Unter der Annahme einer konstanten Temperatur in den Bädern und einer Frischwassertemperatur vor Erwärmung von 6°C ergibt sich folgender Wärmebedarf für die Trocknung der Wolle (mit 10 bzw. 18 kWh/m³ Heizwert von Erdgas und 90 % Wirkungsgrad der Gasheizung bezogen auf den Brennwert):

$$Q = m * c * \Delta T = \left(\left(\frac{37}{60} \frac{h}{1} * 130 \frac{l}{h} \right) * 4,19 \frac{kJ}{kg * K} * 38 K + \left(\left(\frac{37}{60} \frac{h}{1} * 200 \frac{l}{h} \right) * 4,19 \frac{kJ}{kg * K} * 43 K \right.$$

$$Q = 34.985 kJ = 9,72 kWh$$

$$6,2 m^3 Erdgas * 10,18 \frac{kWh}{m^3} * 90 \% - 9,72 kWh = 47,1 kWh / \left(\frac{37}{60} \frac{h}{1} \right) = 76,4 kW$$

Für den Betrieb einer Wäsche in Thüringen bei einer Verarbeitungskapazität von 300 t Wolle im Jahr in der Anfangsphase und 250 Arbeitstagen sowie einer Temperaturdifferenz von 50 K und einem Wasserbedarf von 20 l/kg Wolle ergibt sich ein täglicher Energiebedarf von 1.397 kWh für die Beheizung der Bäder.

$$Q = m * c * \Delta T = \left(20 \frac{l}{kg} * 1200 \frac{kg}{d} \right) * 4,19 \frac{kJ}{kg * K} * 50 K = 5.028.000 \frac{kJ}{d} = 1.397 \frac{kWh}{d}$$

Mit einem Energieverlust des Nahwärmenetzes bei der Übertragung der Wärme aus einer Biogasanlage an die Wollwaschanlagen von 15 % ergibt sich eine Wärmeabgabe der Biogasanlage von 1.643 kWh/d. Für einen zweischichtigen Betrieb mit 15 Stunden Betriebszeit der Wäsche und mit der Annahme einer kontinuierlichen Erwärmung des Prozesswassers der Bäder ergibt sich eine benötigte Wärmeleistung von durchschnittlich 110 kW für die Erwärmung des Waschwassers. Daneben ergibt sich für die Trocknung ein thermischer Leistungsbedarf von 135 kW.

$$76,4 kW * \left(\frac{1200}{800} kg \right) / 85 \% = 135 kW$$

Da die benötigte Wärmeleistung zu Beginn des Waschvorgangs und zur Erwärmung der gesamten Wassermenge der Bäder deutlich größer ist als bei kontinuierlichem Betrieb der Wäsche mit Erwärmung der Ersatzwassermenge bei Austausch von Schmutzwasser mit Wärmerückgewinnung, ist zu Beginn des Arbeitstages eine höhere Leistung für die Warmwasserbereitung vorzusehen. In der Berechnung wurde eine Rückgewinnung von Wärme aus dem Schmutzwasser über Wärmetauscher an das Frischwasser nicht berücksichtigt. Mit einer Wärmerückgewinnung kann der Leistungsbedarf für die Warmwasserbereitung deutlich reduziert werden.

Nach einer Phase der Inbetriebnahme und Optimierung muss von einer Kapazität im 2-Schicht-Betrieb von ca. 2-3 t Waschwolle pro Tag ausgegangen werden.

4.3.2 Strombedarf der Wollwäsche

Nennstrom:	Wollwäsche/Trocknung	160 A
	Fasertransport, Speicher	60 A
	Abwasserbehandlung	60 A

4.4 Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen

Die Probennahme aus den verschiedenen Bädern mit unterschiedlichen Abwasserqualitäten der Wollwäsche erfolgte zwischen 13:00 Uhr und 16:00 Uhr am 01.07.24 und am 02.07.24 zwischen 8:30 Uhr und 17:00 Uhr sowie bereits am 27.06.24. Es wurden insgesamt 28 Proben genommen und durch das Labor JenaBios GmbH auf verschiedene Parameter untersucht.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Gesamtheit der entnommenen Proben und eine Auswahl der vorherrschenden Prozessbedingungen zusammen:

Tabelle 2 Übersicht Abwasserproben Wollwaschanlage

Datum	Uhrzeit	Probennahme	Temperatur	Kommentar
27.06.24		Bad 1 Bad 2 Bad 3 Bad 4 Abwasser		330 l/h Frischwasserzufuhr bei 100 kg Wolle/h Schmutzfracht konzentriert sich aufgrund der geringen Frischwasserzufuhr in den Bädern bis zum Maximum auf. Rohmaterial: Merinowolle Alle Wasch- und Bleichmittel im Einsatz
01.07.24	13:00	Bad 3 Bad 4		Es wurden sehr geringe Mengen Lavan CWB, Losin OC-HY und Alvirol ABF zu Beginn des Waschvorgangs am Morgen zugesetzt und dann ab dem Mittag nicht mehr zugesetzt. Keine Verwendung von Natronlauge, Essigsäure und Wasserstoffperoxid. TC-Entschäumer 61 wurde eingesetzt. Morgens 30 % Frischwasser und 70 % Prozesswasser aus der Vorwoche Frischwasserzufuhr 130 l/h in Bad 3 und 200 l/h in Bad 4 Rohmaterial: Merinowolle Schneller Abbau der Waschmittel nach Ende der Dosierung am Vormittag, erkennbar an zunehmender Schaumbildung
01.07.24	15:30	Bad 1 Bad 2 Bad 3 Bad 4 Abwasser Abgesetzte Feststoffe aus Abwasser	30,7°C 50,6°C 43,5°C 47,7°C - Raumtemperatur	Es wurden sehr geringe Mengen Lavan CWB, Losin OC-HY und Alvirol ABF zu Beginn des Waschvorgangs am Morgen zugesetzt und dann ab Mittag nicht mehr. Keine Verwendung von Natronlauge, Essigsäure und Wasserstoffperoxid. TC-Entschäumer 61 wurde eingesetzt. Die Lagerdauer der Feststoffe vor der Probennahme ist unbekannt. Frischwasserzufuhr 130 l/h in Bad 3 und 200 l/h in Bad 4

02.07.24	8:30	Bad 1 Bad 2 Bad 3 Bad 4 Reinwasser Bad 4	56,0°C 54,1°C 44,5°C 50,5°C	Es wurde am Vormittag die Wolle vom Vortag ein zweites Mal gewaschen, um den Grauschleier zu verringern. Frischwasserzufuhr 130 l/h in Bad 3 und 200 l/h in Bad 4 Es wurden dem Waschprozess den gesamten Tag Mengen an Lavan CWB, Losin OC-HY und Alvirol ABF zugesetzt sowie Natronlauge, Essigsäure und Wasserstoffperoxid eingesetzt. TC-Entschäumer 61 wurde eingesetzt.
02.07.24	10:50	Bad 4	49,4°C	Nach hoher Frischwasserzufuhr wurde Bad 4 erneut beprobt. Frischwasserzufuhr 200 l/h in Bad 3 und 485 l/h in Bad 4
02.07.24	14:10	Bad 1 Bad 2 Bad 3 Bad 4 Reinwasser Bad 4	52,8°C 48,9°C 43,9°C 46,9°C	Frischwasserzufuhr 130 l/h in Bad 3 und 200 l/h in Bad 4
02.07.24	16:45	Bad 1 Bad 2 Bad 3 Bad 4	59,6°C 58,0°C 44,3°C 47,1°C	Es erfolgt über den Nachmittag eine Beheizung der Bäder 1 und 2, sodass zum Ende des Tages die höchste Temperatur in den Bädern erreicht wurde. Frischwasserzufuhr 130 l/h in Bad 3 und 200 l/h in Bad 4

Als Entnahmemöglichkeiten für die Proben konnten zwei Stellen innerhalb des Waschprozesses der Bäder genutzt werden. Neben der Entnahme des Wassers direkt aus der Wanne zwischen den Lochtrommeln war eine Entnahme nach den Abquetschwalzen möglich, bevor das abgepresste Wasser in einer Wanne aufgefangen und mittels Venturi-Vakuumpumpe dem Bad am Einlauf wieder zugeführt wird. An beiden Entnahmestellen ist die gleiche Qualität der Proben zu erwarten. Die Entnahme der Abwasserproben erfolgte vor der Wasseraufbereitung mittels Spaltfilter.

Am 01.07.24 war die Probennahme mit 30°C Wassertemperatur, Frischwasser und ohne Wasch- oder sonstige Zusatzstoffe vorgesehen, um für die Kombination einer Wollwäsche mit einer Biogasanlage eine Konzentration der Abwässer in einem ersten Bad mit kaltem Wasser zu simulieren. An diesem Tag waren die ersten Bäder der Wäsche allerdings bereits aufgewärmt und eine Kombination von 30 % Frischwasser und 70 % Prozesswasser aus der Vorwoche in den Becken im Einsatz. Bei Feststellen der Ausgangsbedingungen nach Ankunft des Probenehmers wurde die Beheizung der ersten Bäder sofort ausgesetzt und die Hilfsmittel- und Waschmittelzugabe beendet. Die Temperatur sank danach auf 30,7°C von ursprünglich 43,3°C in Bad 1 und 50,6°C von ursprünglich 63,8°C zwischen 10:54 Uhr und 15:43 Uhr. Die am Morgen des 01.07.24 noch eingesetzten Waschmittel waren aufgrund der deutlich vermehrten Schaumbildung wahrscheinlich sehr schnell abgebaut. Die gewaschene Wolle wies aufgrund der ausgesetzten Wasch- und Bleichmittelzufuhr sowie der reduzierten Temperaturen in den Bädern 1 und 2 am Nachmittag einen leichten Grauschleier auf.

Am 02.07.24 erfolgte die Probennahme an der Wollwaschanlage bei Beheizung der Bäder 1 und 2 mit standardisiertem Einsatz von Wasch- und Bleichmitteln. Die Bäder wurden mit 30 % Frischwasser und 70 % Prozesswasser vom Vortag betrieben und zu Beginn des Waschtags die Wolle vom Vortag gewaschen, um das Wasch-Ergebnis zu verbessern, da die Wäsche am 01.07.24

ohne Waschmittel einen erheblichen Grauschleier hinterlassen hatte. Nach den ersten Waschergebnissen am 02.07.24 wurde zudem die Frischwasserzufuhr auf 680 l/h mehr als verdoppelt, um eine Reduzierung des Grauschleiers auf der Wolle zu erreichen. Das Waschergebnis wurde dadurch optisch deutlich besser und der Grauschleier der Wolle reduziert. Die erhöhte Frischwasserzufuhr führte allerdings zu einem Überlauf der Abwassersammelbehälter sowie zu einer Überforderung der Gasheizung aufgrund der zu hohen Leistungsabnahme. Die Frischwasserzufuhr wurde um 12:30 Uhr wieder heruntergefahren und die Temperatur der Bäder 1 und 2 weiter erhöht, sodass in beiden Bädern um 16:00 Uhr eine Temperatur von über 60°C erreicht wurde. Danach ist die Ölheizung heruntergefahren worden, um eine zu starke Erwärmung zu vermeiden. Die Wolle zeigte auch gegen Ende des Waschgangs am 02.07.24 eine helle Färbung.

4.5 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Die Abwasserproben wurden auf verschiedene Parameter durch das Labor JenaBios untersucht. Neben dem Trockensubstanzgehalt und dem organischen Trockensubstanzgehalt wurde an 28 Proben der Fettanteil bzw. Lanolin-Anteil (schwerflüchtige lipophile Stoffe) untersucht. Daneben wurde eine Probe auf Salmonellen und 4 Proben auf die Nährstoffe N_{ges} , NH_4-N , P, K, C/N-Verhältnis, Mg, S, CaO, sowie die Schwermetalle Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Ti und As untersucht. An zwei Proben aus dem ersten und zweiten Bad wurde zudem eine Biogasertragsanalyse durchgeführt.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchung des Abwassers der Wollwäsche hinsichtlich TS-Gehalt, organischen TS-Gehalt, Fettanteil und Salmonellen sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt:

Tabelle 3 Ergebnisse der Laboruntersuchung 1 Abwasser Wollwäsche

Probenahme/Datum/Uhrzeit	Trocken- substanzgehalt	Organischer Trocken- substanzgehalt	Schwer flüchtige lipophile Stoffe	Salmonellen
	[% OS]	[% OS]	[mg/l]	[in 100 ml]
Bad 1, 27.06.24	3,22	1,71	10.000	-
Bad 1, 01.07.24, 15:30	1,89	1,00	3.900	-
Bad 1, 02.07.24, 8:30	1,52	0,809	2.800	-
Bad 1, 02.07.24, 14:00	1,78	0,993	3.200	-
Bad 1, 02.07.24, 16:45	2,21	0,99	4.300	-
Bad 2, 27.06.24	0,531	0,334	1.300	-
Bad 2, 01.07.24, 15:30	0,690	0,493	2.300	-
Bad 2, 02.07.24, 8:30	0,647	0,460	2.500	-
Bad 2, 02.07.24, 14:11	0,548	0,383	700	-
Bad 2, 02.07.24, 16:45	0,859	0,243	1.400	-
Bad 3, 27.06.24	0,323	0,204	710	-
Bad 3, 01.07.24, 13:00	0,277	0,182	630	-
Bad 3, 01.07.24, 15:35	0,349	0,101	320	-
Bad 3, 02.07.24, 8:30	0,256	0,173	630	-
Bad 3, 02.07.24, 14:11	0,272	0,171	210	-
Bad 3, 02.07.24, 16:45	0,290	0,185	340	nicht nachgewiesen
Bad 4, 27.06.24	0,549	0,347	26	-
Bad 4, 01.07.24, 13:00	0,329	0,102	19	-
Bad 4, 01.07.24, 15:35	0,247	0,0909	12	-
Bad 4, 02.07.24, 8:30	0,214	0,0791	14	-
Bad 4, 02.07.24, 8:30 Reinwasser	0,030	<0,030	28	-
Bad 4, 02.07.24, 10:50	0,169	0,069	31	-
Bad 4, 02.07.24, 10:50	0,157	0,0627	51	-
Bad 4, 02.07.24, 14:11	0,183	0,0775	26	-
Bad 4, 02.07.24, 14:11 Reinwasser	0,292	0,0946	33	-

Bad 4, 02.07.24, 16:45	0,183	0,109	22	-
Abwasser, 27.06.24	1,38	0,802	2.100	-
Abwasser, 01.07.24, 15:30	2,33	1,28	3.000	-
	Trockensubstanz	Organische Substanz	Organische Substanz	Extrahierbare lipophile Stoffe
	[% OS]	[% OS]	[% TS]	[% OS]
Abwasserschläm, 01.07.24, 15:30	20,7	9,27	44,8	-

Grundsätzlich wird aus den Ergebnissen der Beprobung des TS-Gehaltes sowie der schwerflüchtigen lipophilen Stoffe deutlich, dass die Konzentration des Feststoffanteils und auch der Fettanteil von Bad zu Bad stark abnehmen. Im ersten Bad wurden Trockensubstanzgehalte von zwischen 1,5 % und 3,2 % erreicht. Damit ist das Abwasser aus dem ersten Bad noch etwas trockensubstanzärmer als Schweinegülle mit durchschnittlich 5 % TS als gängiges trockensubstanzärmstes Biogas-substrat. Der organische Trockensubstanzgehalt bewegt sich zwischen 50 % und 60 %. Der Fettgehalt des Abwassers ist mit zwischen 3 und 10 g/l in den Probenergebnissen sehr hoch und würde sich sehr gut für eine Vergärung in der Biogasanlage eignen.

Mit zwischen 0,5 % und 0,7 % Trockensubstanzgehalt im zweiten Bad ist die Trockensubstanz um den Faktor 3 bis 4 niedriger als im ersten Bad. Der Fettgehalt ist mit 0,7 bis 2,5 g/l ebenfalls um den Faktor 4 niedriger als im ersten Bad. Der Anteil der organischen Substanz ist mit zwischen 60 % und 70 % etwas höher als im ersten Bad.

Die Proben des dritten Bades weisen gegenüber dem zweiten Bad mit 0,25 % bis 0,32 % einen um den Faktor 2 bis 3 niedrigeren Trockensubstanzgehalt auf. Der Anteil der organischen Substanz an der Trockensubstanz liegt im Bad 2 ebenfalls zwischen 60 % und 70 %. Zudem wurde eine Probe aus dem dritten Bad nach 8 Stunden Betrieb der Wollwäsche auf Salmonellen untersucht, wobei kein Nachweis erfolgt ist. Der Anteil schwer flüchtiger lipophiler Stoffe schwankt in den Probenergebnissen zwischen 0,2 und 0,7 g/l, ist in Bad 3 aber deutlich niedriger als in Bad 2.

Die Proben aus dem vierten Bad der Wollwäsche weisen eine heterogene Zusammensetzung gegenüber Proben aus den anderen Bädern auf. Der Trockensubstanzgehalt schwankt zwischen 0,15 % und 0,5 %. Der Anteil der organischen Substanz liegt im Durchschnitt in Bad 4 überraschend nur zwischen 30 % und 40%. Der Anteil schwer lipophiler Stoffe ist mit 0,01 bis 0,05 g/l sehr gering und beträgt durchschnittlich nur ca. 10 % gegenüber Bad 3.

Die TS-Gehalte sowie die lipophilen Anteile im ersten Bad der Wollwäsche ähneln den Werten, welche bereits im Jahr 1999 durch die Flottweg GmbH sowie im Jahr 2000 durch die MAB Anlagenbau Austria bestimmt wurden. Nach den damals wie heute im Labor gemessenen Bestandteilen des Wollwaschwassers ist davon auszugehen, dass im ersten Bad ein TS-Gehalt in Abhängigkeit der bereits gewaschenen Wolle von 2-3 % erreicht wird sowie ein Fettgehalt von mindestens 3 g/l.

Das Verhältnis der Konzentration der ausgewaschenen organischen Bestandteile und der schwer flüchtigen lipophilen Stoffe im Abwasser der verschiedenen Bäder war an den Probetagen unterschiedlich. Die Probe vom 27.06.24 weist in Bad 1 eine hohe Konzentration an Feststoffen und Fetten auf. Dagegen ist die Konzentration im zweiten Bad eher niedrig im Vergleich zu den Konzentrationen am 01.07.24 und 02.07.24 im zweiten Bad.

Grundsätzlich kann die Konzentration der einzelnen Bäder dadurch gesteuert werden, dass die Frischwasserzufuhr erhöht oder verringert wird. Um eine möglichst hohe Konzentration an organischen und gleichzeitig anorganischen Bestandteilen zu erreichen, ist die Zufuhr von wenig Frischwasser sinnvoll. Dadurch verringert sich allerdings der Reinigungseffekt der Wolle im ersten Bad und die Verschleppung von Verunreinigungen in den nachfolgenden Bädern steigt. Eine

Trennung der Feststoffe von der Flüssigphase ist grundsätzlich mittels verschiedener Filter und Zentrifugen möglich. Allerdings sind diese in der Wollwäsche im Ötztal außer Betrieb genommen, da die Emulsion aus Wasser, Schlamm und Fett die Filteranlagen zusetzt.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchung des Abwassers aus der Wollwäsche hinsichtlich Schwermetallgehalten, PFT und Dioxinen und weiterer Schadstoffe sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Es wurde die Probe des dritten Bades vom 01.07.24 um 15:35 Uhr verwendet, da in diesem Bad durch den Einsatz der Waschmittel mit hohem Emulgiervermögen auch schwer lösliche Substanzen aus der Wolle gelöst und in das Waschwasser übertragen werden.

Tabelle 4 Ergebnisse der Laboruntersuchung 2 Abwasser Wollwäsche

Parameter	Einheit	Ergebnis	Ergebnis	Grenzwerte nach DüV	Eintragsfrachten nach BBodSchV Anlage 1 Tab. 3
			[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[g/ha*a]
Arsen	mg/l	0,010	2,9	40	35,0
Blei	mg/l	0,024	6,9	150	200
Cadmium	mg/l	0,00020	0,06	1,5	5
Chrom	mg/l	0,012	3,4	2 (Cr ^{VI})	150
Quecksilber	mg/l	0,00050	0,14	1,0	300
Kupfer	mg/l	0,079	22,6 0,0023 %TM	Kennzeichnung ab 0,05 % TM	75
Nickel	mg/l	0,0073	2,1	80	1
Thallium	mg/l	<0,000005	0,0014	1,0	1,5
Zink	mg/l	0,69	197,7 0,0198 % TM	Kennzeichnung ab 0,1 % TM; knapp unter der Schwelle zur Kennzeichnungspflicht	1200
Perfluorierte Tenside (PFT)	µg/l	<0,02	0,0057	0,1	-
Summe der Dioxine und dl-PCB (WHO-TEQ 2005)	pg/l	In Summe zwischen 0 und 100	<0,1 ng/l	8 bzw. 30 (8 ng/l bei Anwendung auf Grünland zur Futtergewinnung und auf Ackerfutterflächen mit nichtwendender Bodenbearbeitung nach der Aufbringung, ausgenommen Maisanbauflächen); gilt nicht für Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft und Gärreste ohne Bioabfallanteil	-

Aus Sicht des Schwermetallgehaltes ist der Einsatz des Abwassers sowohl in der Biogasanlage sowie als Düngemittel direkt in der Landwirtschaft möglich, da sowohl die Grenzwerte der Düngemittelverordnung (DüV) als auch die jährlich zulässigen Eintragsfrachten auch hinsichtlich der Grenzwerte nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) deutlich oberhalb der im Abwasser gelösten Konzentrationen liegen. Eine Ausnahme bildet der Grenzwert der Düngemittelverordnung für Chrom, welcher leicht überschritten wird. Hier wäre eine zweite und dritte Probe im Labor zu untersuchen, um den Wert zu validieren. Sollte der Grenzwert weiterhin überschritten werden, ist ggf. ein Chrom bindendes Additiv zuzumischen.

Auch die ermittelten Probenwerte der Perfluorierten Tenside sowie der Dioxine sind deutlich unter den Grenzwerten der Düngeverordnung, sodass hier keine Restriktionen zum Einsatz des Abwassers in der Landwirtschaft entstehen.

Das Nährstoffpotenzial der Abwässer der einzelnen Bäder hinsichtlich des Nährstoffpotenzials bei einem Einsatz in der Landwirtschaft wurde anhand der Proben vom 02.07.24 um 16:45 Uhr untersucht. Wertgebende Bestandteile sind dabei vor allem Stickstoff, Phosphor und Kalium. Daneben wurden an einer Probe auch der Anteil an Calcium, Magnesium und Schwefel untersucht. Die Probenergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 5 Ergebnisse der Laboruntersuchung 3 Abwasser Wollwäsche

Parameter	Einheit	Bad 1	Bad 2	Bad 3	Bad 4
TS	% OS	2,21	0,859	0,349	0,183
oTS	% OS	0,99	0,243	0,101	0,109
Gesamtstickstoff	mg/l	252	175	85,1	8,15
Ammoniumstickstoff	mg/l	-		46	
Phosphor	mg/l	32	26	18	1,7
Kalium	mg/l	3600	900	470	510
Calcium	mg/l	-	-	12	
Magnesium	mg/l	-	-	4,0	
Schwefel	mg/l	-	-	14	

Der Gesamtstickstoffgehalt im Abwasser der Wollwäsche ist mit 252 mg/l im ersten Bad nach einem ganzen Tag Betrieb der Wollwäsche im Vergleich zu Gärrest ca. 5-7 kg Stickstoff/m³ sehr niedrig und entspricht ca. 0,25 kg/m³. Der Gehalt an elementarem Phosphor ist mit 32 mg/l (0,032 kg/m³) im ersten Bad ebenfalls sehr niedrig im Vergleich zu Gärrest mit 0,3-0,5 kg/m³ und kann in Bezug auf die Düngewirkung vernachlässigt werden. Der Gehalt an Kalium ist mit 3.600 mg/l (3,6 kg/m³) auf einem etwas niedrigeren Niveau als Gärrest mit 5-8 kg/m³. Hier ist allerdings eine relevante Düngewirkung des Abwassers vorhanden. Die Gehalte an Calcium mit 12 mg/l (0,012 kg/m³), Magnesium mit 4 mg/l (0,004 kg/m³) und Schwefel mit 14 mg/l (0,014 kg/m³) sind auch bei einer 6-7 fachen Menge im Vergleich der TS-Gehalte von Bad 3 zu Bad 1 auf den Düngewert bezogen zu vernachlässigen gegenüber Düngewerten im Gärrest mit 0,4-0,7 kg Calcium/t, 0,25-5 kg Magnesium/t und 0,35-0,6 kg Schwefel/t. In Summe enthält das Abwasser kaum wertgebende Nährstoffe gegenüber konventionellen Wirtschaftsdüngern, welche bei einer Nutzung in der Biogasanlage bzw. Landwirtschaft monetär bewertet werden könnten.

Die Probenergebnisse für die Bestimmung des Biogasertrages des Abwassers der Wollwäsche sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 6 Ergebnisse der Laboruntersuchung zu Gasbildungspotenzialen

Parameter	Einheit	Bad 1	Bad 2
Gasbildungspotenzial	NI/kg oTS	431	308
Gasbildungspotenzial	m ³ /t FS	5,2	1,9
Gasbildungspotenzial	NI/kg TS	238	221

Das Gasbildungspotenzial entspricht etwa dem von Schweinegülle mit 1,5 % Trockensubstanzgehalt. Wird als Annahme für den Methangehalt ein Mittelwert zwischen Fettabscheiderfett (68 %) und Schafmist (55 %) mit 63 % herangezogen, ergibt sich ein Methanertrag von 3,28 m³ Methan je m³ Abwasser. Damit ist das Abwasser für die konventionelle Vergärung in einer mit landwirtschaftlichen Produkten und Nebenprodukten betriebenen Biogasanlage kaum attraktiv, da hohe Kosten für Lagerkapazität einem vergleichsweise geringen Gasertrag gegenüberstehen. Eine Verwertung erscheint nur dann als sinnvoll, wenn der Anlage aus prozesstechnischer Sicht eine Flüssigphase zugemischt werden muss, um die Rührfähigkeit zu gewährleisten bzw. den TS-Gehalt zu verringern.

und einzustellen. Da viele Biogasanlagen in Thüringen mit einem größeren Gülleanteil betrieben werden und über genügend Flüssigphase verfügen ist der Einsatz aus wirtschaftlicher Sicht eher fraglich. Besonders sinnvoll erscheint der Einsatz des Abwassers in Abfallbiogasanlagen, da diese in der Regel nicht über sehr TS-arme Substrate verfügen und zudem der Einsatz aus genehmigungsrechtlicher Sicht einfacher möglich sein sollte. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, den TS-Gehalt zu erhöhen durch z. B. durch mechanische Verfahren wie eine Zentrifuge oder Filter sowie chemische Verfahren wie das Eindampfen des Abwassers. Allerdings benötigt bereits die Wollwäsche eine hohe Energiemenge zur Beheizung der Becken und Trocknung der Wolle, sodass ein weiterer großer Energieverbraucher ggf. nicht wirtschaftlich sinnvoll mit Wärme versorgt werden kann.

Zudem wird deutlich, dass der Anteil anorganischer Verbindungen mit zwischen 40 % und 50 % in Bad 1 sehr hoch ist gegenüber konventionellen Biogassubstraten. Sowohl Schweinegülle mit durchschnittlich 75 % als auch Rindergülle mit durchschnittlich 80 % weisen einen höheren Anteil organischer Verbindungen auf. In der Biogasanlage eingesetzte nachwachsende Rohstoffe haben in der Regel einen organischen Trockensubstanzgehalt von über 90 %. Neben dem geringeren Gasertrag je Kubikmeter vorhandenem, gasdichten Behältervolumen und einer damit verringerten wirtschaftlichen Effizienz gegenüber allen Substraten, die keine Kosten verursachen, führt der Einsatz des Wollwaschwassers zu einem vermehrten Eintrag von anorganischen Verbindungen. Diese setzen sich in den meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen als Sandschichten am Behälterboden ab und führen bei kontinuierlichem Betrieb neben einem sich stetig verringernenden aktiven Gärvolumen zur Versandung der Behälterheizung und ggf. zur verstärkten Abnutzung der Rührwerke. Ausnahmen bilden Pfropfenstromfermenter, welche allerdings mit deutlich höheren Trockensubstanzgehalten betrieben werden, und Biogasanlagen mit Umwälzsystemen mittels Beregnungsdüsen. Eine Versandung des Behälters kann durch eine regelmäßige Öffnung und Entleerung des Behälters verhindert werden. Allerdings führt die Entleerung des Behälters neben dem Betriebsausfall des Gärvolumens und einer verringerten Effektivität der Biogasanlage zu nach der Behältergröße gestaffelten Wartungskosten, die häufig im fünfstelligen Bereich liegen.

4.6 Schlussfolgerungen bezogen auf die Wollwäsche

Für den Betreiber einer Biogasanlage scheint der Einsatz des Wollwaschwassers neben einem geringen Biogasertrag, bei direktem Einsatz in der Biogasanlage ohne vorherige Entwässerung, eine Menge an Risiken hinsichtlich der erzielbaren Erträge aus der Stromeinspeisung sowie technische Hürden bei der Lagerung der Gärreste hervorzurufen.

Für das Wollwaschwasser selbst wäre aber der Einsatz in einer Biogasanlage eine sinnvolle Verwendung im Sinne einer Verwertung der Inhaltsstoffe und zur Vermeidung von hohen Abwasserentsorgungsgebühren. Um einen Betreiber zu finden, welcher trotz der oben beschriebenen Widrigkeiten bereit ist, das Abwasser in der Biogasanlage einzusetzen, sollte ein Anreiz geschaffen werden, der sich finanziell für den Biogasanlagenbetreiber lohnt und über eine längere Betriebsdauer garantiert wird. Eine Möglichkeit ist die garantierte Wärmeabnahme und Vergütung zu einem Preis leicht unter Marktbedingungen anderer für die Wollwäsche verfügbarer Wärmeoptionen. Eine weitere Möglichkeit ist die Bezahlung des Biogasanlagenbetreibers für die Abnahme des Abwassers ähnlich einer Abwasserentsorgungsgebühr. Dadurch kann die Lücke zu anderen kostenlos zur Verfügung stehenden Substraten z.B. Gülle hinsichtlich des Gasertrags je eingesetztem Kubikmeter Substrat und der damit erzeugbaren Strom- und Wärmemenge verringert werden, sodass die Attraktivität des Einsatzes der Wollwaschabwässer in der Biogasanlage steigt. Als zusätzlicher finanzieller Anreiz kann die Nutzung einer leeren Lagerhalle/Fläche des Biogasanlagenbetreibers für die Wollwaschanlage mit Entrichtung einer geringen Miete oder Pacht

die Attraktivität der Abnahme des Wollwaschabwassers steigern, da viele landwirtschaftliche Betriebe über leerstehende Hallen verfügen und diese einer Nutzung zuführen wollen.

Neben den finanziellen Anreizen sollten dem Betreiber für dessen Klärungsbedarf mit Behörden und Netzbetreiber ausreichend Informationen zur Zusammensetzung des Abwassers und der technischen Ausgestaltung der Wollwäsche zur Verfügung gestellt werden.

5 Untersuchungen an einer Anlage zum Bastfaser-Nassaufschluss für Industriehanf mit Anbindung an eine Biogasanlage

5.1 Grundlagen

Grundlegendes agrarisches Ziel des Anbaus von Industriehanf ist neben der Gewinnung von Samen für die Vermehrung oder/und die Gewinnung von Hanföl, der Ernte von Blütenständen für die Gewinnung von CBD vor allem die Beerntung und der nachfolgende Aufschluss der Bastfasern (aus der Hülle der Pflanzenstängel) für verschiedene Zwecke der Textilindustrie. Diesen Zielen ordnen sich die jeweiligen Bedingungen für Anbau (Sortenwahl, Aussaatdichte) und Ernte (Erntezeitpunkt, Behandlung der geernteten Pflanzenbestandteile, Erntetechnologie) der Bastfaserpflanzen unter. Dabei ist auch bekannt, dass entsprechend der unterschiedlichen Bedingungen für Ernte und Anbau auch unterschiedliche Voraussetzungen für einen textilen Bastfaseraufschluss (Art, Menge und Qualität der Fasern) zu erwarten sind. Demzufolge werden von den Projektpartnern unterschiedliche Faseraufschlussverfahren mit unterschiedlichen Zielstellungen angewendet.

Der Projektpartner LAWO belässt z.B. die Bastfaserpflanzenstängel nach der Ernte der Samen zur Feldröste auf den Anbauflächen. Das ist der traditionelle Weg zum Aufschluss von Bastfasern. Wegen des durch die Kombinationsernte (gleichzeitig Gewinnung von Samen) erforderlichen späten Erntezeitpunktes im Jahr ist es in der Regel nicht möglich, das feldgeröstete Hanfstängelstroh nach der Röste mit der erforderlichen niedrigen Lagerfeuchte zu ballieren und einzubringen. Deshalb verbleibt das geröstete Material über den Winter auf den Flächen und wird erst im Frühjahr nach Trocknung eingebracht. Das ist regelmäßig mit einer mehr oder weniger starken Verpilzung des Röstgutes und größeren Differenzen hinsichtlich der Qualität des gerösteten Fasermaterials verbunden. Ein sich daran anschließender mechanischer Aufschluss mittels einer Aufschlussanlage mit Hammermühlentechnologie bei der VOFA GmbH erzeugt weitgehend von Schäben gereinigte Hanffasern, die direkt für verschiedene Zwecke einsetzbar sind. Der Einsatz für textile Zwecke zur Gewinnung verspinnbarer Fasern ist dabei bisher nicht möglich.

Demgegenüber verfolgt FHm das Ziel, die Bastfasern mittels einer zum Patent angemeldeten Erntetechnologie¹ im ungerösteten Zustand bei einer ersten Feldoperation zu entholzen und die Fasern dann einem anschließenden Nassprozess zum weiteren textilen Aufschluss zu unterziehen. Diese Verfahrensweise hat den Vorteil, dass die Anbauflächen recht schnell wieder zur Verfügung stehen und die Risiken eines Aufschlusses der Fasern durch Feldröste (Wetterabhängigkeit des Rösteprozesses über längere Zeiträume, Gleichmäßigkeit des Röstergebnisses) vermieden werden können.

Als Nassaufschlussverfahren kommen biologisch-enzymatische, physikalische und/oder chemische Verfahren infrage. Es existiert eine große Zahl bekannter, teilweise patentierter Verfahren zur Wasserröste von Bastpflanzenfasern, die historisch angewendet wurden und in den letzten Jahren bekannt wurden. Im Rahmen des Projektes hat FHm sich für die Anwendung einer anaeroben biologisch-enzymatischen Degummierung unter Verwendung ubiquitärer Bakterien und alternativ einen nasschemischen Aufschluss durch einen professionellen Faserverarbeiter entschieden.

¹ DE 10 2023 206 776 A1 – „Verfahren zur Gewinnung von Pflanzenfasern und Schäben aus Bastfaserpflanzen sowie Bastpflanzenfasern und Schäben gewonnen durch ein derartiges Verfahren“

Nachfolgende Darstellung gibt eine Übersicht über die üblichen Verfahrenszüge zur Gewinnung aufgeschlossener Bastfasern für textile Verwendung.

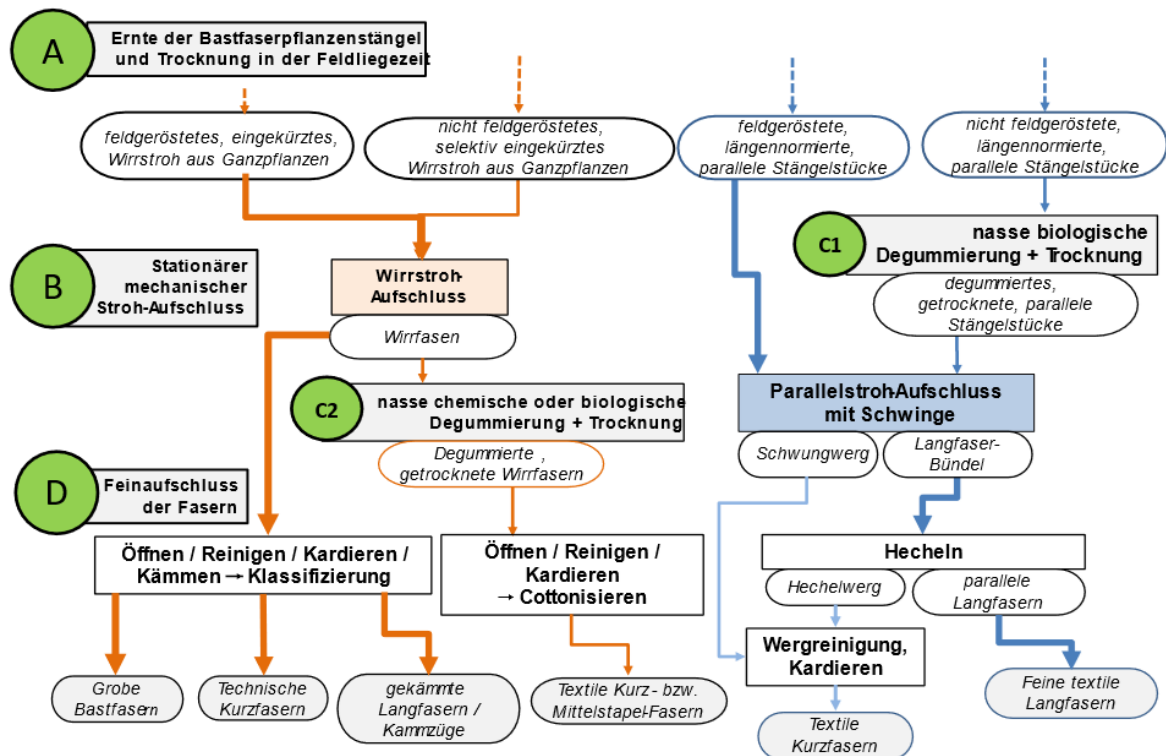


Abbildung 6 Etablierte Verfahrensstufen zur Gewinnung textiler Bastfasern

Mit Bezug auf die Kopplung des Faseraufschlusses mit Biogasanlagen wird deshalb in diesem Bericht schwerpunktmäßig auf den Aufschlussprozess Bezug genommen, wie er von FHM im Rahmen dieses Projektes untersucht worden ist. Nach bisherigen Erfahrungen strebt die FHM vor dem Hintergrund des Aufschlusses der Fasern in textiler Qualität eine Ernte der Hanfkulturen nach einer Vegetationszeit von ca. 90-100 Tagen an. Das ist je nach Verlauf der Vegetationsperiode der Zeitpunkt an dem die Hanfpflanze nach der Blüte mit der Ausprägung der Fruchtstände beginnt. Auf sorten- und anbauabhängige Besonderheiten wird hier nicht eingegangen. Zu diesem Zeitpunkt ist das Längenwachstum der Pflanze im Wesentlichen beendet und die Bildung von Fasergewebe in der Bastpflanzenhülle so weit fortgeschritten, dass eine wirtschaftlich attraktive Menge an Fasern aus dem Faserbast isoliert werden kann. Gleichzeitig kommt es ab diesem Zeitpunkt auch zu einer vermehrten Bildung von Hemicellulose in den Zellwänden der cellulosischen Pflanzenfasern, dessen Anteil aus der Sicht der Flexibilität der zu gewinnenden qualitativ hochwertigen textilen Fasern möglichst gering sein sollte und im Folgeprozess dann auch nicht entfernt werden müsste.

Bezüglich der Verwertung von Nebenprodukten aus dem Pflanzenanbau und der biologisch-enzymatischen Degummierung von Industriehanf mit dem Ziel eines textilen Faseraufschlusses an der Schnittstelle zu einer Biogasanlage müssen zwei grundsätzliche Stoffklassen untersucht und bewertet werden:

- Stängelspitzen aus dem Ernteprozess als anteiliges Ernteprodukt
- Abwässer aus einer biologisch-enzymatischen Röste (Wasserröste/Reaktorröste)

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf Untersuchungen im Zusammenhang mit der energetischen Verwertung von Restmaterialien in Biogasanlagen aus Anbau und Ernte mit der von FHM angewendeten Erntetechnologie. Hinsichtlich der technisch-rechtlichen Möglichkeiten des Einsatzes von Abwässern aus einer enzymatischen Nassdegummierung in einer Biogasanlage, der Folgen auf die Vergütung der Biogasanlage und auf die Nutzung der Gärreste aus der Biogasanlage

als Düngemittel bei Einsatz dieser Abwässern wird auf die Ausführungen in den Kapiteln 3.1 bis 3.4 verwiesen, die sinngemäß auch für Anlagen zur Nassdegummierung von Faserbast zutreffen.

5.2 Verwertung von Stängelspitzenmaterial

5.2.1 Gewinnung/Ernte

Bei der Ernte der Hanfpflanzen mit einem speziell modifizierten Feldhäcksler werden die Stängelspitzen der Hanfpflanzen und die verbleibenden Basisstängel in einem Arbeitsgang durch kombinierte Schneidsysteme von der stehenden Pflanze abgetrennt und in getrennten Schwaden auf dem Feld abgelegt. Bedingt durch die Erntetechnologie liegen im Ergebnis Stängelspitzen mit noch enthaltenen holzigen Bestandteilen (gebrochen, sog. „Pflanzenspitzenstroh“) und die in Stücke geteilte Bastfaserhülle der Stängel vor, wobei der holzige Innenkern der Stängel (ohne Spitzenanteil) bereits weitgehend von den Bastfasern getrennt wurde. Das Stängelspitzenmaterial kann in einer Grundstufe nach einem Häckselvorgang auf den Ackerflächen als organischer Dünger, ähnlich Getreide-, Raps- oder Maisstroh, verbleiben. Die Stängelspitzen werden dabei bei der Bodenbearbeitung für die anschließende Acker- oder Zwischenfrucht in den Boden mit eingearbeitet und sind dann für eine weitere Nutzung nicht mehr verfügbar.



Abbildung 7 Erntesituation Stängelspitzen und Hanfstroh/Hanfbast

Alternativ können nicht nur die Basisstängel, sondern auch die Stängelspitzen nach einer unmittelbar anschließenden Feldtrocknung auf jeweils unter 18 % Restfeuchte (Restfeuchte als Kriterium der Lagerfähigkeit) getrennt balliert und eingelagert werden.

Neben der o.a. direkten Einarbeitung der organischen Reststoffe bei der Bodenbearbeitung bietet sich auch eine Nutzung des Stängelspitzenmaterials als Einsatzmaterial in einer Biogasanlage an, da sie sich grundsätzlich für eine Vergärung in einer Biogasanlage eignen sollten. Allerdings gibt es bis jetzt keine bekannten Versuche zum Einsatz von Hanfblütenständen und/oder Hanffruchtständen in Biogasanlagen. Hanfstängelspitzen sind von ihrer Struktur her ähnlich dem Landschaftspflegegras, welches im Vergleich zu Grassilage oder Frischgras einen hohen Anteil an Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufweist und damit Ähnlichkeiten zu Stroh zeigt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt Hanfstängelspitzenmaterial im Zustand nach Ernte, Trocknung und Zwischenlagerung.



Abbildung 8 Stängelspitzenmaterial nach der Ernte

Durch die Nutzung der als Koppelprodukt anfallenden Stängelspitzen kann ein Teil der Kosten für den Anbau des Stängelhanfes durch die Stängelspitzen als Einsatzstoff in einer Biogasanlage kompensiert werden, da die Stängelspitzen andere Substrate in einer Biogasanlage ersetzen, welche für den Einsatz extra angebaut werden. Daraus ergibt sich ein wirtschaftlicher Vorteil in der Verwertung der angebauten Hanfkulturen.

Die Vergärung von Biomasse aus einer reinen Hanfkultur wurde bisher nur wenig untersucht. Hanf-Mischungen mit Blühpflanzen wie der „Veitshöchheimer Hanfmix“ wurden dagegen über längere Jahre entwickelt, um die Biomasseproduktion mit einer insektenfreundlichen Anbaukultur zu verbinden. Die Silierung der Wildpflanzenmischungen sowie der nachfolgende Einsatz in einer Biogasanlage erfolgten dafür bisher problemlos. Der Biogasertrag aus der Vergärung der Veitshöchheimer Hanfmischung liegt bei ca. 35-45 % gegenüber dem Ertrag aus der Vergärung von Silomais.

5.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen zu Stängelspitzenmaterial

Vor einem Einsatz des Stängelspitzenmaterials aus dem Anbau von Industriehanf für die energetische Verwertung in Biogasanlagen und hinsichtlich einer Vergütungsfähigkeit nach dem EEG zur Vergärung in einer Biogasanlage sind verschiedene gesetzliche Rahmenbedingungen zu beachten.

So ist das Stängelspitzenmaterial weder in der Positivliste für nachwachsende Rohstoffe oder pflanzliche Nebenprodukte im EEG 2009 noch in den Einsatzstoffvergütungsklassen I und II des EEG 2012 explizit aufgeführt. Am zutreffendsten lässt sich das Spitzenmaterial dem Punkt 4 der Positivliste im EEG 2009 zuordnen, wo „Stroh als Grüngut, Trockengut und Silage“ aufgeführt ist. Nach der Systematik dieses Unterpunktes passt neben „Kartoffelkraut“ und „Rübenblätter“ auch der „Stängelrest“ der Hanffaser zum Reststoffcharakter der aufgeführten Substrate. Allerdings ist die Einordnung des Materials in die Positivliste des EEG 2009 vor Einsatz des Materials in der Biogasanlage mit dem zuständigen Netzbetreiber zu klären. Im EEG 2012 kann das Stängelspitzenmaterial wahrscheinlich in Einsatzstoffklasse I unter Punkt 19 („Für sonstige Pflanzen oder Pflanzenbestandteile zur Biogaserzeugung, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben anfallen und die keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in der Biogasanlage erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden (nachwachsende Rohstoffe), ist folgender Energieertrag „E I“ zu verwenden: 50 m³ pro Tonne Frischmasse.“) eingeordnet werden. Ggf. kann auch Punkt 16 in Einsatzstoffvergütungsklasse II („Stroh. Als Stroh gilt das halmgutartige Nebenernteprodukt von Getreide, Ölsaaten oder Körnerleguminosen, wenn das Hauptprodukt (Korn) nicht energetisch genutzt wird und das halmgutartige Nebenernteprodukt vom Korn separiert vorliegt.“) herangezogen werden, allerdings werden Faserpflanzen hier nicht separat erwähnt. Auch für eine Einordnung der Hanfstängelspitzen in die Einsatzstoffvergütungsklassen des EEG 2012

sind vor einem Einsatz des Materials in der Biogasanlage unbedingt Absprachen mit dem Netzbetreiber notwendig.

Zusätzlich ist mit der Genehmigungsbehörde für den Biogasanlagenstandort zu sprechen. Da die Hanfstängelspitzen nicht in der Genehmigung der Einsatzstoffe aufgeführt sind, muss die örtliche Genehmigungsbehörde dem Einsatz vorher zustimmen. Die Zustimmung erscheint aber als unkritisch, da es sich bei dem Material um einen landwirtschaftlichen Reststoff handelt, welcher nicht weiter behandelt oder bearbeitet worden ist, ähnlich Getreide- oder Maisstroh. Zudem ist die Einsatzstoffmenge voraussichtlich sehr gering und beträgt weniger als 100 t/a.

Neben den Fragen der Vergütungsfähigkeit des Stromes nach dem EEG und der Genehmigung des Einsatzes in der Biogasanlage sind weitere Fragen vor einen Einsatz in der Biogasanlage zu diskutieren. Grundsätzlich scheint ein Einsatz des Materials aus biologischer Sicht möglich zu sein. Das legen verschiedene Forschungsvorhaben und die Entwicklung des „Veitshöchheimer Hanfmix“ als Maisersatzsubstrat für Biogasanlagen durch die Bayerische Landanstalt für Weinbau und Gartenbau nahe. Diese Mischung aus mehrjährigen und einjährigen Arten, welche vom Faserhanf dominiert wird, setzt gezielt auf die Substitution von Maissilage als Biogassubstrat. Silierversuche der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) in Bayern haben in der Vergangenheit zudem gute Siliereigenschaften von Wildpflanzenmischungen in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt gezeigt. Eine Einsilierung ist voraussichtlich nur zusammen mit einem anderen Biogassubstrat sinnvoll, da die Menge an Stängelspitzenmaterial aufgrund der voraussichtlich auch in den kommenden Jahren zu geringen verwertungszentrierten Anbaufläche von Industriedhanf zur Fasergewinnung nicht ausreicht, um ganze Silolager nur mit dem Stängelspitzenmaterial zu füllen. Aufgrund des Erntezeitpunktes des Faserhanfes Mitte bis Ende August ist die Silierung mit Getreideganzpflanzensilage (Ernte im Juni/Juli) und Maissilage (Ende September/August) kaum möglich. Eine Silierung mit Grassilage scheint dagegen je nach Schnittzeitpunkt möglich zu sein.

Hanfstängelspitzen, welche bei der Ernte 2024 am Standort der FHm in Littdorf/ Roßwein in Sachsen angefallen sind, wurden durch das Labor der JenaBios GmbH auf deren Trockensubstanzgehalt, organischen Trockensubstanzgehalt, pH-Wert, Gasbildungspotenzial und Methangehalt untersucht.

Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 7 Ergebnisse der Laboruntersuchung von Hanfstängelspitzen

Parameter	Einheit	Wert
Trockensubstanz	% OS	64,5
Organische Trockensubstanz	% TS	89,5
pH-Wert	-	8,2
Gasbildungspotenzial	NI/kg oTS	343
Gasbildungspotenzial	NI/kg TS	307
Methangehalt	%	57

Der Trockensubstanzgehalt der Hanfstängelspitzen ist sehr hoch im Vergleich zu gängigen anderen Biogassubstraten zum optimalen Erntezeitpunkt wie Maissilage, Ganzpflanzen- oder Grassilage mit 30-35 % oder Stallmist mit durchschnittlich 25 %. Auch der mittlere Trockensubstanzgehalt von Landschaftsgras mit 50 % liegt noch deutlich unter dem im Labor ermittelten Wert. Heu hat mit 83,9 % einen etwas höheren Wert als der im Labor bestimmte Wert von 64,5 % für die Hanfstängelspitzen. Allerdings ist Heu nur bedingt für die Vergärung in Biogasanlagen geeignet, da das Material sehr stark zur Schwimmschichtenbildung neigt und zudem eine sehr geringe Lagerungsdichte auf-

weist. Zudem ist der Preis je Kubikmeter Biogasvolumen hoch. Der organische Anteil der Stängelspitzen bewegt sich im üblichen Bereich für Substrate auf Basis von Grünlandflächen. Der TS-Gehalt ist kaum beeinflussbar, da der Hanf in Abhängigkeit der Kriterien für den Faseraufschluss geerntet wird und damit eine gewisse Verholzung des Bastes nicht zu vermeiden ist.

Das Gasbildungspotenzial je Tonne Frischmasse bewegt sich etwa auf dem Niveau von Grassilage und deutlich über dem Gasertrag von Heu oder Stroh (siehe Tabelle 7). Allerdings wurde das Material im Labor vor der Biogasertragsmessung auf unter 10 mm Länge geschnitten und teilweise geschreddert, um eine Befüllung des Laborbehälters zu ermöglichen, welcher einen schmalen Einfüllstutzen aufweist. Sodann sollte eine möglichst große Oberfläche für die Biologie geschaffen werden, um ihr den Abbau der organischen Bestandteile zu erleichtern. Ein Aufschluss des Materials durch einen Schredder oder eine Hammermühle ist zu empfehlen, um den Gasertrag aus den Stängelspitzen durch Vergrößerung der Oberfläche zu erhöhen. Wird das Material in der Praxis mehrere Zentimeter lang gehäckselt, ist ein deutlich niedrigerer Biogasertrag je Tonne Frischmasse zu erwarten, da die Oberfläche des Substrates deutlich kleiner ist und der beim Häckseln freigelegte holzige Anteil des Stängels den biologischen Abbau erschwert.

Die folgende Tabelle listet Gaserträge von gängigen Substraten für Biogasanlagen zum Vergleich auf:

Tabelle 8 Gaserträge von gängigen Substraten für Biogasanlagen

	Trockensubstanz- gehalt [% FM]	Organische TS [% TS]	Biogasertrag [NI/kg oTS]	Biogasertrag [m ³ /t FM]	Methangehalt [%]
Maissilage	35,0	95,0	660,0	219,4	54,0
Grassilage	35,0	90,0	600,0	189,0	53,0
Gras, Landschaftspflege	50,0	85,0	300,0	127,5	50,0
Heu	83,9	92,5	580,0	450,1	50,9
Stroh, kurzgehäckselt	90,0	94,0	450,0	380,7	53,0

Die beschriebenen Hanfstängelspitzen als Restmaterial aus dem Industriehanfanbau sind grundsätzlich für eine energetische Verwertung in einer Biogasanlage geeignet. Vor einem Einsatz muss die Vergütungsfähigkeit mit dem Netzbetreiber und die Einsatzstoffgenehmigung mit der Genehmigungsbehörde abgesprochen werden.

Bei einem durchschnittlichen Ertrag von 6-8 t Hanfstängelmasse (TM) pro ha und dem Anteil von 25-30 % davon an Stängelspitzenmaterial, das als Restmaterial für einen Biogasprozess energetisch verwertet werden könnte, ist mit der durch FHm angestrebten Erntetechnologie für Industriehanf ein Biogasertrag von **307 m³/t TS bzw. 461 m³ bis 737 m³ Biogas/ha** zu erwarten. Mit einem Methangehalt von 57 % ergibt sich ein **Methanpotenzial von 263 m³/ha bis 420 m³/ha**.

Die Untersuchung von Vor- und Nachteilen der Vergärung reiner Hanfbiomasse oder der Stängelspitzen sollte vor dem Einsatz größerer Mengen in einer Bestandsbiogasanlage durch Laborversuche weiter getestet werden, um negative Auswirkungen auf die Biogasanlage und im schlechtesten Fall ein biologisches „Umkippen“ der Biogasanlage zu vermeiden.

Aufgrund der Restholzanteile der Stängelspitzen und der Spezifik der Bastfasern ist unbedingt eine weitere mechanische Aufbereitung des Materials zu bedenken, sofern dieses in einer Biogasanlage in größeren Mengen eingesetzt werden soll. Während der Holzanteil den Aufschlusseffekt negativ

beeinflusst und auch zu Aufschwimmeffekten beitragen kann, ist die Faserstruktur des Substrates als Haupthindernis eines Einsatzes auszumachen. Hanffasern haben eine ausgeprägte Nasszugfestigkeit. Es besteht die akute Gefahr, dass längere Fasern Wickeleffekte an rotierenden Teilen wie Pumpen, Rührwerken und weiteren Baugruppen der Anlage hervorrufen, die zu extrem aufwändig zu behebenden Störungen führen können. Eine sichere Zerkleinerung des Hanfstängelspitzenmaterials aus energetischer und funktioneller Sicht ist also zwingende Voraussetzung für einen Einsatz in einer Biogasanlage. Diese mechanische Zerkleinerung führt zu zusätzlichen Aufwendungen, die dem zu erwartenden Ertrag entgegenstehen.

Zudem ist die Erntemenge am Hanfstängelspitzenmaterial standortbezogen in den nächsten Jahren voraussichtlich so gering, dass eine Lagerung und Vermischung mechanisch zerkleinerten Materials mit anderen Substraten, vorzugsweise Grassilage, oder ein direkter Einsatz mit mechanischer Aufbereitung an der Biogasanlage zweckmäßig erscheint.

5.3 Verwertung von Abwässern aus der enzymatischen Degummierung von Industriehanf

5.3.1 Ausgangssituation / Aufgabenstellung

Der sog. Nassaufschluss (auch Wasserröste) ist als alternatives Aufschlussverfahren für Hanf gegenüber der sog. Feld- oder Tauröste bekannt. Auch bei diesem traditionellen Verfahren besteht die Zielstellung darin, durch die enzymatischen Aktivitäten von ubiquitären Bakterien und Pilzen den Abbau der Pektine, Hemizellulosen und Lignine des Hanfbasts zu bewirken (sog. Degummierung) und die textil verwertbaren Zellulosefasern freizusetzen.

Es ist allgemein bekannt, dass Abwässer aus einer (anaeroben) Wasserröste von Bastfaserpflanzen wasserschädliche Stoffwechselprodukte sind, die die Röstflotte kontaminieren. In historischer Zeit wurden die Stoffwechselprodukte aus der Wasserröste ohne jede Nachbehandlung in Oberflächengewässer eingeleitet. Durch die Kontamination der Vorfluter wurde diese Form des Faseraufschlusses heimischer Bastfaserpflanzen ehemals als eine Hauptursache für Gewässerverschmutzungen verantwortlich gemacht, so dass die Wasserröste in stehenden und/oder fließenden Gewässern oder in Becken im 19. Jahrhundert beginnend, dann aber im 20. Jahrhundert in Mitteleuropa stark eingeschränkt und in Schritten auch vollkommen verboten wurde, obwohl die Ergebnisse der Wasserröste historisch zu guten Faserqualitäten geführt hatten.

Im 20. Jahrhundert wurden auch vor dem Hintergrund der Umweltbelastung Fasern aus heimischen Bastfaserpflanzen durch Baumwolle, später vermehrt durch erdölbasierte Synthefasern ersetzt – ein Prozess der bis heute anhält. Nachdem in den Anfangsjahren des 21. Jahrhunderts die Wasserröste für Bastfaserpflanzen auch in Süd- und Osteuropa nicht mehr angewendet wurde, sind aktuell Anlagen zur Wasserröste in offenen Becken wohl nur noch in Ägypten und der Türkei in Anwendung.

Mit der Aktualisierung des Aufschlusses von Bastfasern rückt der Nassaufschluss als Alternative wieder in den Mittelpunkt der Untersuchungen, weil die dadurch zu gewinnenden Faserqualitäten den Anforderungen an textile Aufbereitung und Verspinnbarkeit deutlich besser entsprechen als rein trocken aufgeschlossene Fasern.

Bei einem enzymatisch basierten Nassaufschluss von Bastpflanzenfasern fällt neben eiweißhaltigen Abbauprodukten durch den Abbau der Pektine in der Reaktionsumgebung ein Prozesswasser mit Anteilen an Essig-, Propion- und Buttersäure sowie weiteren niedrig konzentrierten organischen Säuren an, welche grundsätzlich einer Biogasanlage zur Entsorgung durch die Vergärung zugeführt werden können. Durch die gezielte Verwertung dieser Stoffwechselprodukte in den Prozessen der Biogaserzeugung kann nicht nur das Problem der Entsorgung wassergefährdender Reststoffe aus einer Wasserröste gelöst werden, sondern führt gleichzeitig auch durch deren Nutzung in der Kopplung an einen Biogasprozess zur Gewinnung von Energie zu wirtschaftlichem Mehrwert in Form von Energie.

Im Rahmen des Projektes wurde deshalb untersucht, inwieweit die Kopplung einer enzymatischen Wasseröste zum Feinaufschluss von Bastfasern mit einer Biogasanlage über die Nutzung entstehender Stoffwechselprodukte und Abwässer interagieren kann.

5.3.2 Charakterisierung des Prozesses der enzymatischen Wasserröste

Als Eingangsmaterialien für den Prozess der enzymatischen Wasserröste können sowohl ganze Stängel, gebrochene Stängel mit anhaftender Faserhülle (sog. Stängelstroh) oder auch bereits vom holzigen Kern des Pflanzenstängels isolierte Bastfasern in unterschiedliche Reifestadien eingesetzt werden. Bei Einsatz von Ganzstängeln oder Stängelstroh ergeben sich unterschiedliche Technologien der Nachbearbeitung der gerösteten Fasern und zur Entfernung der Holzanteile. Auch der Energiebedarf für die Trocknung degummierter Fasern mit anhängendem oder noch im Gemisch befindlichen Fasern und Stängelholzanteilen ist erheblich höher als bei der Degummierung von im Vorprozess entholztem Bast. Bisher werden Prozesse der enzymatischen Wasserröste ausschließlich als Batch-Verfahren realisiert.

Für die durch FHm durchgeführten Versuche wurde maschinell isolierter Hanfbast (die faserhaltige Hülle der erntefrischen Pflanzenstängel wurde durch das angewendete Ernteverfahren s.a. Punkt 5.2.1 von den holzigen Bestandteilen getrennt) verwendet.²

Die so gewonnenen Baststreifen wurden in dichter Packung in spezielle Edelstahlkassetten verstaut. Diese Kassetten wurden anschließend in die Röstflotte eingetaucht und einer anaeroben Wasseröste unterzogen. Dazu wurde durch entsprechende technische Mittel eine gleichmäßige Durch- und Umströmung des Bastgemisches mit temperiertem Röstwasser im Temperaturbereich zwischen 25 und 40°C und mit einem 0,5 bis 3-fachen Flottentausch pro Stunde bewirkt. Die am Pflanzenbast anhaftenden ubiquitären Bakterien und Pilze werden in dieser Umgebung aktiviert und verstoffwechseln während dieses Prozesses über Enzyme das faserverbindende Pektin des Pflanzenbasts. Außerdem werden Hemicellulosen und faserverbindendes Lignin abgebaut.

Zur Beschleunigung des Röstprozesses hat es sich als günstig erwiesen, wenn die Röstflotte zu Beginn des Prozesses mit einer vorbereiteten Startkonzentrationen einer biologisch aktiven Röstflüssigkeit dotiert wird. Der Röstvorgang selbst dauert üblicherweise zwischen 48 und 96 Stunden und wird durch verschiedene Parameter beeinflusst.

Je nach Hanfsorte, Reifezustand und Prozessführung schwanken die im Röstprozess anfallenden Konzentrationen an organischen Säuren. Im Laufe des Prozesses erhöhen sich die Konzentrationen in der Röstflotte, was u. a. zu Veränderungen beim pH-Wert und der Leitfähigkeit führt. Der Verlauf des pH-Werts und der Leitfähigkeit der Röstflotte über die Röstdauer führen zu Veränderungen in der Bioaktivität der Röstbakterien und gleichzeitig zu einer Beeinflussung der durch die Wasserröste erreichbaren Faserqualität. Die biologischen/biochemischen Zusammenhänge, v.a. der Einfluss der Anreicherung der Röstflotte mit Abbauprodukten, ihr Einfluss auf die Abbaurate der Pektine und auf die Qualität der finalen Fasern als Leistungskriterium für den enzymatischen Prozess, sind wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt. Aus diesem Grund wurden im praktischen Versuch anhand von Erfahrungswerten während des Prozesses Teile des Prozesswassers durch Frischwasser oder Permeat aus einer Osmoseanlage ersetzt. Der Röstprozess kommt ohne diese Eingriffe ab einer bestimmten Konzentration an organischen Säuren zum Erliegen bzw. wird stark verlangsamt. Als Messgrößen zur Prozesssteuerung dienen Temperatur, pH-Wert, Leitwert, Redoxpotential und gelöster Sauerstoff, so dass bei Erreichen eines vordefinierten Zielwertes ein anteiliges Abpumpen des Prozesswassers in einen Vorlagebehälter erfolgt. Das entnommene

² Es ist bekannt, dass z.B. in China die Gewinnung von Hanfbast durch manuelles Abziehen der frischen Faserhülle von dem holzigen Kern des Pflanzenstängels erfolgt, bevor ein Aufschlussprozess zur Gewinnung von feinen Hanffasern durchgeführt wird.

Prozesswasser wird vorzugsweise durch aus Leitungswasser osmotisch gewonnenes Permeat ersetzt.

Die Versuche zur Degummierung wurden 2023 und 2024 unter partnerschaftlicher Nutzung eines Bioreaktors bei der Hanf Farm GmbH in Melz durchgeführt, der im Rahmen eines geförderten ZIM-Kooperationsprojektes entwickelt und als kleintechnische Versuchsanlage im Jahr 2023 realisiert wurde.

Die folgende Abbildung zeigt den Bioreaktor (links) und die für den Prozess entwickelten Kassetten (rechts). Die Kassettenlösung wurde gewählt, um sowohl Ganzstängel als auch Wirrfasern in einer gesicherten einheitlichen Prozessumgebung zu degummieren.



Abbildung 9 Kleintechnische Versuchsanlage "Bioreaktor"

Nach der biologisch-enzymatischen Degummierung werden die Fasern der Hanfstängel mit klarem, ca. 50-60°C heißem Wasser gespült, wobei organische Säuren in niedriger Konzentration sowie vor allem lösliche Restpektine ausgespült werden, die ebenfalls verwertet werden könnten.

5.3.3 Laboruntersuchung von Reaktorwasser aus der Degummierung von Hanfbast

Letztlich liegt als „Abwasser“ aus einer enzymatischen Degummierung ein wässriger Stoffstrom aus Abbauprodukten der Degummierung mit einem hohen Wasseranteil vor. Eine genaue Angabe zur Konzentration der organischen Säuren in diesem Stoffstrom bei einem Dauerbetrieb der Anlage ist gegenwärtig nicht exakt möglich.

Bei der biologisch-enzymatischen Degummierung fallen zwei Fraktionen Abwasser an: das eigentliche Abwasser aus dem Degummierungsprozess und das Wasser aus dem anschließenden Spülvorgang der degummierten Fasern. Beide Fraktionen wurden anhand der Proben aus den Versuchen im Bioreaktor der Hanf Farm GmbH im Labor der JenaBios GmbH untersucht, um neben einem potenziellen Biogasertrag auch andere Parameter wie den Schwermetallgehalt zu überprüfen, da die Abwässer ohne Verwertung in einer Biogasanlage einem Vorfluter oder direkt einer Kläranlage zugeführt werden müssten.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchung des Abwassers aus der biologisch-enzymatischen Degummierung im Reaktor sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 9 Ergebnisse Laboruntersuchung des Abwassers der biologisch-enzymatischen Degummierung

Parameter	Einheit	Abwasser Degummierung	Spülwasser	Grenzwerte nach AbwV Anhang 38 für Einleitung in Gewässer
pH-Wert	-	6,6	-	
Messtemperatur (pH-Wert)	°C	20,4	-	
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	236	-	
Gesamt trockenrückstand	mg/l	2.320	-	
Gesamt trockenrückstand	% OS	0,23	-	
Filtrat trockenrückstand	mg/l	2.080	-	
Filtrat trockenrückstand	%OS	0,21	-	
Glührückstand	mg/l	1.130	-	
Glührückstand	% OS	0,11	-	
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	1.910	636	
Nitrat-Stickstoff	mg/l	<0,3	<0,3	
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,119	<0,1	
Ammonium-Stickstoff	mg/l	7,5	4,5	10
Stickstoff gesamt, anorganisch	mg/l	7,6	4,5	20
Phosphor	mg/l	22	1,8	2
TOC	mg/l	770	57	
Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX)	mg/l	0,055	0,068	0,5
HNO ₃ -Druckaufschluss	-	x	x	
BSB ₅	mg/l	1.380	81	25
CSB	mg/l	2.430	397	160
Schwermetalle				
Blei	mg/l	0,11	0,021	
Cadmium	mg/l	0,0035	<0,001	
Chrom	mg/l	0,023	0,012	0,5
Kupfer	mg/l	0,30	0,057	0,5
Nickel	mg/l	0,072	0,013	0,5
Zink	mg/l	1,1	0,22	2
Quecksilber	mg/l	<0,0005	<0,0005	frei

Industriehanf wird nicht nur zur Gewinnung von textilen Fasern, für Fasern für den Bau- bzw. Dämmstoffsektor, als Substrat zur Energiegewinnung in Biogas- und Verbrennungsanlagen, für die Gewinnung von (medizinischem) CBD aus den Blüten oder Öl aus Samen angebaut, auch seine phytosanitäre Wirkung auf den Boden führt zum Anbau von Hanf auf sanierungsbedürftigen Flächen. Dabei ist besonders die Aufnahme von Schwermetallen wie Cadmium, Chrom, Nickel, Zink und Blei von Bedeutung. Davon zeugen verschiedene Studien und Veröffentlichungen.^{3 4 5}:

³ <https://www.agrarheute.com/management/agribusiness/cannabis-reichert-giftige-schwermetalle-sagt-studie-589106>

⁴ <https://sensiseeds.com/de/blog/hanf-und-die-dekontamination-von-radioaktivem-boden/>

⁵ <https://hemptoday.net/de/hanffasern-aus-belasteten-boeden-fuer-bau-und-energie-italienischer-forschung-in-ordnung>

Die Schwermetallanalysen ergaben im konkreten Fall für keines der untersuchten Elemente eine höhere Konzentration im Abwasser als die vorgegebenen Grenzwerte (vgl. Tabelle 3).

5.3.4 Behandlung der Abwässer aus einer enzymatischen Degummierung von Hanf

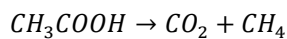
5.3.4.1 Direkteinleitung der Reststoffe aus enzymatischer Degummierung in eine Biogasanlage

Während der Degummierung durch partiellen Austausch des Prozesswassers ausgeschleuste organische Säuren sind für den Einsatz in einer Biogasanlage grundsätzlich geeignet. Der Abbauprozess in der Biogasanlage erfolgt dabei über vier Prozessphasen - unter anderem mit der Bildung von kurzkettigen flüchtigen Fettsäuren während der Acidogenese oder mit der Versäuerungsphase als zweiter Phase. Danach erfolgt die Bildung von Essigsäure aus organischen Säuren. Abschließend folgt noch die Methanbildung aus Essigsäure bzw. Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid.

Zu beachten ist, dass die Prozessbiologie in einer Biogasanlage Propion- und Buttersäure nur abbauen kann, wenn keine Überlastung vorliegt – beide Säuren dienen auch als Indikator für eine Überlastung der Prozessbiologie in einer Biogasanlage. Neben den organischen Säuren und den ausgeschwemmten Pektinen fallen weitere organische Materialien z.B. Teile der Schäben in geringer Menge an, welche in Filtern zurückgehalten werden. Auch diese Materialien könnten einer Biogasanlage zugeführt werden.

Im Folgenden ist die Beispielberechnung für den Methanertrag aus dem Prozesswasser mit den Werten aus der Analyse des real entnommenen Prozesswassers aus Punkt 3.3.3 dargestellt. Diese Werte sollen nach den Angaben des Versuchspersonals annähernd die erfahrungsbasierten Grenzwerte für die Ausschleusung des Prozesswassers darstellen. Bei niedrigeren Konzentrationen in den abzuleitenden Prozesswässern, insbesondere bei dem Abwasser aus dem Spülprozess, ist mit niedrigeren Konzentrationen der Säuren und damit mit einem geringeren Methanertrag zu rechnen.

Bildung von Methan aus Essigsäure:

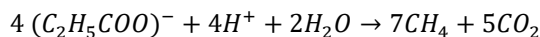


Essigsäure mit $60,05 \frac{g}{mol}$

Methan mit $16,04 \frac{g}{mol}$

$$3,55 \frac{g}{l} \text{ Essigsäure} * \frac{16,04 \frac{g}{mol}}{60,05 \frac{g}{mol}} = 0,948 \frac{g CH_4}{l} = 1,32 \frac{m^3 CH_4}{m^3 \text{ Prozesswasser}}$$

Bildung von Methan aus Propionsäure/Propionat unter der Voraussetzung freien Wasserstoffs/ Wassers (vereinfachte Darstellung):

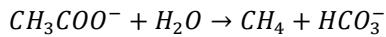
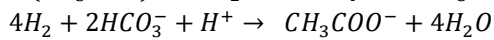
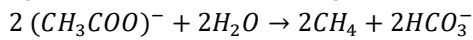
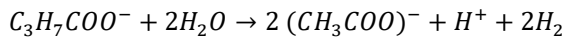


Propionsäure mit $74,08 \frac{g}{mol}$

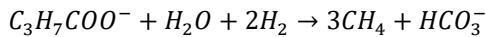
Methan mit $16,04 \frac{g}{mol}$

$$0,29 \frac{g}{l} \text{ Propionat} * \frac{1,75 * 16,04 \frac{g}{mol}}{74,08 \frac{g}{mol}} = 0,11 \frac{g CH_4}{l} = 0,15 \frac{m^3 CH_4}{m^3 \text{ Prozesswasser}}$$

Bildung von Methan aus Buttersäure/Butyrat unter Voraussetzung freien Wasserstoffs/Wassers (heterotroph acetogene Reaktion, methanogene Reaktion und autotroph (homo) acetogene Reaktion):



in Summe:



Buttersäure mit $88,11 \frac{g}{mol}$

Methan mit $16,04 \frac{g}{mol}$

$$3,55 \frac{g}{l} \text{ Buttersäure} * \frac{3 * 16,04 \frac{g}{mol}}{88,11 \frac{g}{mol}} = 1,94 \frac{g CH_4}{l} = 2,69 \frac{m^3 CH_4}{m^3 \text{ Prozesswasser}}$$

In Summe ergibt sich ein Methanertrag von 4,16 m³ Methan je Kubikmeter Prozesswasser. Da der Röstprozess nicht beeinträchtigt werden soll und das Prozesswasser i.d.R. vorher ausgetauscht wird, ist ein Grenzwert des Methanertrages von max. 4 m³/m³ Prozesswasser bei Einleitung in einen Biogasprozess zu erwarten.

Damit liegt der Methanertrag aus der Verwertung der Abwässer einer enzymatischen Degummierung deutlich unter dem von Schweinegülle mit 5 % Trockensubstanzgehalt und 10,1 m³ Biogas/m³ Gülle.

5.3.4.2 Einleitung der Abwässer aus der enzymatischen Degummierung in Vorfluter

Das Abwasser aus den durchgeführten Versuchen zur biologisch-enzymatischen Degummierung von Industriehanf ist nach den Laboruntersuchungen **nicht für eine direkte Einleitung in Vorfluter geeignet**.

Bei einer direkten Einleitung von weniger als 5 m³/d in Gewässer ist nur der Grenzwert für den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) einzuhalten sowie die Vorschriften von Teil B des 38. Anhangs der Abwasserverordnung. Sollte das Abwasser in den Anhang 1 der Abwasserverordnung als häusliches und kommunales Abwasser eingeordnet werden, gelten auch hier Grenzwerte für den CSB von maximal 150 mg/l an der Einleitungsstelle in das Gewässer bei einer Fracht von maximal 60 kg/d biochemischem Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (BSB₅; roh). Zudem gelten weitere Grenzwerte für Ammoniumstickstoff, Gesamtstickstoff und Phosphor, welche den Werten des 38. Anhangs der Abwasserverordnung ähnlich sind.

Sowohl das Abwasser des Röstprozesses als auch das Abwasser aus dem anschließenden Spülprozess weisen teilweise deutlich geringere Konzentrationen gegenüber einigen angegebenen Grenzwerten auf. Sowohl die Konzentration von Ammoniumstickstoff als auch Gesamtstickstoff ist niedriger als die vorgesehenen Grenzwerte. Auch die adsorbierbaren organischen gebundenen Halogene (AOX) sind deutlich unter dem Grenzwert von 0,5 mg/l. Der Grenzwert für Phosphor von 2 mg/l wird in der Probe des Reaktorabwassers aus dem eigentlichen Röstprozess mit 22 mg/l um mehr als das Zehnfache überschritten. Das Spülwasser liegt mit 1,8 mg/l nur knapp unterhalb des angegebenen Grenzwertes. Auch die Grenzwerte für den BSB₅ und den CSB werden in beiden Proben deutlich überschritten, im Abwasser des Reaktors zur eigentlichen Hanfröste um deutlich mehr als das Zehnfache.

Zur Entsorgung des Abwassers, welches nach den Messwerten aus den Laboruntersuchungen nicht ohne Vorbehandlung in eine Kanalisation eingeleitet werden darf, eignen sich alternativ zur Einlei-

tung in Biogasanlagen sowohl aerobe als auch anaerobe Verfahren der Abwasserbehandlung. Biologische Kläranlagen werden traditionell aerob betrieben. Allerdings erfordert dieses Verfahren einen vergleichsweise hohen Energiebedarf zur aktiven Belüftung und Durchmischung des Abwassers. Zudem ist der Prozess meist von einem Nährstoffmangel an Phosphor und Stickstoff geprägt und führt zur Entstehung großer Mengen an Klärschlamm, die anschließend teuer entsorgt werden müssen. Die anaerobe Behandlung des Abwassers kann in einem Bioreaktor erfolgen. Da im Prozess der Umsetzung der biologischen Fracht ein großer Teil der Energie in Methan umgewandelt wird, muss für einen effektiven Reinigungsprozess im kontinuierlichen System die Bakterienbiomasse zurückgehalten werden. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Immobilisierung der Biomasse in einem Festbettreaktor.

Die einzigen Vorteile zum Einsatz des Abwassers für einen Anlagenbetreiber für Abwasserbehandlung sind neben dem Effekt der Verdünnung der Substrate in Anlagen zur Abwasserbehandlung mit hohem Trockensubstanzgehalt vor allem der gewonnene Biogasertrag aus dem Abwasser.

Dazu wurde im Folgenden der Biogasertrag überschlägig aus dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) berechnet:

$$V_{CH_4} = \frac{CSB * Y_{CSB} * FQ * (100 - f_x)}{\rho * TS * oTS * 1000}$$

mit SB Chemischer Sauerstoffbedarf Substrat [mg O₂/l]

FQ Fermentierbarkeit [% CSB]

f_x Biomassewachstum [% CSB]

oTS organische Trockensubstanz [% TS]

TS Trockensubstanz Substrat [% FM]

V_{CH₄} Methanpotenzial [l CH₄/kg oTS]

Y_{CSB} Stöchiometrisches Methanpotenzial CSB [ml CH₄/g O₂]

ρ Dichte Substrat [kg/m³]

$$V_{CH_4} = \frac{2,430 \frac{g O_2}{l} * 0,350 \frac{l CH_4}{g O_2} * 65\% * (100 - 5\%)}{1.000 \frac{kg}{m^3} * 0,23\% * 51\% * 1000}$$

$$V_{CH_4} = 0,0004477 \frac{m^3 CH_4}{kg} = 0,0004477 \frac{m^3 CH_4}{l} = 0,4477 \frac{m^3 CH_4}{m^3}$$

Das Methanpotenzial aus dem CSB beträgt 0,4477 m³/l und ist damit deutlich geringer als das theoretisch aus den Säuren berechnete Methanpotenzial bei den Proben aus dem realen Degummierungsprozess. Schweinegülle etwa weist den 20-fachen Methanertrag auf. Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass die Fermentierbarkeit, angelehnt an klassische landwirtschaftliche Substrate, ca. 65 % beträgt. Durch die in Lösung befindlichen organischen Säuren wäre eine höhere Fermentierbarkeit denkbar. Allerdings hat eine höhere Fermentierbarkeit kaum einen Einfluss auf den weiterhin sehr niedrigen Methanertrag. Für den Energiebedarf des Biomassewachstums wurde ein Wert von 5 % angenommen. Die Dichte des Abwassers wurde aufgrund des hohen Wasseranteils vereinfacht mit 1 g/cm³ angenommen.

Der Methanertrag ist neben der theoretischen Berechnung aus dem CSB auch aus dem total organic carbon (TOC) möglich. Die nachfolgende Berechnung des Methanertrages aus dem TOC führt zu Biogasertrag von 0,039 l CH₄/kg oTS⁻¹:

$$V_{CH_4} = \frac{TOC * Y_{TOC} * c_{CH_4} * FQ * (100 - f_x)}{10.000 * oTS}$$

mit c_{CH_4} Methankonzentration im Biogas
 TOC gesamter organischer Kohlenstoff
 Y_{TOC} Stöchiometrisches Biogaspotenzial TOC

$$V_{CH_4} = \frac{332 \frac{g TOC}{kg TS} * 1,8662 \frac{l Biogas}{g TOC} * 52\% CH_4 * 65\% TOC * (100 - 5\% TOC)}{10.000 * 51\% TS}$$

$$V_{CH_4} = 0,039 \frac{l CH_4}{kg oTS}$$

Der TOC ist eher für die Bestimmung des theoretischen Biogaspotenzials von Feststoffen geeignet. Da das Abwasser nur einen sehr geringen Feststoffanteil aufweist und sich ein großer Anteil der organischen Säuren in Lösung befindet, ist die Fehleranfälligkeit dieses Parameters für die Berechnung des Methanpotenzials aus dem Abwasser des Reaktors hoch.

Beide Kennzahlen, der theoretische Methanertrag aus dem CSB als auch der theoretische Methanertrag aus dem Gesamtkohlenstoff (TOC), ergeben sehr niedrige Werte. Damit ist die Biogasgewinnung aus dem Abwasser der biologisch-enzymatischen Degummierung aus Sicht der Nutzung des Behälterraumes der Abwasserbehandlung gegenüber anderen Substraten und eine Substitution anderer Substrate durch das Abwasser wirtschaftlich wenig sinnvoll.

Der Ertrag aus dem Biogas zur Strom- und Wärme- oder Biomethanherzeugung wäre nicht ausreichend, um die laufenden Kosten der Biogasanlage zur Produktion des Gases zu decken. Für die Verdünnung einer Substratmischung mit hohem Trockensubstanzgehalt ist das Abwasser sehr gut geeignet, da der Feststoffanteil unter einem Prozent liegt.

5.4 Untersuchungen zur Anbindung an eine Biogasanlage

5.4.1 Ermittlung kapazitiver Grundlagen

Nachfolgend sollen die wesentlichen Parameter für eine Verbindung einer enzymatischen Degummierung zum Faseraufschluss mit einer Biogasanlage aus der Sicht der Anlagenkapazität und der Ver- und Entsorgung dargestellt werden.

Neben der abwasserseitigen Kopplung der Anlagen besteht ein wesentlicher Schwerpunkt in der Bereitstellung der erforderlichen Energiemengen zur Erwärmung des Prozesswassers sowie der Elektroenergie aus dem Blockheizkraftwerk (BHKW) der Biogasanlage zum Betrieb einer solchen Anlage.

Mangels einer realen, industriemäßig ausgelegten Degummierungsanlage (die konstruktive Ausbildung einer solchen Anlage hat ganz sicher Einfluss auf verschiedene Anwendungsparameter) können an dieser Stelle nur Abschätzungen angegeben werden, die mit Praktikern abgestimmt wurden und auch Erfahrungen aus eigenen Versuchen an der kleintechnischen Versuchsanlage in Melz einschließen.

Aus den Erfahrungen von FHm im Unternehmensverbund mit den Landwirtschaftsbetrieben von Dr. Heinz Friedrich Schönleber in Littorf/Sachsen ist eine regionale Organisation des Industriehaufbaus über Anbaugemeinschaften mit einem Lead-Partner zu befürworten. Unter den Gesichtspunkten der Bereitstellung von Spezialertechniken für Hanf und entsprechender spezieller Aufschlusstechnik (gleich ob Trocken- oder Nassaufschluss) wird ein Einzugsgebiet mit einem Radius von max. 50 km und einer Anbaufläche von bis zu 500 ha um eine Basis für den Aufschluss als realistisch

angesehen. Entfernungen zwischen Anbauort und Aufschlussanlage, die über diesen Wert hinausgehen, führen zu Mehraufwendungen für Transport von Maschinen und Erntematerial und machen sich im CO₂-Fußabdruck und bei der Effektivität des Anbau- und Aufschlussprozesses nachteilig bemerkbar.

Eine solche Festlegung führt zu folgenden Grenzwertbetrachtungen (Trockenmassewerte):

Maximal 500 ha Hanf á 6...8 t/ha Hanfstängel ergeben
 min. 3.000 t Hanfstängel davon 30 % Spitzenstroh → **900 t für Biogas**
 70 % Hanfstängelstroh für Aufschluss/Degummierung
 davon 40 % Hanfbast → **840 t zur Degummierung**
 50 % Schäben
 10 % Rest (Staub, Kurzfasern)

Für die Dimensionierung einer ersten Aufschlussanlage wird mit der Anfangserwartung von 30 % des vorgenannten Maximalwertes ≈ **250 t Hanfbast** (sauber abisoliert) gerechnet, die der Anlagen-dimensionierung und der Abschätzung der Verbrauchs- und Anschlusswerte zugrunde gelegt werden sollen. Die Verarbeitung des zu degummierenden Materials erfolgt batchweise.

Bei einer Packungsdichte von ca. 80 kg/m³ der zu degummierenden Baststreifen (angenommener Erfahrungswert aus Versuchen) in den Reaktorbehältern, einer mittleren Prozessdauer für eine Batchbehandlung von 72 h (Bereich zwischen 48 und 96 h, bei warmem Wasser 30...40°C), einer Prozessdurchlaufzeit von 4...5 Tagen (3 Tage Prozessdauer + 1...2 Tage Übergangszeit) über einen Zeitraum von 50 Wochen ergibt sich ein gleichzeitig benötigtes Prozessbehältervolumen (Maschinenkapazität) von

$$V = \frac{250.000 \text{ kg}}{80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 5d * 50 \text{ Wochen}} = 12,5 \text{ m}^3$$

bei einem Wechselrhythmus von 1x pro Woche, unabhängig davon, auf wie viele Einzelbehälter die zu degummierende Menge verteilt wird.

5.4.2 Ermittlung des Wasserbedarfes für eine enzymatische Degummierung

Bei einer Packungsdichte des zu degummierenden isolierten Hanfbasts von 80 kg/m³ (entspricht einer nicht zu festen Packung, wie sie durch manuelles Beschicken der Degummierbehälter erreicht wird) kann das anzustrebende Flottenverhältnis von 1:10 (Bast zu Wasser) eingehalten werden.

Reserven für die Ausweitung der Aufschlusskapazität liegen in der Verkürzung der Prozesszeit und der Reduzierung der Übergangszeit. Der Bedienungszeitanteil der Anlage sollte bei einem einschichtigen Betrieb mit 2 Vollzeitkräften leistbar sein, bedarf aber der weiteren Untersuchung. Für die Bewertung von Ver- und Entsorgungsprozessen einer Anlage mit den o.a. Kapazitätszielen zur enzymatischen Degummierung von Hanfbast kann von folgenden Erfahrungswerten ausgegangen werden:

- Nachsetzen von Permeat für Wasseraustausch 5...8 l/kg Faser
- Verbrauch von Waschwasser nach Degummierung 8...10 l/kg degummierte Faser
- Umlauf als Waschwasser vor Austausch 6-fach im Ø

jeweils pro kg Einwaage (Berechnungsgrundlage immer TM).

Daraus ermittelt sich folgender Wasserbedarf bei Austausch an

- Prozesswasser (Austausch durch Permeat)

$$V_{H_2O \text{ Deg.}} = 8 \frac{\text{l}}{\text{kg}} * \frac{250}{50} * 10^3 \text{ kg} = 40 * 10^3 \text{ l} = 400 \text{ m}^3 / w = 80 \text{ m}^3 / d$$

➤ Waschwasser (Leitungswasser)

$$V_{H_2O\text{ Wasch.}} = 10 \frac{l}{kg} * \frac{250 * 10^3 kg}{50 * 6} * 0,7 \approx 5,8 * 10^3 l / w \approx 1,2 m^3 / d$$

mit einer Ausbeute von 70 % Fasermasse bezogen auf Einwaage aus der enzymatischen Degummierung (30 % Verlust bei Degummierung, aus Versuchen ermittelt).

Der Wasserbedarf für den Prozesswasseraustausch erreicht für das Auslegungsbeispiel eine Größenordnung, die durch Zuführung von Frischwasser (ggf. als Permeat) nicht mehr wirtschaftlich darstellbar ist. Deshalb sind dringend Lösungen für innovative Stofftrennverfahren für wässrige Stoffströme nach enzymatischem Bastfaseraufschluss erforderlich.

5.4.3 Ermittlung des Bedarfes an Prozesswärme für eine enzymatische Degummierung

Für den Degummierprozess, zur anschließenden Faserwäsche und Trocknung der aufgeschlossenen Fasern wird Prozesswärme benötigt, die entsprechend der Aufgabenstellung aus dem Biogasprozess entnommen werden soll. Da bisher keine Degummierungsanlage im Dauerbetrieb arbeitet, wurden die Annahmen für die folgenden Berechnungen aus den Versuchen mit einer kleintechnischen Versuchsanlage exzerpiert und durch praktisch relevante Annahmen ergänzt.

Dabei werden die folgenden Fälle unterschieden:

Energiebedarf für die enzymatische Degummierung

Eingangsgrößen: Erwärmung von 80 m³/d Prozesswasser für Austausch um
 $\Delta T = 5 \dots 10 \text{ °K}$ im Kreislauf (Prozesstemperatur $\varnothing 35 \text{ °C}$)
 an 5 AT / Woche / 50 Wochen / a
 Wärmeverlust der Reaktoranlage an die Umgebung 5...10 %
 eine Ersterwärmung des Besatzes im Prozesswasserreservoir bleibt für die Abschätzung außer Betracht

$$Q = m * c * \Delta T = (80 * 1,1 * 10^3) kg * 4,19 \frac{kJ}{kg * K} * 10 K = 3.687.200 \frac{kJ}{d} = 1.026 \frac{kWh}{d}$$

Energiebedarf für Abspülprozess

Eingangsgrößen: Erwärmung von 1,2 m³ / d Spülwasser von 7°C (Temperatur Vorlauf Leitungswasser) auf Arbeitstemperatur 55...60°C,
 Annahme $\Delta T = 50 \text{ °C}$
 an 5 AT / Woche / 50 Wochen / a

$$Q = m * c * \Delta T = (1,2 * 10^3) kg * 4,19 \frac{kJ}{kg * K} * 50 K = 251.400 \frac{kJ}{d} = 70 \frac{kWh}{d}$$

Der Energiebedarf für die Heizung der Prozesse kann nur überschlägig abgeschätzt werden, da die konstruktive Ausführung der Reaktoranlagen zur enzymatischen Degummierung und der Einrichtungen zum mechanisierten Abspülen der degummierten Fasern erheblichen Einfluss auf den Wärmeverbrauch haben.

Eine deutliche Reduzierung des Wärmebedarfes ist möglich, wenn bei der Anlagenauslegung die Nutzung der Abwärme der aus den Prozessen abzuziehenden Abwässer durch Wärmeaustausch berücksichtigt wird.

5.5 Schlussfolgerungen bezogen auf die enzymatische Degummierung

Anhand der Untersuchungen können folgende Schlussfolgerungen für den Betrieb einer Anlage zur Degummierung von Bastfaserpflanzen in Verbindung mit einer Biogasanlage getroffen werden:

1. Mit den innerhalb des Projektes durchgeführten Entwicklungsarbeiten konnte der Nachweis erbracht werden, dass Anlagen zur enzymatischen Degummierung von Bastfaserpflanzen mit messbar positiven technischen und wirtschaftlichen Effekten, aber auch mit wesentlichen Einschränkungen und genehmigungsrechtlichen Unsicherheiten in Kombination mit Biogasanlagen und -prozessen betrieben werden können.
2. Die bisherige Perspektive der Aufgabenstellung war hauptsächlich auf die Einleitung der Prozessabwässer aus der enzymatischen Degummierung in Biogasanlagen ausgerichtet. Da in Thüringen sehr viele Biogasanlagen entsprechend der durchgeführten Analysen mit Gülle betrieben werden, ist in diesen Anlagen der direkte Einsatz des anfallenden Abwassers aus der enzymatischen Degummierung (Prozessabwasser und Spülabwasser) technisch nicht notwendig und wirtschaftlich nicht sinnvoll. Die direkte Einleitung dieses Abwassers ohne weitergehende Nachbehandlung kann deshalb nur an Biogasanlagen mit ausschließlichem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen oder Bio- und Landschaftspflegeabfällen sinnvoll sein.
3. Das Problem der umweltgerechten Entsorgung von Prozesswasserabfällen ist durch Einleitung in eine Biogasanlage unter den angeführten Rahmenbedingungen bereits jetzt technisch möglich. Auch die separate Behandlung der Röstabwässer in speziellen Abwasseraufbereitungsanlagen liegt aktuell im Bereich der Möglichkeiten, ist aber jeweils mit der Anlagenprojektierung und -genehmigung zu bearbeiten. Damit können für ein bisheriges Hauptproblem der enzymatischen Degummierung – die Entsorgung der Abwässer - Lösungen auf Höhe der wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse angeboten werden.
4. Auch ist ein Einsatz dieser Abwässer in einer Biogasanlage unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten aus Sicht des Gasertrages allein nicht sinnvoll und bisher nur über die physikalischen Eigenschaften zur Verdünnung des Behälterinhalts der Biogasanlage und der verbesserten Rührfähigkeit in Verbindung mit einer umweltgerechten Entsorgung von Röstabwasser zu rechtfertigen. Die Erhebung einer „Abwassergebühr“ oder „Entsorgungspauschale“ auf den Einsatz des Abwassers in einer Biogasanlage kann die Verdrängung anderer Substrate unter dem Gesichtspunkt einer genehmigungsrechtlich beschränkten täglichen Zufuhrmenge in die Biogasanlage sowie einer genehmigungsrechtlich einzuhaltenden Aufenthaltszeit im geschlossenen Behältersystem demgegenüber aber rechtfertigen.
5. Um eine effektive Nutzung bzw. Entsorgung der Prozessabwässer der enzymatischen Degummierung zu gewährleisten und den Frischwasserbedarf im Prozessbehälter deutlich zu verringern, muss eine Lösung zur Aufbereitung des anfallenden Abwassers aus der Degummierung und der nachfolgenden Wäsche der Bastfasern gefunden werden. Eine effiziente Abtrennung der Schadstoffe und möglicher anorganischer und organischer Wertstoffe kann auch die Perspektive auf eine Verwertung bzw. Entsorgung der Abwässer aus Röste und Wäsche über Biogasprozesse grundsätzlich verändern, da die Zuführung von Prozessrückständen in konzentrierter Form (also nach ihrer Abtrennung von kreislauffähigen Prozesswässern) sehr wohl technisch als auch wirtschaftlich möglich und sinnvoll ist. Deshalb kommt der Durchführung solcher ergänzenden wissenschaftlichen Untersuchungen besondere Bedeutung für eine praxiswirksame Umsetzung der enzymatischen Degummierung von Bastfaserpflanzen zu.
6. Aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht ist die Rückgewinnung der für die Gewährleistung des Temperaturniveaus der Prozesse notwendigen zugeführten Wärmeenergie aus den Prozessabwässern dringend geboten.
7. Bei allen oben dargestellten Nebenprodukten der biologisch-enzymatischen Degummierung von Hanffasern und ihrer Nutzung innerhalb von Biogasanlagen ist allerdings offen, wie diese nach den Vergütungsklassen der verschiedenen EEGs eingeordnet werden. Sowohl im EEG 2009 mit

Bonus für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und dem Bonus für den Einsatz von Gülle sowie den Einsatzstoffvergütungsklassen im EEG 2012 ist keines der dargestellten Nebenprodukte enthalten, so dass voraussichtlich nur die Grundvergütung in Anspruch genommen werden kann. Vor der Planung und Genehmigung einer Reaktoranlage zum Faseraufschluss mit dem Ziel der Einleitung von Prozessabwässern in eine Biogasanlage ist die Einordnung in die jeweilige Vergütungsstruktur des für die Biogasanlage gültigen EEGs mit dem Netzbetreiber und dem Umweltgutachter zu klären und ggf. frühzeitig das Gespräch mit der Clearingstelle EEG zu suchen.

6 Untersuchungen zu Anforderungen an die Bereitstellung textil verarbeitbarer Naturfasern aus regionalem Aufkommen in Thüringen

6.1 Grundlagen: Warum Wolle und Bastfaseraufschluss gerade in Thüringen?

Nachhaltiger Handel mit regionalen Rohstoffen wird in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Insbesondere der hohe Wasserverbrauch und Pestizideinsatz bei der Baumwollerzeugung hat eine Nachfrage nach feinaufgelöstem Hanf zur teilweisen Substituierung derselben zur Folge.

Schafhaltung ist in der Region landschaftsprägend. In der Vergangenheit haben Thüringen und Sachsen hier eine herausragende Stellung eingenommen.

Nach Abbau der regionalen Textilindustrie in Verbindung mit ihrem Abwandern in den asiatischen Raum ist eine Reaktivierung der textilen Wertschöpfungskette vor Ort aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten überfällig.

Durch die regionale landwirtschaftliche Erzeugung und Aufbereitung von Textilfasern mit Hilfe nachhaltiger Aufschlussverfahren lässt sich die CO₂-Neutralität für die Prozesse anstreben. Dabei ist die Nutzung von Stoffnebenströmen sinnvoll und unbedingt notwendig.

Der Aufschluss von Bastfasern sowie die Wäsche von Schafschurwollen sollten als sich ergänzende Projekte betrachtet werden. In der Anfangsphase wird es kaum möglich sein, jedes Projekt für sich so zu betreiben, dass benötigtes Personal voll ausgelastet ist. Führungs- und Verwaltungskräfte müssen bereitgestellt werden. Infrastruktur (Stapler, Behälter, Heizung, usw.) müssen für beide Stoffströme vorhanden sein. Für weitere Entwicklungen im Bereich Hanfaufschluss könnte hier auf die Energiebereitstellung und die Verfügbarkeit einer kontinuierlichen Wäsche und Trocknung aus der Wollbehandlung zurückgegriffen werden. Auch die Behandlung der trockenen Hanffasern mit Luft, die mit Wasser gesättigt ist, ist verarbeitungstechnisch sinnvoll, um die Reißfestigkeiten der Fasern vor der mechanischen Öffnung, zu erhöhen.

6.2 Anforderungen an die Bereitstellung von Wolle aus regionalem Aufkommen

6.2.1 Anforderungen an die Wollwäsche

Die weltweite Nachfrage nach Wolle ist immer noch stark rückläufig. Die Gründe hierfür sind vielseitig. Die Nutzung von Wollprodukten wird teilweise schon auf Grund der Tierhaltung abgelehnt, was jedoch den Bereich der Landschaftspflege außer Acht lässt. Darüber hinaus wird immer wieder der schlechte Wert bei der CO₂-Berechnung bei der Erzeugung von Produkten aus Schafschurwolle kritisch gesehen. Diese schlechte Bepreisung resultiert aus den Werten für die Landnutzung (die in Thüringen eher eine Landpflege ist) und den relativ hohen Energiekosten für die Wollwäsche. Hier basieren die Werte für die Wärme- und Stromerzeugung auf der Basis von fossilen Energieträgern wie Erdgas/Erdöl für die Wärmeerzeugung sowie, zumindest bei älteren Werten, auf der Gewinnung von Strom aus Kohlenutzung. Auch der hohe Wasserverbrauch fließt hier negativ ein. Auf Grund des Fehlens moderner, zeitgemäßer Anlagen wird hier oft der „falsche“ Weg gewählt. In der Vergangenheit war es sicher wirtschaftlich sinnvoll, lieber Gas für die Erwärmung von Frischwasser

und Trocknung der Fasern zu verwenden, als den Weg der Wärmerückgewinnung und des Brauchwasserrecycling zu gehen. Dies führte zu hohen Wasser- und Energiekosten auf Basis von fossilen Energieträgern.

Das hier beschriebene Konzept für eine moderne Wollwäsche möchte hier einen anderen Weg skizzieren. Es wird damit nicht möglich sein, Rohwolle besser und/oder billiger zu waschen als konventionelle Wollwäschereien.

Wie oben erwähnt, wurden die Ziele wie folgt definiert:

- Hohe Ausreinigung von Feststoffen und Fremdbestandteilen (Mineralien, Kot, Stroh, Heu, usw.),
- Möglichst niedriger Restfettgehalt auf der Rohwolle, um diese auch für moderne Spinnereianlagen lauffähig zu machen (hoher Fettgehalt führt zu schlechten Laufeigenschaften auf modernen Spinnanlagen durch Ablagerungen an den Spinnstellen),
- Möglichst geringer Frischwasserverbrauch,
- Aufkonzentration der Endabwässer,
- CO₂-Neutralität.

Voraussichtlich kommt hier einer Zusammenarbeit mit einer Biogasanlage eine wesentliche Bedeutung zu.

Bei den Untersuchungen beim Projektpartner IKBE und den anschließenden Diskussionen hat sich herausgestellt, dass eine direkte Nutzung der Stoffnebenströme in einer Biogasanlage nur bedingt möglich ist. Insbesondere die Einstufung als Industrieabwasser, das relativ geringe Gasbildungspotential, der hohe Anteil an anorganischen Stoffen (Mineralien), die Problematik der Lagerkapazitäten sowie die Tendenz zur Biomethaneinspeisung der Biogasanlagen und dem dadurch wegfallenden Wärmeangebot haben zu einer Neubewertung geführt.

6.2.2 Energetische Betrachtung

Im Jahr 2024 wurde jede 4. kWh Strom in Schleswig-Holstein kostenlos ins Stromnetz eingespeist bzw. erhielt der Abnehmer der Energie zusätzlich eine Bezahlung für die Abnahme. Hier handelt es sich fast ausschließlich um Strom aus regenerativen Anlagen der Windkraft oder von PV-Anlagen. Für die Stadt Frankfurt a.M. wurde eine Studie zur Nutzung von Großwärmepumpen für Wärmenetze durchgeführt, die als Energiequelle das Wasser aus dem Main nutzt. Das Potential ist hier riesig. Bei einer gleichzeitigen Nutzung von Wasser als Energiespeicher lassen sich hier neue Wege gehen.

6.2.3 Konzeption für eine Moderne Wollwäsche

6.2.3.1 Anlagenkonzeption Waschbereich

Um die einzelnen Stoffströme optimal nutzen zu können und um den Einsatz von Energie so weit wie möglich senken zu können, muss der Wollwaschprozess entsprechend getrennt werden.

Es ist eine Erweiterung der beispielhaft zugrunde gelegten Wollwaschanlage um 2-3 Behandlungsbäder notwendig, um hier die gewünschten Effekte zu ermöglichen.

Weiterhin ist der Ausbau der Anlagen für Wärmeerzeugung/Wärmerückgewinnung und für Wasser- und Abwasserbehandlung über den an der Beispielanlage realisierten Stand hinaus erforderlich.

Folgende Abbildung stellt dies als Übersicht dar.

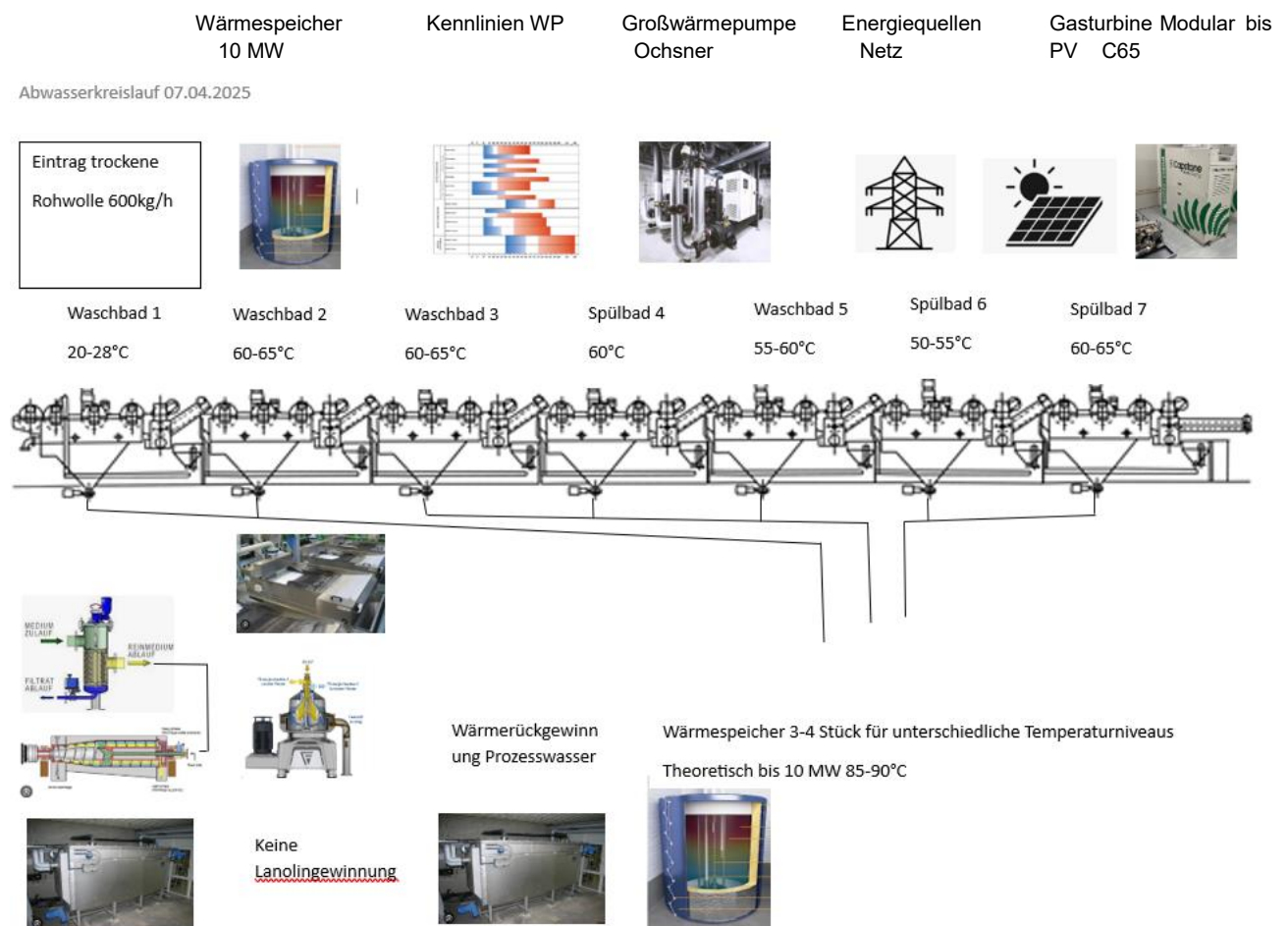


Abbildung 10 Konzept einer Wollwaschanlage mit nachhaltiger Energieerzeugung

Bad 1: 1. Waschbad

Lösen von Kot und Mineralien, leichte Temperierung über die Wärmerückgewinnung der Abwässer. Frischwasserzufluss aus Bad 2 (weniger Verunreinigungen, hier immer optimale Spülwirkung und Temperierung von Bad 1. Nur geringe Lösung/Ausscheidung von Wollfett. Kein Einsatz von Waschmittel, daher gute Eigenschaften beim Separieren. Ausscheiden von Mineralien über Absetzbecken mit Schrägboden/ Abschlammung/ Feststoffaustrag über automatischen Austrag. Feststoffausscheidung und Abtrennung von Fettphase über 3-Phasen-Decanter. Hoher TS-Gehalt für Nutzung Biogasanlage (ggf. Anlage für Speisereste usw.). Die Rohwolle wird weitestgehend trocken zugeführt und mit einer Abquetschfeuchte von 50-60 % dem nächsten Bad zugeführt = hoher Wasserbedarf selbst ohne Abschlammung

Bad 2: 2. Waschbad

Zugabe von Pottasche/Natronlauge = Verseifung von Wollfett. Reduzierung von Waschmittel, höhere Temperatur = Lösen des Wollfetts, keine Emulgatoren = besseres Abscheiden von Lanolin über 3-Phasen-Separator. Vorabscheidung über Spaltfilter notwendig, Zulauf aus Bad 3, Abschlammung in Sammelbehälter und Reinigung über Decanter in Kombination mit Bad 1, Überlauf/Wasserausgleich mit Bad 1

Bad 3: 3. Waschbad

Zugabe synthetisches Waschmittel für optimale Vorwäsche. Überlauf zu Bad 2, Zulauf aus Bad 4

Bad 4: 1. Spülbad, Auswaschen von Verschleppungen aus Bad 3. Überlauf nach Bad 5, Ausgleich von Bad 2Bad 5: 4. Waschbad, Zugabe synthetisches Waschmittel, Entfernung Restfett, Überlauf Bad 4 Frischwasser aus Bad 6Bad 6: 2. Spülbad, höchste Frischwasserzufuhr. Überlauf zu Bad 5, ggf. Bad 4Bad 7: 3. Spülbad, ggf. H₂ Bleiche, dann kein Wasserabfluss zu Bad 6

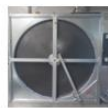
6.2.3.2 Wolltrocknung

Eckdaten: 120°C, 250-300 kW Trockenleistung (350-500 kg H₂O/h verdampfen)

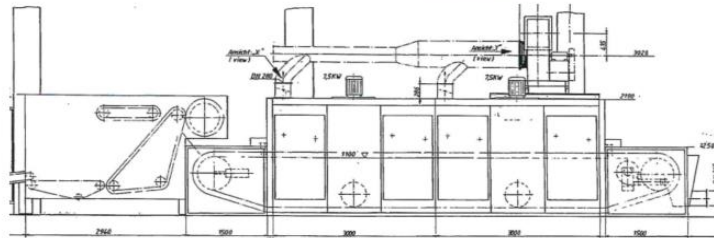
Wärmekonzept Wolltrocknung 07.04.2025



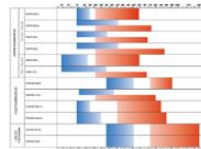
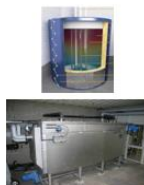
Zellradwärmetauscher mit automatischer Abreinigung, Zuführung der trockenen Zuluft in Zone 1



Direkt Trocknung durch Abluft Mikrogasturbine 300°C Ablufttemperatur



Abwärmenutzung über Wärmepumpe zur Trocknung über Wärmetauscher



Wärmespeicher 3-4 Stück für unterschiedliche Temperaturniveaus

Theoretisch bis 10 MW 85-90°C

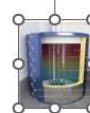


Abbildung 11 Energiekonzept Fasertrocknung

Wärmerückgewinnung aus der Abluft über Zellradwärmetauscher mit automatischer Abreinigung (Faserstäube), Kondensat Rückspeisung in Bad 4, Rückführung trockener Warmluft in Zone 1 des Trockners. Wärmeerzeugung über bedarfsabhängiger Erhöhung der Vorlagetemperatur aus dem Wärmespeicher über Wärmepumpe (bis 200°C möglich: Fa. Lübbbers). Direkttrocknung über Gasturbine, über „Biogaseinkauf“ = CO₂-neutral, möglich. Stromnutzung der Turbine für Anlage/Wärmepumpe. Wärmeerzeugung/Speicherung über Großwärmespeicher = Warmwasser direkt, Heizleistung über Wärmepumpe und Wärmetauscher, ggf. Abwärmenutzung von Abwasser aus Waschanlage über Vorwärmetauscher. Wärmeerzeugung mit „Abgreifenergie (PV + Wind)“ zu Niedrigpriesen über WP und Bereitstellung über Wärmespeicher, eigene PV zur Teildeckung des Strombedarfs während des laufenden Betriebs. Überschüssiger Eigenstrom dient über die Nutzung der Wärmepumpe zur Aufladung der Wärmespeicher. Anhebung der Temperatur zur Trocknung über Wärmepumpe. Stromeinsparung mittels Wärmepumpe bis zu 80 % im Vergleich zur Direktheizung mit Strom.

6.2.4 Stoffmengen/Materialströme

Materialeinsatz:

Rohwolle 500 kg x 8 h = 4 t/d

Waschwolle 60-65 % = 2,8 (2,8 x 250 d = 700 t/Jahr)

Materialströme:

Kot, sonst. 20-25 % davon 50 % über Voröffnung/Reinigung vor Anlage
0,5 t mechanisch über Vorreinigung, Zuführung Biogasanlage
0,5 t Abscheidung über Decanter

Fett 5-10 % = 0,2 t - Verwertung in Biogasanlage

Entsorgung/Nutzung der Nebenprodukte

1 Transport/Woche ca. 10 t zur Biogasanlage = Entsorgungskosten,
relativ hoher Feuchtigkeitsgehalt
Ggf. kann hier auch ein hochwertiger Dünger erzeugt werden; z. B.
Zumischung von Hanffasern zur Bindung und als
Feuchtigkeitsspeicher (ist grundsätzlich als hochwertiger
Wirtschaftsdünger zu betrachten), sollte aber, über den hohen
Fettgehalt, auch ein hohes Gasbildungspotential haben

bis 5 m³/d an Kläranlage

Werte für TS + CSB müssen die Grenzwerte einhalten (sind
unproblematisch)

entspricht ca. 2 l Frischwasser/kg bei einer Tagesproduktion von 2.500
kg Waschwolle.

6.2.5 Wärmeerzeugung

Abgreifenergie: PV + Windkraft bei Bedarf oder bei „sinnvollen“ Bedingungen

PV ca. 300 kW wären ausreichend für den Normalbetrieb bei voller Leistung über eine Zwischen-
schaltung von Wärmepumpen

Turbine C65: 60 kW Strom, 150 kW Wärme 309°C, 20 kW 50°C Abluft Turbine, kann mit Biogas, mit
Wasserstoff nach Anpassungen, betrieben werden.

Großwärmepumpen: 50 kW Strom = 250 kW Wärmeleistung, 2 Anlagen für unterschiedliche Tem-
peraturbereiche, diverse Anbieter am Markt. Bewährte Technik seit ca. 20 Jahren. Hier stellt sich die
Standortfrage. Am Standort Altenburg ist eine Wassernutzung einfach denkbar. Wenn als Umwelt-
wärme Wasser, in größerer Menge, zur Verfügung steht gestaltet sich dies als sehr sinnvoll. Die
Umweltwärmenutzung aus der Abluft des Trockners hat auch erhebliches Potential.

Wärmerückgewinnung: Hohes Potential aus der Abluft des Fasertrockners. Hier sind die Kurzfasern
in der Abluft zu beachten. Selbstreinigende Wärmetauscher nötig. Endabwässern muss die Wärme
in 2-3 stufigem Prozess entzogen werden. Herausforderung ist hier die unvermeidliche Schmutz-
fracht und der Fettgehalt in den Abwässern. Diese führen zu starken Ablagerungen auf den Wärme-
tauschern. Ein Konzept hierfür ist in Arbeit, kann aber erst weiter bearbeitet werden, wenn weitere
Informationen bezüglich der Aufbereitung über Tricanter und Separator vorliegen.

6.2.6 Wärmespeicher

Wasser eignet sich hervorragend zur Speicherung von thermischer Energie. Da Wasser mit unter-
schiedlichen Temperaturen benötigt wird und auch Abwässer mit unterschiedlichen Verschmut-
zungsgraden gespeichert werden muss, ist es wichtig, unterschiedliche Behälter bereit zu stellen.
Im Bereich der Frischwasserbereitstellung und der Bereitstellung von Energie für die Wärmepumpe
zur Temperaturerhöhung für die Fasertrocknung ist ein hoher Speicher mit einer entsprechenden
Schichtung der einzelnen Temperaturebenen sehr sinnvoll. Hier kann die Frischwasserzufuhr an der

kältesten Stelle (unten) erfolgen. Die Entnahme kann in der richtigen Höhe erfolgen. Die höchsten Temperaturen können im oberen Teil des Behälters abgegriffen werden.

Schematischer Aufbau des modularen Wärmespeichers "VARIO"



Abbildung 12 Aufbau Wärmespeicher



Abbildung 13 Installation Wärmespeicher

6.2.7 Abschließende Betrachtung zum Thema nachhaltige Wollwäsche

Abschließende und verbindliche wirtschaftliche Betrachtungen/Berechnungen können erst im Zusammenhang mit einer konkreten Anlagenplanung erarbeitet werden. Es stehen hier erhebliche Investitionen bei Installation an. Diese werden durch einen stark reduzierten Energieverbrauch im laufenden Betrieb wieder kompensiert. Insbesondere die Wasseraufbereitung über Zentrifugen stellt eine sehr hohe Investitionssumme und ein relativ hoher Verbrauch an elektrischer Energie dar. Erste Berechnungen zeigen, dass eine konventionelle Wollwäsche im Ausland, die auf fossilen Energieträgern basiert, bei den Waschlöhnen nicht zu unterbieten sein wird, wenn eine echte CO₂-Berechnung außer Acht gelassen wird.

6.3 Anforderungen an die Bereitstellung von Bastfasern für eine textile Verwendung

6.3.1 Anbau und Ernte von Industriehanf

Hanf ist neben Flachs die bedeutendste Anbaukultur von Bastfaserpflanzen in Europa. In Mitteldeutschland (Thüringen und Sachsen) ist aktuell nur der Anbau von Industriehanf für eingeschränkte

Gewinnungsziele bedeutsam (Samengewinnung, Fasergewinnung für technische Fasern). Andere Anbauzielstellungen (z.B. Gewinnung von CBD, Gewinnung verspinnbarer Fasern o.a.) werden aktuell nicht mehr oder noch nicht praktisch wirksam verfolgt.

Unter dem Gesichtspunkt der Bereitstellung verspinnbarer Fasern wird nachfolgend nur auf die Anbauzielstellung „Faserhanf“ eingegangen.

Der vorgesehene Verwendungszweck der aufgeschlossenen Bastfasern hat entscheidenden Einfluss auf Anbau, Ernte und Aufschluss von Bastfaserpflanzen. In Abbildung 6 ist eine Übersicht der verschiedenen Ernte- und Aufschlussverfahren und des daraus möglichen Zugangs zu unterschiedlichen Faserqualitäten ersichtlich.

Nachfolgend wird eine Übersicht der von den Projektteilnehmern angewendeten Verfahren für Ernte und Primäraufschluss von Bastfasern am Beispiel des Anbaus von Industriehanf gegeben.

LAWO Agrar GmbH, 07937 Zeulenroda-Triebes

Anbau 2024	261,9 ha gesamt, Region Ostthüringen davon 95,4 ha Eigenanbau LAWO 166,5 ha Anbau durch Vertragslandwirte
Aussaatdichte	45 kg/ha
Erntezeitpunkt	nach Samenreife
Ernteverfahren	Kombi-Ernte (Samen und Hanfstroh) durch Nachauftragnehmer (Fa. Krumm mit spezieller Erntetechnik)
Röstverfahren	Feldröste mit anschließender Überwinterung des liegenden Strohs auf dem Feld, Bergung des Strohs nach Abtrocknung im Frühjahr
Strohertrag	8 t Hanfstroh/ha TM

FARMHUS materials GmbH

(in Zusammenarbeit mit LWB Dr. Schönleber eK, Littdorf)

Anbau 2024	6 ha Versuchsanbau 2 ha Sorte Bialobrzeskie 2 ha Sorte FUTURA 83 2 ha Kompolti
Aussaatdichte	60 kg/ha
Erntezeitpunkt	100 Tage nach Aussaat bei Blühende und Samenansatz
Ernteverfahren	FARMHUS – mod. Spezialerntemaschine KATANA
Röstverfahren	Enzym. Degummierung nach mechanischem Erstaufschluss
Strohertrag	Ø 6 t/ha Hanfstroh/ha TM (ohne Stängelspitzen)

Agrarproduktion Großromstedt GmbH&Co.KG, 99518 Bad Sulza

Anbau 2024	2 ha Versuchsanbau 2 ha Sorte Bialobrzeskie
Aussaatdichte	60 kg/ha
Erntezeitpunkt	140 Tage nach Aussaat
Ernteverfahren	Mähdrescher
Röstverfahren	ohne Röste
Strohertrag	ca. 5 t/ha TM
Körnerertrag	ca. 0,6 t/ha

Darüber hinaus wurden in der Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), Versuchsanstalt Dornburg, zusätzliche Sortenversuche mit verschiedenen Hanfsorten zur Ermittlung des Faseranteils der Sorten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 enthalten.

6.3.2 Bestimmung des Fasergehalts

Durch den Projektpartner TITK wurden an Faserproben aus einzelnen Anbauversuchen die Fasergehalte bestimmt. Dazu wurden eine Entholzung, Einkürzung, Reinigung und ein Faseraufschluss mit Labormaschinen durch den Projektpartner TITK durchgeführt.



Abbildung 14 Testmaterial Anlieferungszustand bzw. nach der Trocknung

Mit Hilfe eines Walzenbrechers wurden die getrockneten Ganzstängel gebrochen, um die Trennung der Basthülle von den Schäben zu bewirken. Anschließend wurden die Faserstränge auf einer Guillotine-Schneidemaschine (Fabrikat Pierret) in Abschnitte von 11 cm Länge geschnitten.



Abbildung 15 Bearbeitung der Fasermuster beim TITK



Abbildung 16 Walzenreinigungsmaschine und gereinigte, eingekürzte Hanffasern

Die gereinigten, eingekürzten Fasern wurden gewogen. Die Bestimmung des Fasergehaltes ergab nachfolgende Trockenmasse an Bast je Sorte (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10 Fasergehalt ausgewählter Hanfsorten nach Grob- bzw. Feinaufschluss

Bezeichnung der Hanfprobe	Einsatz-gewicht [g]	Grobentholzung		Feinentholzung		Fasergehalt [%]
		Brecher		RCZ 100		
		Baststränge [g]	Ausbeute [%]	Gutfaser [g]	Ausbeute [%]	
1 Felina 32	1200	600	50,0	198,8	33,1	16,6
2 Felina 32	1300	600	46,2	281,6	46,9	21,7
3 Futura 75	3200	1680	52,5	797,3	47,5	24,9
4 Santhica 27	2700	1610	59,6	727,2	45,2	26,9
5 USO 31	2900	1400	48,3	855,8	61,1	29,5
6 Kompolti	5100	Stängel mit hohem Schimmelbefall, daher nicht beprobt				
7 Futura 83	5200	3260	62,7	1316,8	40,4	25,3
8 Bialobrzeskie	3700	2860	77,3	1028,6	36,0	27,8

6.4 Textiler Aufschluss von Hanffasern

Im Rahmen des Projekts wurde unterschiedliche Verfahren für einen Bastfaseraufschluss mit dem Ziel der Bereitstellung textiler Faserqualitäten untersucht und getestet.

Die traditionelle Verfahrensvariante der Verarbeitung von Ganzstängeln wurde aus dem Bereich der Untersuchungen ausgeschlossen, weil die dazu notwendigen Erntetechnologien im Verbund der Projektteilnehmer nicht zur Verfügung stehen.

Entsprechend der Aufgabenstellung wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Zielstellungen für einen Faseraufschluss untersucht, die den vorhandenen technischen Bedingungen der Projektpartner entspricht.

6.4.1 Gewinnung Hanffasern aus feldgeröstetem Hanfstroh für technische Fasern

Die mechanische Entholzung des geernteten Hanfstrohs ist grundsätzlich immer Voraussetzung für den weiteren Faseraufschluss in Richtung der Gewinnung von Hanffasern. Für diese Zwecke wird das feldgeröstete oder auch nicht-geröstetes, getrocknetes Hanfstroh mit mechanischen Aufschlussanlagen bearbeitet. Dabei werden die Stängel(-teile) gezielt Schub-, Zug- und Druckbeanspruchungen ausgesetzt. Die holzigen Bestandteile der Hanfstängel werden von der faserigen Hülle getrennt. Durch entsprechende maschinelle Arbeitsoperationen werden die Bastfaserbündel mechanisch weiter aufgelöst. Die gebrochenen holzigen Stängelbestandteile werden als sog. Schäben von den Fasern getrennt. Die dabei entstehenden Stäube werden abgesaugt. Unterschiedliche Anlagenkonzepte sind z.B. als Hammermühlen- oder Rollenbrecher-Aufschluss bekannt. Aufschluss- und Reinigungsgrad der Faserfraktion (Entfernung von Schäben) sind entscheidend für die zukünftige Verwendung der Bastfasern. Eine Weiterverarbeitung der so aufgeschlossenen Fasern zu qualitativ hochwertigen Textilerzeugnissen ist nicht direkt möglich bzw. erfordert weitere Schritte.

Der Projektpartner VOFA betreibt am Standort Läwitz eine Anlage, in der der mechanische Faseraufschluss nach dem Hammermühlenprinzip erfolgt.



Abbildung 17 Aufschlussanlage und aufgeschlossene, feldgeröstete Hanffasern

In der Hanfaufschlussanlage werden Fasern mit einer durchschnittlichen Länge unter 100 mm gewonnen. Die Fasern zeichnen sich durch hohe Reißfestigkeit und eine für die technische Verwendung ausreichend feine Fibrillierung aus. Neben der Gewichtsreduktion von Faserverbundkunststoffen gegenüber Glas sind die guten Dämmeigenschaften Grundlage für eine breite Anwendung. Die Fasern finden dort Absatz, wo sie wie z.B. im Bauwesen direkt als Dämmmaterial oder als Zuschlagstoffe eingesetzt werden können.

Da die Hanffaser zu den Naturfasern mit hoher Zugfestigkeit gehört, ist sie besonders gut als Armierungs- und Füllstoff für den Einsatz in naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) geeignet. Hanffasern zeichnen sich im Verbund durch eine hohe Steifigkeit sowie Festigkeit in Verbindung mit geringer Dichte aus. Dadurch sind sie für Leichtbauanwendungen, insbesondere im Fahrzeugbau, besonders geeignet. In diesen Bereichen werden die in Läwitz erzeugten, aufgeschlossenen Hanffasern bevorzugt eingesetzt. Auch für die anfallenden Schäben gibt es vielfältige Anwendungen.

Der Aufwand zur Installation einer mechanischen Aufschlussanlage ist hoch. Aktuell in Umsetzung befindliche Planungen für die Installation einer vergleichbaren Aufschlussanlage in Sachsen-Anhalt bei der Hanffaser Geiseltal eG gehen im Jahr 2025 von einem Investitionsvolumen von ca. 4,5 Mio € als unterer Grenze aus.

Durch den Einsatz von Rollenbrecheranlagen anstelle von Anlagen nach dem Hammermühlenprinzip wird die mechanische Belastung der Hanffasern beim Aufschluss verringert, was nach Meinung von Fachleuten zu Fasern mit verbesserten mechanischen Kennwerten (z.B. Bündelzugfestigkeit) führt.

6.4.2 Gewinnung von Hanffasern aus nicht feldgeröstetem Hanfstroh

Im Rahmen des Projekts wurden auch Versuche zum Aufschluss von nicht-geröstetem Hanfstroh durchgeführt. Grundlage für diesen Ansatz war das neuartige technische Verfahrenskonzept einer Beerntung der Hanfbestände mittels eines modifizierten Feldhäckslers mit gleichzeitiger Trennung von Bastfaserhülle und Schäben bereits während des Erntevorgangs auf dem Feld beim Projektpartner FHm in Littdorf. Bei diesem Ernteverfahren werden die Stängelspitzen durch ein Hochschnittmähdwerk abgetrennt und als separater Schwad auf dem Feld abgelegt (s. Abbildung 18).

Ein für die Zwecke der Hanfstrohernte modifiziertes Maisgebiss schneidet die verbliebenen Basisstängel und führt sie einer technisch modifizierten Einmessertrommel zu. Diese wiederum schneidet die Stängel in Stücke von ca. 300 mm Länge. Beim weiteren Durchgang durch die Maschine wird die grüne Bastfaserhülle vom holzigen Kern der Hanfstängelstücke getrennt und anschließend auf dem Feld abgelegt. Nach einer i.d.R. kurzen Feldtrocknungszeit von wenigen Tagen können die so gewonnenen Fasern geschwadet, balliert und eingebracht werden. Das Feld steht dem Landwirt, anders als beim Feldrösteverfahren, recht schnell wieder für eine Nachfolgenutzung zur Verfügung. Der Verlust an Schäben, die bei diesem Verfahren auf dem Feld verbleiben und in den Boden eingearbeitet werden, wird durch den Effektivitätsgewinn des Gesamtverfahrens deutlich überkompensiert.



Abbildung 18 Spezialerntemaschine für Feldentholz von frisch-grünem Hanf



Abbildung 19 Hanffasern feldentholt (von links: Bestand, entholt, getrocknet, eingelagert)

Hinsichtlich der Ablage der separat abgetrennten Stängelspitzen wird auf die Ausführungen in Kapitel 6.2.1 verwiesen.

Durch eine weitgehende Feldentholzung der grünen Hanfstängel soll die aufwändige technische Stufe des mechanischen Aufschlusses mit den dort auftretenden Beanspruchungen der Fasern vermieden werden. Trotzdem verbleiben bei beiden mechanischen Primäraufschlussverfahren geringfügige Reste von Schäben an der Faser und im ballierten Faserteppich. Diese sind bei der oben beschriebenen Verwendung der feldgerösteten Fasern für technische Anwendungen weniger störend. Für die Verspinnung der Fasern (feintextile Anwendung) müssen die verbliebenen Schäben allerdings komplett entfernt werden, da diese kritische Störstellen für den reibungslosen Spinnprozess in der nachfolgenden Garnherstellung darstellen.

Als technische Alternative für einen mechanischen Faseraufschluss wurden Aufschlussversuche mit eingekürztem, nicht geröstetem Stängelstroh an einem Prototyp einer Rollenbrecheranlage beim französischen Betrieb HEMP-Act durchgeführt, der aktuell an einem Konzept für eine aufgabenangepasste, wesentlich preiswertere Aufschlussanlage arbeitet. Im Ergebnis wurden dort weitgehend entholzte Faserbänder mit einer parallelen Anordnung der Einzelfasern in Längsrichtung hergestellt. Die Faserbänder können zu Wickeln aufgerollt und in diesem Zustand der weiteren Verarbeitung (Einkürzung, Wasserröste usw.) zugeführt werden.



Abbildung 20 Prototypanlage Rollenaufschluss, Finalprodukt flächiges aufgewickeltes Faserband

Im Ergebnis der Versuche konnte festgestellt werden, dass mit diesem Konzept eine neue wirtschaftliche und technologische Möglichkeit für eine mechanische Aufschlussanlage zur Verfügung stehen kann, die auf jeden Fall in konzeptionelle Untersuchungen für den mechanischen Aufschluss von Hanffasern einzubeziehen ist.

Alternativ zur Abtrennung und Konditionierung der Fasern durch diese neuartige Rollenaufschlussanlage wurden Versuche durchgeführt, die getrockneten, ungerösteten Fasern mit anhaftenden Restschäben durch einen mechanischen Feinaufschluss mit arrivierten Ausrüstungen der Naturfaserverarbeitung aufzubereiten. Dazu wurden gemeinsam mit dem Projektpartner STFI Aufschlussversuche im Technikum der Firma TEMAFA durchgeführt. Ziel war es, die auf dem Feld durch die Erntemaschine bereits grob aufgeschlossenen Hanffasern zu reinigen, weiter zu öffnen und einzukürzen. Dazu wurde die in Abbildung 21 dargestellte Anlagenkonfiguration genutzt.

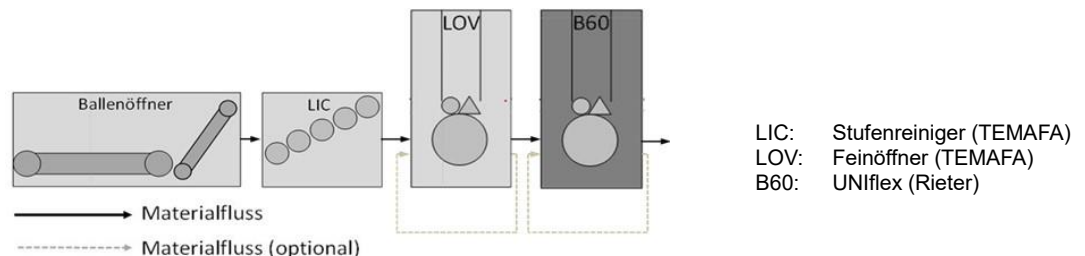


Abbildung 21 Maschinenkonfiguration Faseraufschluss TEMAFA

Im Anschluss an die Faserbearbeitung mittels Stufenreiniger (LIC) und Feinöffner (LIV) übernimmt der UNiflex B60 die Aufgabe, das Fasermaterial auf Baumwollstapellänge einzukürzen (Cottonisierung). Die Einstellung der gewünschten Faserlänge erfolgt mittels Klemmpunktverstellung. Dadurch wird auch der Kurzfaseranteil reduziert. Mittels der variablen Öffnungsintensität erfolgt die sukzessive Auflösung der Faserbündel. Gleichzeitig findet ein intensives Reinigen mittels gezielter Einstellung der Reinigungsintensität statt. Im Ergebnis der verschiedenen mechanischen Aufschlussversuche liegen weitestgehend schäbenfreie, mechanisch aufgeschlossene, nicht geröstete Hanffasern entsprechender Länge vor.

Mit allen bisher beschriebenen mechanischen Aufschlussprozessen sind Fasern bestimmbarer Faserfeinheit und Faserlänge zu isolieren, die technischen Anwendungen genügt. Um Hanffasern mit Baumwolle, Lyocell oder Wolle bzw. anderen Fasertypen zu Mischgarnen zu verarbeiten, werden aufgeschlossene Hanffasern benötigt, die hinsichtlich ihrer Faserfeinheit und Faserlänge mit dem jeweiligen Mischungspartner korrespondieren.

Schwerpunkt für den textilen Aufschluss ist diesbezüglich die Bereitstellung von aufgeschlossenen Hanffasern vorwiegend in zwei Stapellängenbereichen:

Mischung mit Baumwolle o.ä. (Kurzstapelspinnerei)

Baumwollstapel: 25-35 mm (beeinflussbar entsprechend Anforderung Kunde)

<10 dtex (Fernziel <5 dtex, idealerweise wie Baumwolle)

Mischung mit Wolle (Langstapelspinnerei)

Wollstapel: 60-120 mm (beeinflussbar entsprechend Anforderung Kunde)

<15 dtex (Fernziel <8 dtex, bei Wolle mit Herkunft D und 28 µm Faserdurchmesser)

Sonstige Bedingungen: Trash <0,5 % (holzige Restbestandteile) Restfeuchte 12-15 % bei Start Faserverarbeitung (Kardierung)

Aus diesem Grund ist als weitere Stufe des Faseraufschlusses durch eine nachfolgende Nassbehandlung mit Fibrillierung der nass aufgeschlossenen Fasern mit einer maschinellen Trocknung erforderlich.

6.4.3 Feinaufschluss mittels Nassaufschlussverfahren

Aus den umfangreich durchgeführten Versuchen zum Nassaufschluss der mechanisch aufgeschlossenen, gereinigten und gezielt eingekürzten Fasern haben sich folgende Verfahren zur Entfernung der pektinischen Verbindungssubstanzen zur Freilegung feinerer Hanffaserbündel als zweckmäßig herausgestellt:

6.4.3.1 Biologisch-enzymatische Degummierung

Mit Hilfe ubiquitärer Bakterien werden die faserbindenden Pektine in einem Bioreaktorprozess mittels natürlicher Enzyme verstoffwechselt. Alternativ können auch chemisch erzeugte Enzyme (hohe Kosten) zur Umwandlung der Pektine und zur Freisetzung der Fasern eingesetzt werden.

Mit einem nachgeschalteten Spülprozess werden die Faserbündel weiter in Richtung Zielfeinheit vereinzelt. Diese Fibrillierung der Faserbündel muss durch weitere Schritte der Verfahrensentwicklung in Verbindung mit einer bewegten Trocknung der degummierten Fasern verbessert werden.

Für die enzymatische Degummierung ist eine eigene Anlage zu entwickeln und zu installieren. Anlagen zur enzymatischen Degummierung in Lohnarbeit sind nicht bekannt.

6.4.3.2 Chemische Degummierung

Standardmäßig kann der Nassaufschluss von Hanffasern zum Zweck des Feinaufschlusses auch durch chemische Verfahren bewirkt werden. Dabei werden die faserverbindenden Pektine durch alkalisches Abkochen (oder andere Verfahren) gelöst, die Fasern anschließend gespült (bei Bedarf gebleicht) und getrocknet. Diese Verfahren des Aufschlusses werden schwerpunktartig in China angewendet. Sie führen zu Fasern, die die Anforderungen aus dem Spinnprozess hinsichtlich Feinheit und Länge gut entsprechen, von ihrer Haptik her (Griff, Oberfläche, Restpektine) jedoch qualitativ schlechter als enzymatisch degummierte Fasern sind.

Außerdem sind die entstehenden Abwässer aus einer rein chemischen Degummierung problematisch und schwierig umweltgerecht zu entsorgen. Besondere Anforderungen hinsichtlich einer GOTS-Zertifizierung der textilen Kette unter Verwendung derart degummierter Fasern sind schwer zu erfüllen.

Andererseits besteht die Möglichkeit, mit einem solchen chemischen Degummierungsprozess die Anlagentechnik nicht selbst aufbauen zu müssen, sondern die Degummierung über verfügbare Lohnveredler zu realisieren.

6.4.3.3 Physikalische Verfahren zur Degummierung von Bastfasern

Als physikalische Verfahren des Nassaufschlusses sind Verfahren

- zum Dampfdruckaufschluss,
- zur Stoßwellenbehandlung mit elektrischen Entladungen oder
- einer, auf osmotischen Phänomenen⁶ beruhenden Auflösung der pektinischen Bindungen zwischen den Fasern bekannt,

mit denen sich ausreichend feine textile Fasern gewinnen lassen. Diese Verfahren wurden bisher nicht näher untersucht, allerdings ist ihre Entwicklung unter Kostenaspekten weiter zu verfolgen, da sie gegenüber enzymatischen oder chemischen Verfahren weniger Anlagenaufwand erfordern.

Grundsätzlich muss mit oder direkt nach dem Nassaufschluss eine Unterstützung der durch den Aufschluss bewirkten Fibrillierung durch mechanische Krafteinwirkung erfolgen. Bevorzugte Verfahren dafür sind

- Ultraschall,
- hydromechanische Behandlung oder
- Kavitationsverfahren.

Anschließend ist eine maschinelle Trocknung (Bandtrocknung, Trockenturm o.ä.) vorzusehen. Vorzug erhält die bewegte Trocknung der degummierten und fibrillierten Fasern, um deren Geschmeidigkeit zu erhalten. Außerdem können in einem solchen Trocknungsprozess die zwangsläufig anfallenden Kurzfasern entfernt und zur weiteren Verwendung separiert werden.

Für die Bereitstellung marktgerechter Faserqualitäten ist es zwingend notwendig, dass sich der Faseraufschluss an den Beschaffungsbedingungen der Käufer orientiert. Insbesondere sind hier die Rohmaterialanforderungen der Spinnereien zu beachten.

Für die Kurzstapel-/Baumwollspinnerei werden Stapelfasern mit einem Restschäbengehalt von deutlich unter 1 % benötigt. Zum einen erfordert die mechanische Faserverarbeitung (z.B. über Karden) bereits gut vorgereinigte Fasern, um die feinen Garnituren der Maschinen zu schützen. Andererseits stellen Schäbenreste, auch feine Reste, Störstellen in der Garnbildung dar, was zu einer höheren Fehleranfälligkeit bei den zu verspinnenden Garnen führt.

Die weitere Verfeinerung/Fibrillierung der Faserbündel kann bei Einhaltung der Anforderungen an den Restschäbengehalt ggfs. durch separate Kardierung vor Zugabe des Mischungspartners erzielt werden. Dies ist jedoch ein für die Spinnerei zusätzlicher Prozess; zweckmäßiger ist es, diesen Prozess vorab vom Faserlieferanten zu realisieren.

Für die Langstapel-/Kammgarnspinnerei ist die Faser in Bandform vorzugsweise gekämmt bereit zu stellen. Dafür ist davon auszugehen, dass eine gezielte Aufbereitung mit Maschinen aus dem Bereich der Spinnereivorbereitung (Krempel, Kämmmaschine, Nadelstabstrecke u. ä.) durch den Aufschlussbetrieb analog zur Wollkämmerei erfolgen sollte. Alternativ können die Kammzüge durch eine Zusammenarbeit mit in Westeuropa etablierten Dienstleistungsbetrieben der Faservorbereitung bereitgestellt werden.

6.4.4 Ergebnisse der Aufschlussversuche

Eine wesentliche Entscheidung für den Verfahrenszug für einen Aufschluss war insoweit vorab zu treffen, da bei traditionellen Aufschlussverfahren eine Röste (Feld- oder auch Wasserröste) vor einer Trennung der Faserhülle von den holzigen Bestandteilen des Stängels erfolgt und alternativ dazu die Entfernung der Holzbestandteile vor einer Röste erfolgt (Handverfahren China, Grün-Entholzung bzw. mechanische Entholzung nicht gerösteten Strohs). Beide Varianten wurden deshalb bis zum Aufschluss der Fasern untersucht.

⁶ Konczewicz, W., Kryszak, N., Nowackiewicz, E., Kozłowski, R., Wojtyśiak, J., & Podsiedlik, W. (2013). Osmosis Phenomena Based Degumming of Bast Fibrous Plants as a Promising Method in Primary Processing. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 571(1), 116–131. <https://doi.org/10.1080/15421406.2012.703912>

Außerdem wurden die Möglichkeiten genutzt, verschiedene Varianten für einen anaeroben Nassaufschluss in die Untersuchungen einzubeziehen (Bioreaktor Melz, Fermenter HSZG Zittau). Weiterhin wurde als Verfahrensalternative im Nassprozess die chemische Degummierung mit einer tw. Nachbearbeitung durch Kardieren bei einem Faserverarbeiter untersucht.

Diese Varianten wurden außerdem mit verschiedenen Technologievarianten mechanisch aufgeschlossen

Typ I mechanischer Aufschluss erfolgt vor Nassaufschluss

Typ II mechanischer Aufschluss erfolgt nach Nassaufschluss (traditionell)

Die durchgeführten Aufschlussversuche wurden wie folgt kategorisiert

Tabelle 61 Ausgewählte Technologievarianten der Versuche

	Material		Herkunft	Littdorf/Sa.					
			feldgeröstet						
			ungeröstet	+	+	+	+	+	+
	Chargen-Bezeichnung			A9816	A9817	A9818	U9818	B9930	EH
Bastfaseraufschluss	mechanischer Primäraufschluss		Prallaufschluss	+	+	+	+	+	+
			Rollenaufschluss						
	Typ I	vorgelagerte mechanische Aufbereitung	Stufenreiniger				+	+	+
			Feinöffner				+	+	+
			Einkürzung				+	+	+
	Nassaufschluss		Vorwäsche						
			enzymatisch degummieren	+					+
			hydrodynamisch bearbeiten						+
			degummieren im Fermenter		+				
			chemisch degummieren			+		+	
			spülen	+	+	+			
			Avivage					+	
			statisch trocknen		+				
			bewegt trocknen	+		+		+	+
	Typ II	nachgelagerte mechanische Aufbereitung	Stufenreiniger	+	+	+			
			Feinöffner	+	+	+			
			Einkürzung	+	+	+			
		Kardieren			+	+	+	+	+

Alle während der Projektbearbeitung aufgeschlossenen Hanffaserproben wurden am STFI getestet. Dabei wurden insbesondere die für die feintextile Weiterverarbeitung in der Spinnerei maßgeblichen textilphysikalischen Faserparameter

- Feinheit Tt: gravimetrisch ÖTN 077,
- Länge l: Almeter am endengeordneten Faserbart bzw.
- Feinheitbezogene Höchstzugkraft F_{HT} : Bündelzugversuch ÖTN 076

ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dokumentiert.

Zur Einordnung der Ergebnisse in den Stand der Technik wurden zwei Referenzfaserproben vorangestellt:

Spalte/Säule 1: Cottonisierte Faserprobe (Nassaufschluss) aus Litauen

Spalte/Säule 2: Kammzug aus Frankreich (Faseraufbereitung für die Kammgarnspinnerei)

[illegible]

In den nachfolgenden Abbildungen 22, 24 und 25 sind die textilphysikalischen Eigenschaften vergleichend grafisch dargestellt. Ergänzend sind die jeweiligen Vergleichswerte (untere Grenze) für **Baumwolle** bzw. **Schafwolle**⁷ deutscher Herkunft als Linien hinzugefügt.

Die **Vertikalen** grenzen jeweils die prozesstechnisch direkt aufeinander folgenden Varianten voneinander ab.

Bzgl. der Faserfeinheit (vgl. Abbildung 22) liegen die Ausgangswerte für den ungerösteten, bei VOFA mechanisch grob aufgeschlossenen Hanfbast mit >180 dtex (Säule 3) um ca. 50 % über dem Kennwert von geröstetem Hanfstroh nach VOFA (ca. 120 dtex). Der höchste Auflösegrad der Faserbündel ($T_t = 43$ dtex) wurde mittels enzymatischem Aufschluss mit zusätzlicher hydromechanischer Bearbeitung und anschließender Kardierung erzielt.

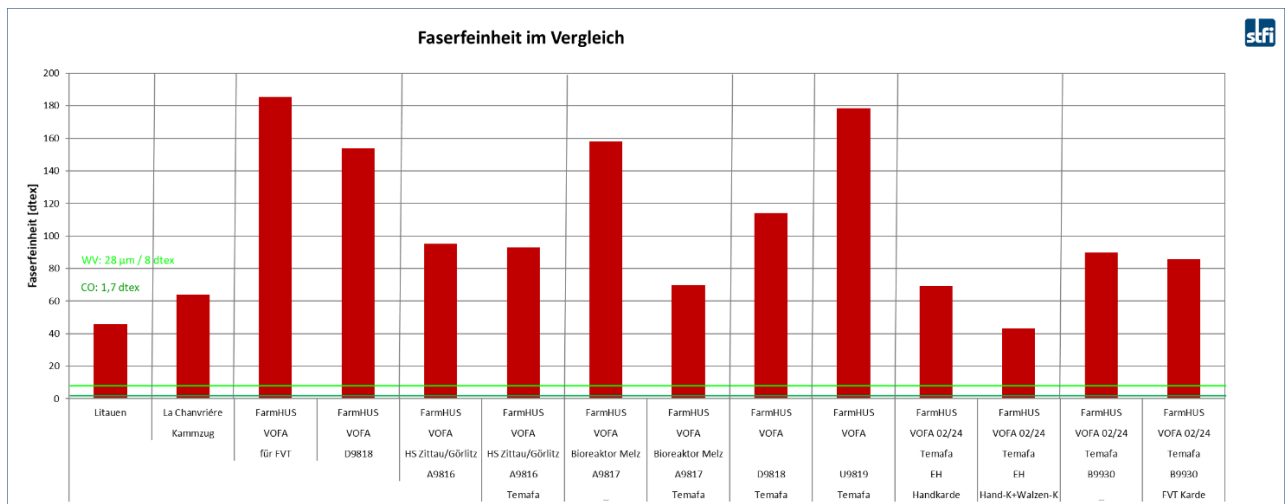


Abbildung 22 Faserfeinheit der getesteten Proben

Abbildung 23 veranschaulicht die Längenänderung über einzelne Aufschlussstufen (HA-Kammzug als Referenzmaterial links).

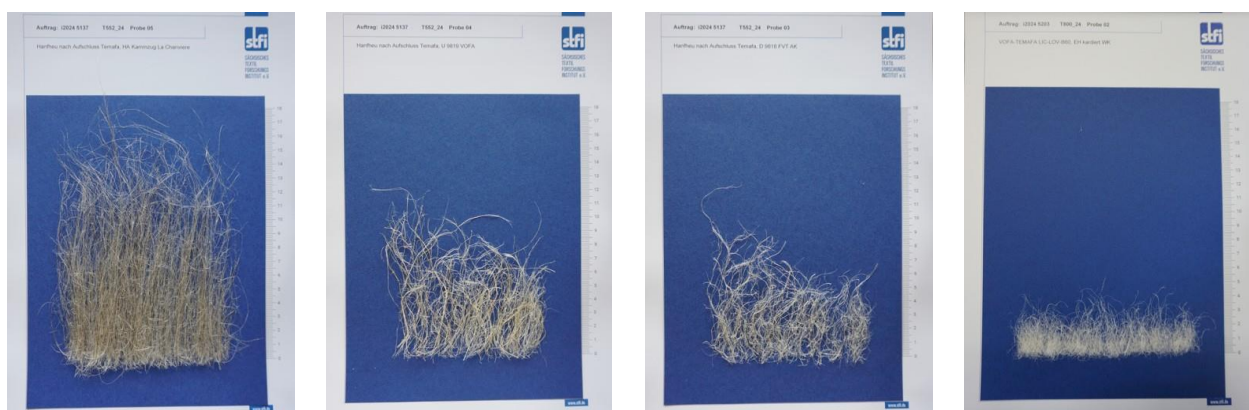


Abbildung 23 Endengeordnete Faserbärte (Probenvorbereitung für die Längenmessung am Almeter)

Bzgl. der Faserlänge war in allen Vergleichsvarianten mit Temafa-Feinaufschluss eine z.T. deutliche Einkürzung gegenüber dem Ausgangsmaterial (Säule 3) zu beobachten. Die Einkürzung ist gezielt über die Wahl der Ausgangsschnitlänge bei der Ernte bzw. die abschließende Klemmpunkteinstellung an der Cottonisiereinheit B60 beeinflussbar. Bei anschließend durchgeführter Degummierung, unabhängig von der Nassaufschlussvariante, war kein maßgeblicher Faserlängenabfall festzustellen. Kurzfasern werden hier ggfs. während des

⁷ Bobeth, W.: Textile Faserstoffe. Beschaffenheit und Eigenschaften. Berlin Heidelberg: Springer Verlag 1993
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-77655-7>

Spülvorgangs entfernt. Sobald Fasern für die Verspinnung mit Wolle aufbereitet werden, muss beim Feinaufschluss jegliche Einkürzung vermieden werden, um ausreichende Ausgangsfaserlängen (> 80 ... 120 mm) für den nachfolgenden Kämmprozess bereitstellen zu können.

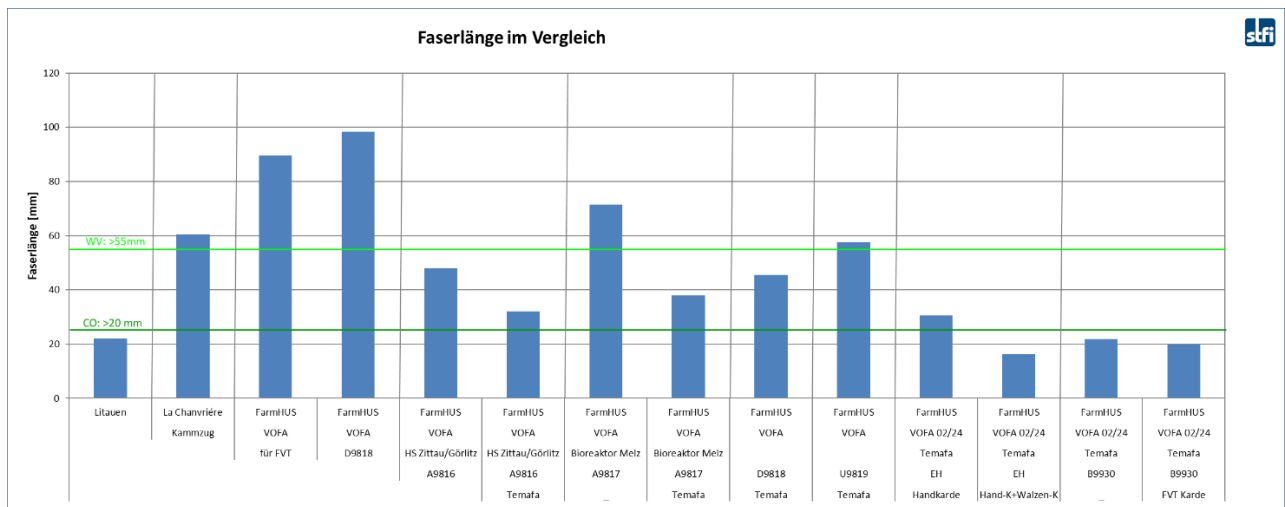


Abbildung 24 Faserlänge der getesteten Proben

Die erreichten Faserfestigkeiten (vgl. Abbildung 25) sind sowohl für den Woll- als auch für den Baumwollspinnprozess ausreichend. Hier kommt den Materialvarianten der ungeröstete Ausgangszustand zugute.

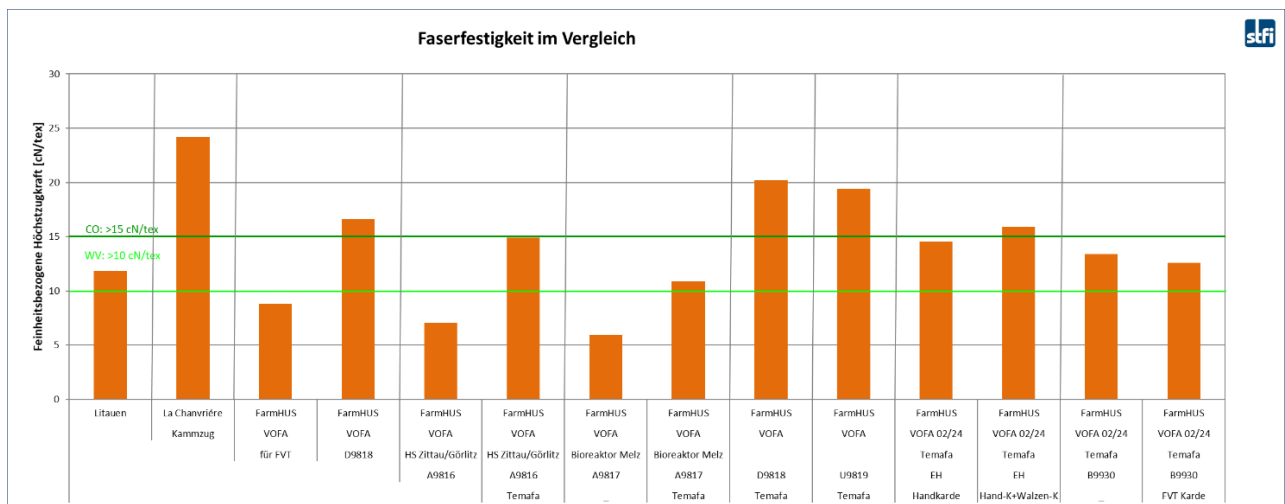


Abbildung 25 Faserfestigkeit der getesteten Proben

6.4.5 Versuche zur textilen Verarbeitbarkeit mit ausgewählten Faservarianten

Alle Faservarianten, die sowohl mechanischen Fein- als auch Nassaufschluss durchlaufen hatten, wurden am STFI hinsichtlich ihrer Verspinnbarkeit untersucht. Dazu wurde die mit gezielter Restfeuchte beaufschlagte jeweilige Faservariante zu Beginn ohne Mischungspartner kardierte (s. Tabelle 12). Im Ergebnis konnte mit allen getesteten Faservarianten ein Kardenband auf der Walzenkarde gebildet werden.

Tabelle 83 Kardierung ausgewählter Faservarianten (Walzenkarde STFI)

V-Nr.	Nassaufschluss	Nachbehandlung	Mischungsverhältnis
1	A9817	Melz / nur Wäsche	100 % HA
2	D9818	Abkochen FVT	100 % HA
3	EH	+B60/+Handkarde	100 % HA
4	B9930	-B60/ -Karde FVT	100 % HA
5	B9930	-B60/+Karde FVT	30/70 CLY/HA
6	B9930	-B60/+Karde FVT	70/30 CLY/HA

Aufgrund der begrenzten verfügbaren Mengen pro Variante wurde ein OE-Spinnversuch direkt angeschlossen. Dieser Spinnversuch fiel für die Versuchsvarianten 1 bis 4 (vgl. Tabelle 12) negativ aus – eine Rotorverspinnung aus 100 % HA in den jeweils vorliegenden Faserfeinheiten war nicht möglich. Daraufhin wurde für Versuchsvariante 5 eine Zumischung von 30 % Lyocell (CLY) realisiert. Die Bandbildung an der Karde gestaltete sich problemlos. Der 30-prozentige Mischungsanteil reichte jedoch für eine stabile Prozessführung noch nicht aus. Um eine solche abzusichern, wurden in Versuchsvariante 6 in die verbliebene B9930-Restfasermenge 70 % CLY zugemischt und kardiert. Für diese Versuchsvariante wurde eine Ausspinnngrenze von 48 tex (Nm 21) erreicht. Der Spinnprozess gelang ohne massive Fadenbruchhäufigkeit. Ausgangsmaterial, Garn- bzw. Strickmuster sind in Abbildung 26 zu sehen.



Abbildung 26 – Faserprobe B9930 / OE-Garn 70/30 CLY/HA B9930 48 tex [Nm 21] / Kleinrundstricktest E26

6.5 Verfahrenskonzept einer Pilotanlage zum Hanffaseraufschluss

Für ein Verfahren zu Anbau/Ernte und erzeugernahem Aufschluss von Hanffasern für die textile Verwendung wird unter Berücksichtigung der im Projektverlauf untersuchten Realisierungswege folgendes Verfahrenskonzept (s. Abbildung 27) vorgeschlagen:

Verfahrenskonzept einer Pilotanlage

Für eine Pilotanlage zum erzeugernahen Aufschluss von Hanffasern für textile Verwendung wird unter Berücksichtigung der Realisierungswege folgendes Verfahrenskonzept vorgeschlagen:

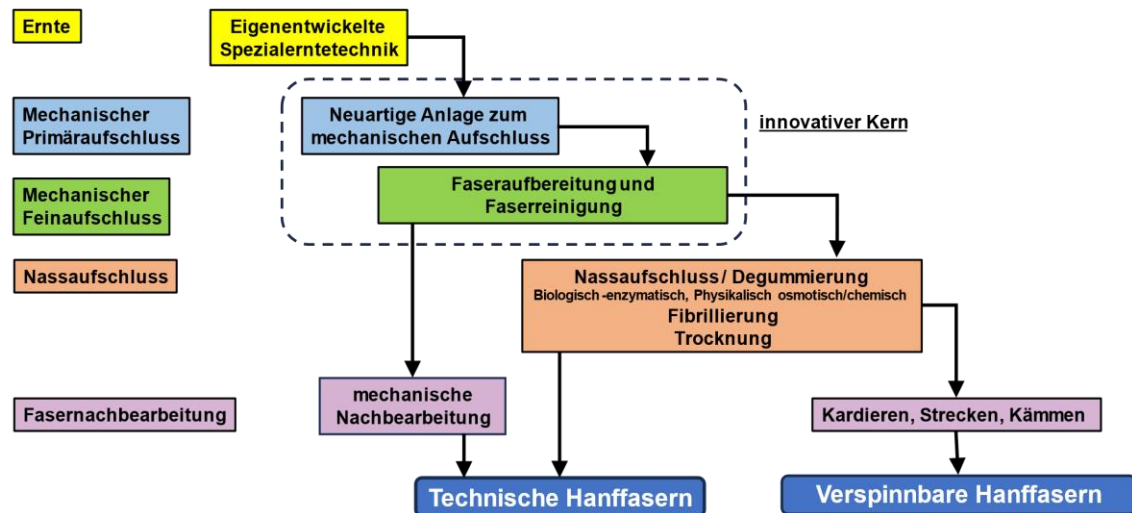


Abbildung 27 Verfahrenskonzept Hanffaseraufschluss

Die stufenweise Prozessführung erlaubt je nach Kundenanforderung zur Faserqualität die Entnahme von Fasermaterial nach jeder Verfahrensstufe. Der erzeugernahe Aufschlussbetrieb wäre flexibel und minimiert damit sein Absatzrisiko weitestmöglich (weniger Abhängigkeit von ausschließlich einer Branche, z.B. Automobilzulieferindustrie s. TWE GmbH & Co. KG/ehemals Isowood GmbH, Rudolstadt). Die auf den Nassaufschluss ggfs. folgende Kardierung zur Gewinnung cottonisierter Fasern sollte im Aufschlussbetrieb selbst erfolgen. Die Aufbereitung von Langfasern für die Wollspinnerei sollte (wie in Frankreich) in einer externen Kämmerei erfolgen. Zusätzlich zum Know-how ergeben sich dabei wirtschaftliche Vorteile (u.a. Mischpartien zum Bedarfsabruf durch die Spinnereikunden) durch die Nutzung langjähriger Kundenkontakte und bereits bestehender Absatzkanäle.

6.6 Schlussfolgerungen für den regionalen Aufschluss textil verspinnbarer Hanffasern

Im Ergebnis der Durchführung des Projektes können folgende verallgemeinernde Schlussfolgerungen für die Gestaltung der Anbau-, Ernte- und Aufschlussprozesse für verspinnbare Fasern von Industriehanf gezogen werden:

1. Die Qualität der zu gewinnenden Hanf(cellulose)fasern wird zu einem erheblichen Anteil durch den Anbau und die Verfahren für Ernte und Aufschluss beeinflusst.
2. In Abhängigkeit vom Gewinnungsziel kommen unterschiedliche Verfahren mit unterschiedlichen Zeitpunkten für die Ernte in Betracht. Mit Blühbeginn setzt eine Lignifizierung des Hanfbasts ein, was bei späterem Erntezeitpunkt der Hanfstängel zu weniger weichen Fasern führt und die Bedingungen für einen textilen Aufschluss verschlechtert. Für die Gewinnung feiner textiler Fasern sollte auf einen Erntezeitpunkt zum Blühbeginn der jeweiligen Sorte orientiert werden.

3. Unter Beachtung Pkt. 2 ist bei Koppelnutzung (Stroh und Samen) nicht mit einer Faserqualität der aufgeschlossenen Fasern – übrigens unabhängig von den angewendeten Rösteverfahren - im oberen textilen Level zu rechnen.
4. Die Versuche haben gezeigt, dass das Verfahren der Feldröste zu unsicheren und in Verbindung mit einer Koppelnutzung und der sich in der Region Mitteldeutschland (also insbesondere Sachsen und Thüringen) anzutreffenden Klimata zu komplizierten Röstbedingungen (wenig und unsichere Feuchte während der Röstezeit) und mit großer Wahrscheinlichkeit zu minderen Faserqualitäten führen kann. Die Verlängerung der Feldröste mit einer Feldliegezeit des Hanfstrohs über den Winter führt darüber hinaus zu Verpilzung und der akuten Gefahr qualitätsmindernder Überröstung der Fasern und in der Konsequenz auch nicht zu textilen Qualitäten.
5. Der an die Bergung des auf dem Feld gerösteten Hanfstrohs sich anschließende Erstaufschluss muss im Falle feldgerösteten Materials mit aufwändigen Aufschlussanlagen durchgeführt werden. Ein hoher Anlagenaufwand mit beachtlichen elektrischen Anschlusswerten für die Aufschlussmaschinen, hohe Anforderungen an Arbeits- und Explosionsschutz durch die unvermeidliche Staubentwicklung beim mechanischen Aufschluss führen zu hohen Anlagenkosten, die die Erzeugniskosten (Bastfasern) belasten.
6. Mit einem energieintensiven mechanischen Erstaufschlussverfahren besteht die Gefahr, dass die Reinigung der aufgeschlossenen Fasern von Schäbenbruchteilen nur unzureichend erfolgt, was ein erhebliches Risiko für die angestrebten Folgeprozesse der Garnbildung zur Folge hat.
7. Demgegenüber steht mit dem Verfahren der Grünentbastung der Hanfstängel durch ein innovatives Ernteverfahren, das die Risiken der Feldröste vollständig vermeidet, ein Gewinnungsverfahren zu Verfügung, das die beschriebenen Risiken von vornherein vermeidet.
8. Mit den Versuchen konnte der Nachweis erbracht werden, dass
 - die Gewinnung von entholzten Bastfasern (sog. „Hanfheu“) als Ausgangsmaterial für den Aufschluss von Hanffasern für Kurzstapelspinnerei gut geeignet ist.
 - dem mechanischen Aufschluss als Kombination von Primäraufschluss (auf dem Feld bei der Ernte oder anlagengestützt) und einem Feinaufschluss (Stufenreiniger, Feinauflöser, Cottonisierung/gezielte Einkürzung) eine besondere Bedeutung in der technologischen Kette mit dem Ziel der maximal möglichen Ausreinigung der ungerösteten Fasern zur Gewährleistung der Prozessstabilität zukommt.
 - sowohl durch chemischen als auch durch enzymatischen Aufschluss der Bastfasern Faserqualitäten erzeugt werden können, die hinsichtlich Faserfeinheit und –länge an die Anforderungen zur Erzeugung von qualitativ hochwertigen Mischgarnen mit Baumwolle, Lyocell oder Wolle heranreichen.
 - das Verspinnen von im Projekt aufgeschlossenen Hanffasern bisher nur im Kurzstapelspinnverfahren und in Mischung realisierbar ist. Für ein spezielles Aufschlussprodukt konnte ein Demonstrator-Mischgarn mit 70%Cly / 30% Ha mit einer Garnfeinheit Nm 20 (bis Nm 28) gesponnen werden, das anschließend verstrickt werden konnte.
9. In der Gesamtschau wurde das gesicherte Ergebnis erzielt, dass nach einem mechanischen Erstaufschluss und einem weiteren mechanischen Feinaufschluss zwingend ein Nassprozess zur Degummierung der Fasern und eine textile Nachbearbeitung der aufgeschlossenen Fasern erfolgen muss, um zu spinnfähigen Faserqualitäten zu kommen. Mit dem Nassprozess werden Pektine, Lignine und Hemizellulosen im erforderlichen Umfang aus den mechanisch fein aufgeschlossenen Bastfasern entfernt. Die weitere Untersuchung dieser Nassaufschlussprozesse mit dem Ziel eines gesicherten textilen Aufschlusses ist erforderlich. Nach bisherigem Stand konnte der Aufschluss bis zum Faserbündel, nicht aber (auch nicht mittels Kardierung) bis zur Einzelfaser erreicht werden.

10. Im Zusammenhang mit dem stufenweisen Aufbau einer erzeugernahen textilen Wertschöpfungskette ist es zweckmäßig, beginnend mit Investitionen in die Erntetechnologie einen stationären Faserfeinaufschluss zu installieren.

Der folgende Nassaufschluss und die nachfolgende textile Aufbereitung sollte in einem nachgelagerten Entwicklungsschritt investiert werden. Bis zu deren Wirksamkeit sind am Markt tätige Faserverarbeiter zu beauftragen bzw. die Wertschöpfung auf die Erzeugung und Lieferung entsprechend mechanisch aufgeschlossener Hanffasern zu begrenzen. Die Strategie zur Vorbereitung und Installation eines regionalen Wertschöpfungsentrums textile Hanffasern bedarf weiterer Entwicklungsleistungen unter Einbeziehung von Marktstudien.