



Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

Recycling von PES Stapelfasern aus Polycotton

Aktenzeichen 32004

Vorgelegt von:

RVN Textilrecycling Neuenmarkt GmbH

Dr. R. Casaretto Forschung-Umwelt-Farbe

Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University

Karl-Heinz Zeitler

Rainer Casaretto

Marie-Isabel Popzyk

Neuenmarkt, März 2016

06/02

1 Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32004	Referat	Fördersumme	73.219,00 €
Antragstitel		Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zum Recycling von textilen Mischgeweben (Polycotton) unter Berücksichtigung entfärbter Polyester-Stapelfasern und Erzeugung von Industrialkohol.		
Stichworte		Rückgewinnung von Polyesterfasern zum Verspinnen		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
18 Monate	1.10.2014	31.03.2016		
Abschlußbericht	März 2016			
Bewilligungsempfänger		RVN Recycling Verfahren Neuenmarkt GmbH NEUE Siedlung 27 95339 Neuenmarkt		Tel 09227 72743 Fax 09227 7379943 Projektleitung H. Zeitler Bearbeiter H. Zeitler
Kooperationspartner		RVN Recycling Verfahren Neuenmarkt GmbH (BE) Rainer Casaretto Forschung-Umwelt-Farbe Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen		
<p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p><i>Recycling von Stapelfasern aus Polycotton</i></p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p><i>Siehe Projektbeschreibung gemäß unseres Förderantrages.</i></p>				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de				

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
2.1	Hintergrund und Motivation des F&E-Vorhabens.....	2
2.2	Zielsetzung.....	3
3	Beitrag FUF- Hydrolytischer Abbau des Baumwollanteils und Rückgewinnung des PES-Fasermaterials	4
3.1	Charakterisierung des Ausgangsware und dessen Aufmachung.....	4
3.2	Hydrolyse.....	6
3.2.1	Allgemeines.....	6
3.2.2	Die Verarbeitungseigenschaften der verschiedenen Aufmachungsarten während der Hydrolyse.....	7
3.2.3	Die Herstellung des CO-Prä-Hydrolysates.....	9
3.2.4	Enzymatische Hydrolyse.....	11
3.2.5	Säurekatalytische Hydrolyse.....	13
3.3	Weiterverarbeitung der Hydrolysatlösung und Vergärung zu Ethanol.....	14
3.3.1	Vergärung zu Ethanol.....	15
3.4	Anfärbung des PES Anteils.....	15
3.5	Abwasserbehandlung.....	16
3.6	Verwendung des Baumwollhydrolysates als Substrat für Biogas-Anlagen.....	19
3.7	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Hydrolyse.....	20
4	Beitrag RVN	22
5	Beitrag ITA	25
5.1	Material.....	25
5.2	Maschinen.....	25
5.2.1	Laborkrempel.....	25
5.2.2	Feinöffner/Vliestone.....	26
5.2.3	Randvliesöffner.....	26
5.2.4	Stufenreiniger.....	26
5.2.5	UNIflex B 60.....	26
5.2.6	Industriekarde.....	27
5.2.7	MDTA3.....	27
5.2.8	Rotorspinnmaschine.....	27
5.3	Durchführung.....	28
5.3.1	Spinnereivorbereitung.....	28
5.3.2	Band- und Garnherstellung.....	30
5.3.3	Laborprüfungen.....	31

5.4	Ergebnisse	34
5.4.1	Fasermaterial	34
5.4.2	Spinnereivorbereitung	34
5.4.3	Band- und Garnherstellung.....	36
5.4.4	Laborprüfungen	38
6	Fazit.....	42
7	Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Projektplan	3
Abbildung 2: Schematische Struktur Cellulose	6
Abbildung 3: Allgemeine Formel Hydrolyse Cellulose.....	6
Abbildung 4: Spaltausbeuten saure Hydrolyse bei variablen Bedingungen	13
Abbildung 5: Hydrolyselösung links vor und rechts nach Behandlung mit Eisenspänen 17	
Abbildung 6: Absorptionsverlauf am Absorptionsmittel	17
Abbildung 7: Desorptionsverlauf am Absorptionsmittel.....	17
Abbildung 8: Links vor, rechts nach absorptiver Reinigung.....	18
Abbildung 9: Orcan Anlage.....	19
Abbildung 10: Abbaugeschwindigkeit von Stoffgruppen	20
Abbildung 11: Rotorgarn der Charge 3.....	38
Abbildung 12: Mikroskopieaufnahme des Fasermaterials aus Charge 1 vor der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle (links) und da-nach (rechts)	39
Abbildung 13: Gewebe des Recyclingmaterials der Charge 2 vor der säureka-talytischen Zersetzung der Baumwolle (links) und danach (rechts)	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eingesetzte Enzyme und deren Arbeitsbereich.....	11
Tabelle 2:	Kombinationsschema enzymatische Hydrolyseversuche	12
Tabelle 3:	Garnitur der Walzen bei den Versuchen 1 bis 3.....	24
Tabelle 4:	Maschinenparameter Randvliesöffner, fein, Material Charge 1	28
Tabelle 5:	Maschinenparameter UNIflex B 60	29
Tabelle 6:	Maschinenparameter Randvliesöffner, grob u. fein, Material Charge 2 29	
Tabelle 7:	Maschinenparameter Rotorspinnmaschine, Material Charge 1	30
Tabelle 8:	Maschinenparameter Karde.....	31
Tabelle 9:	Maschinenparameter Rotorspinnmaschine, Material Charge 3.....	31
Tabelle 10:	Einstellungen der Rotorspinnmaschine.....	36
Tabelle 11:	Ergebnisse der Zugkraft- und Dehnungsprüfungen der unterschiedlichen Garne und eines Vergleichsgarns.....	39
Tabelle 12:	Ergebnisse der Gleichmäßigkeits- und Haarigkeitsprüfung der unterschiedlichen Recyclinggarne und Vergleichsgarne	40

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

a	Fläche der Abweichungen
A	Fläche des Rechecks
Abb.	Abbildung
CO	Baumwolle
CO-Prä-	Produkt aus der Vorhydrolyse der Baumwolle Hydrolysat
CV	CV-Wert
FV	Flottenverhältnis bzw. das Mengenverhältnis von Ware zu Wasser
Fluor-	Polytetrafluorethylenderivate zur wasser-/ölabweisenden Ausrüstung
GFK	Glasfaser verstärkte Kunststoffe
H	Haarigkeit
HCl	Salzsäure oder Chlorwasserstoff-Säure
HZK	Höchstzugkraft
I	Ungleichmäßigkeitsindex
L	Länge der Messprobe
m_c	Masse der Messprobe
PES	Polyester (Polyethylenterephthalat)
rPES	recyceltes PES
PP	Polypropylen
s	Standardabweichung
T_{tc}	Feinheit der Messprobe
U	Ungleichmäßigkeitswert
V_{Abzug}	Abzugsgeschwindigkeit
vCO	virgin CO
V_{Einzug}	Einzugsgeschwindigkeit
V_{Rotor}	Rotorgeschwindigkeit
x	Mittlere Garnmasse

Verzeichnis der Begriffe und Definitionen

Faseröffnung

Faseröffnung ist die Vereinzelung von mehreren zusammenhängenden Fasern zu Einzelfasern.

Spinnereivorbereitung

Spinnereivorbereitung bezeichnet die Prozessschritte der Faseraufbereitung von der Faserflocke zum Faserband.

Spinntechnologie

Spinntechnologie ist die Garnherstellung, bei welcher durch Drehungseinbringung eine Verfestigung im Faserband erreicht wird.

2 Zusammenfassung

In dem Forschungsvorhaben „Recycling von PES Stapelfasern aus Polycotton“ (Aktenzeichen 32004) wird ein Verfahren entwickelt zum Recycling von Mischgeweben aus Polyester (PES) und Baumwolle (CO), sogenanntem Polycotton-Gewebe, die vorwiegend aus der Produktion von Berufskleidung stammen. Ziel ist die Rückgewinnung von homogenen Polyesterfasern aus diesen Mischgeweben und ihrer Weiterverarbeitung.

Das neuentwickelte Verfahren beinhaltet das Herauslösen der CO-Komponente und der Wiederaufbereitung der PES-Komponente zu neuen Garnen. Es werden drei unterschiedliche Aufarbeitungsvarianten für die erste Aufbereitung des Recyclingmaterials untersucht. Zur Hydrolyse der CO wurden sowohl klassisch-chemische als auch enzymatische Verfahren erprobt. Zur Vorbereitung wurde das Polycotton-Gewebe mittels Recyclingmaschinen geöffnet. Anschließend erfolgten eine zweistufige Hydrolyse der CO exemplarisch in allen drei Aufmachungen, die Separierung der PES-Faser und deren Weiterverarbeitung zum Garn. Aus der ersten Stufe wurde ein Prä-Hydrolysat gewonnen, welches als wertvoller Rohstoff für farbige Pigmentderivate dienen kann. Die Vergärung der vollständig hydrolysierten CO zu Ethanol wurde untersucht und mehrere Varianten einer abschließenden Abwasserbehandlung entwickelt und angewandt. Die Versuche bildeten erste Untersuchungen im industrieähnlichen Maßstab ab, die erste Erkenntnisse für Folgeprojekte im industriellen Maßstab lieferten.

Die Weiterverarbeitung der recycelten PES-Fasern (rPES) beinhaltete zunächst die Spinnereivorbereitung mit der Faseröffnung auf unterschiedlichen Maschinen mit anschließender Bandherstellung. Die Garnherstellung erfolgte auf einer Rotorspinnmaschine.

Die Projektergebnisse zeigen, dass die CO-Komponente vollständig aus dem Polycotton-Gewebe mit dem neuen Verfahren herausgelöst werden kann. Außerdem ist dieser entwickelte Recyclingprozess für Mischgewebe geeignet, um PES-Fasern schonend wiederzugewinnen und zu einem neuen Garn auszuspinnen. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse, dass verbliebene Garnreste im neuausgesponnenen Garn, die Garnfestigkeit erheblich herabsenken. Durch eine Faseraufbereitung mittels Industriekarde können diese Garnreste jedoch problemlos aus dem recycelten Faserflocken herausgelöst bzw. geöffnet werden.

Der Recyclingprozess lässt sich, im Sinne einer Kreislaufwirtschaft, als abwasserarme oder sogar abwasserfreien Prozess führen, bei dem die entstehenden Produkte zu einem sehr Prozentsatz genutzt werden können.

3 Einleitung

Dieser Abschlussbericht ist im Hauptteil in drei Unterabschnitte aufgegliedert, die den Beitrag des jeweiligen Projektpartners beinhalten. Des Weiteren werden die Materialien, die genutzten Maschinen und Verfahren, die Durchführung sowie die Ergebnisse näher beschrieben bzw. diskutiert. Den Abschluss bildet ein Fazit mit einem Ausblick für die Weiterverfolgung des Forschungsthemas.

3.1 Hintergrund und Motivation des F&E-Vorhabens

Der Lebenszyklus von Textilien, beginnend mit der Erzeugung der textilen Fasern und endend mit der Entsorgung nicht mehr verwendbarer Bekleidung, ist immer noch eine offene Wunde in der textilen Kette.

Studien und Marktanalysen zeigen, dass jeder Mensch pro Jahr zwischen 7 und 8 kg pro Jahr verbraucht (interne Kommunikation Fa. DyStar Singapore Pte Ltd, Singapur, 2009) und dieser Wert fast konstant ist. Weltweit entsprach dies 2012 etwa 56 Mio. Tonnen neuen Textilien pro Jahr.

Große Mengen natürlicher Ressourcen werden verbraucht und meist endet ein textiles Material am Ende seines Weges in der Verbrennung. Die Motivation des Projektes bestand darin eine Vorstellung zu entwickeln ob es möglich ist einen bestimmten Artikel, der in besonders großen Mengen produziert wird, stofflich zu verwerten. Ausgewählt wurde hierfür das Polycotton, einer Fasermischung die besonders häufig im Arbeitsschutzbereich, aber mittlerweile auch immer mehr im Bekleidungsbereich anzutreffen ist. Polycotton ist eine Mischung von 40-50 % Baumwolle und 50-60 % PES, eigentlich Polyethylenterephthalat. Die Mischung ist beliebt wegen seiner Strapazierfähigkeit und Langlebigkeit, was sich unter anderem auch auf die Industriegewäsche bis 95°C und bis pH 14 bezieht. Durch die Verzwirnung der Baumwoll- und der PES-Komponente ist es nicht ohne weiteres möglich zumindest einen der beiden Materialien wieder sortenrein zu gewinnen. Polycotton wird heute in Mengen zwischen 14 und 18 Mio. Tonnen produziert, was etwa 25 % des Faserverbrauchs an PES-Faser charakterisiert (Quelle: interne Kommunikation Fa. DyStar Singapore Pte Ltd, Singapur 2014)

3.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes war es Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung der 50/50 Mischung aus Baumwolle und PES aufzuzeigen, um in einer zweiten Antragsphase diese entwickelten Verfahren im industriellen Maßstab anzuwenden. Entscheidender Schritt dabei ist die Trennung des Celluloseanteils von der Polyesterfaser. Die gewonnenen, sortenreinen Polyesterstapelfasern werden durch geeignete Spinnverfahren, wieder zu werthaltigen Garnen verarbeitet. Ein stofflicher Zugewinn wird durch die Verwertung des abgetrennten Celluloseanteils durch die Umwandlung zu Ethanol erzielt. Dabei werden umweltgerechte Verfahrenswege entwickelt und Prognosen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses im technischen Maßstab entwickelt. Daraus ergibt sich folgendes Verfahrensschema:

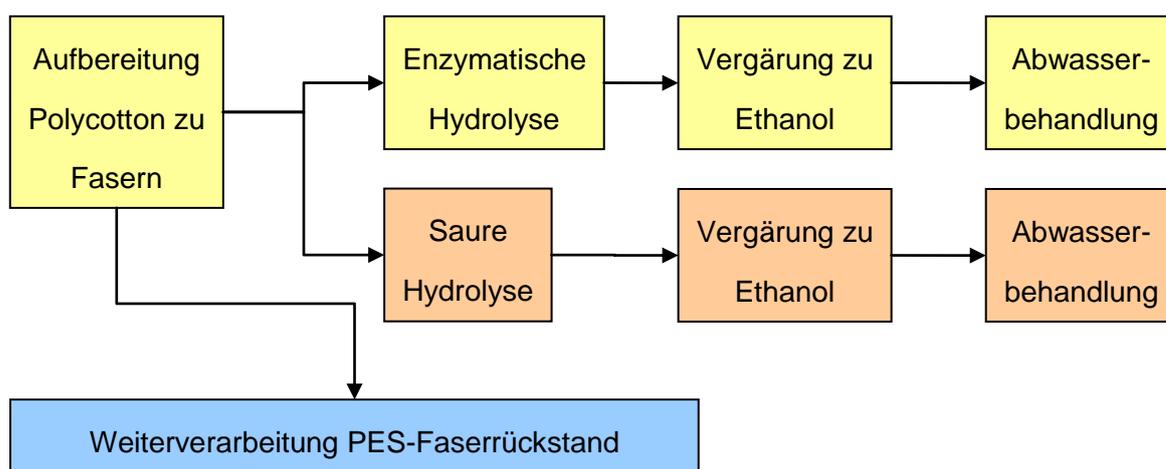


Abbildung 1: Schematischer Projektplan

4 Beitrag FUF- Hydrolytischer Abbau des Baumwollanteils und Rückgewinnung des PES-Fasermaterials

4.1 Charakterisierung des Ausgangsware und dessen Aufmachung

Industriell anfallende Reste am Polycotton, einer Wortkombination von Polyester und Cotton (Baumwolle) fallen in großen Mengen bei der Konfektion von Geweben und Gestriken an. Die Mischungsverhältnisse von PES (eigentlich PET) und Baumwolle liegen im Bereich von 40-70 % PES Anteil, wobei eine 50:50 Mischung zu den häufigsten Artikeln zählt. Es handelt sich dabei meist um einen hochgedrehten Zwirn aus einem Baumwoll- und einem Polyesterfaden, der nach der Herstellung nicht mehr mechanisch in die Einzelkomponenten aufzutrennen ist. Bei der Konfektion der Stoffe zu Bekleidung werden Stoffbahnen übereinander gelegt und die optimale Materialausnutzung durch Erstellung eines 1:1 Papierplots auf der Oberseite realisiert der die Konturen der Bekleidungskomponenten trägt. Diese werden dann präzise mit den übereinander gelegten Bahnen ausgeschnitten. Selbst bei optimal ausgeführter Konfektion fallen zwischen 8 und 15 % Verschnittreste an, die bisher von der Recyclingwirtschaft zu Vliesen umgearbeitet werden. Einer der Hauptabnehmer ist dabei die Automobilindustrie.

Der überwiegende Polycotton Anteil findet Absatz als Arbeitsbekleidung. Die Anforderungen an Arbeitsbekleidung sind sehr hoch und eine möglichst lange Lebensdauer des Artikels wird angestrebt. Die Artikel müssen mindestens 50 aber auch bis zu 200 Industriewäschen ohne weitgehende Veränderung von Farbe und Form überstehen. Insbesondere die Waschprozeduren sind, aufgrund der Waschttemperaturen und hohen pH-Werte während der Wäsche (pH 14, 95°C), extrem strapaziös. Je nach Einsatzzweck und Ort werden die Artikel nach der Veredlung noch mit verschiedenen Ausrüstungschemikalien behandelt. Häufig wird Arbeitsbekleidung zur Abweisung von Wasser und Öl mit Fluorcarbonpolymeren ausgerüstet, die irreversibel auf der Oberfläche der Ware vernetzt werden. Für PES bzw. BW werden Flammschutzmittel verwendet, welche sich in der Faser oder vernetzt auf der Faser befinden (z.B. Proban für BW) um die Flammre-

sistenz zu erhöhen. Zur Verringerung der statischen Aufladung finden antistatisch wirkende Substanzen Verwendung, welche als Wirkkomponente gerne kationische Produkte beinhalten.

Während der Herstellung der Gewebe finden weitere Präparationen Verwendung um die Qualität des Gewebes und Geschwindigkeit der Verarbeitung zu verbessern. Hierbei handelt es sich oft um Produkte auf Mineralölbasis.

All diese Stoffe können insbesondere bei enzymatischen Prozessen als Barriere oder Inhibitor für die Hydrolyse der Baumwolle zu Zuckern wirken. Vor allem kationische Produkte, wie die Antistatika, können enzymatische Reaktionen empfindlich stören.

Eine Soxlet-Extraktion der Ware mit Petrolether und anschließender Verdampfung zur Bestimmung der Restmenge zeigte, aufgrund der schwankenden Materialzusammensetzung bei der Probennahme, extrahierbare Auflagen im Bereich von 0,5-2,5%. Werte in dieser Größenordnung wurden auch erwartet.

Bei der Extraktion werden allerdings polymere Auflagen wie z.B. Fluorcarbone nicht entfernt. Der Baumwollanteil schwankte, je nach Probennahme, im Bereich von 48-52 % CO Anteil, so dass für die späteren Versuche ein CO zu PES Verhältnis von 1:1 angenommen werden konnte.

Die anfängliche Erscheinungsform des Rohstoffs besteht aus Gewebeabschnitten, Randstücken einer Warenbahn und Fäden in Längen und Breiten von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern. Für die folgenden Hydrolyse-Versuche wurden drei verschiedene Aufmachungsarten eingesetzt, die sich in der Art der Faserauflösung in Einzelfasern und Fäden unterscheiden. Ein Vorschnitt kürzt die längeren Gewebestücke in Abschnitte von 2-10 cm Länge bzw. Breite ein.

Die zweite Aufmachungsart löst das Gewebe weitgehend zu Einzelfasern auf, allerdings entsteht dabei auch ein Anteil von Einzelfäden und Anteile nicht aufgelöster Gewebeabschnitte bleiben zurück. Dies entspricht einer standardisierten Faserauflösung, wie sie zur Herstellung von Faservliesen eingesetzt wird. Es stellte sich heraus, dass die nicht aufgelösten Gewebestücke oft aus den Randbereichen der Gewebe stammen und keinen Baumwollanteil mitbringen. Bei der Herstellung der Gewebe wird gerne am Rande 100 % PES Anteil verwendet, einerseits um Kosten zu sparen und andererseits auch dem Gewebe beim Transport durch die Nadelstäbe in den Randbereichen mehr Stabilität zu verleihen. Bei der Auflösung in Einzelfaser ist für diese Gewebe-Randbereiche ein

deutlich höherer Energieeintrag und verlängerte Bearbeitungszeit erforderlich, weswegen solche Randbereiche gerne in kleinen Anteilen zurück bleiben. Der Anteil dieser größeren Reststücke liegt bei 2-3 % und ist, zumindest für die Hydrolyse, unproblematisch.

Bei der dritten Variante wird ein hoch aufgelöstes Fasermaterial erzeugt, bei welchen auch viele Faden in Einzelfasern konvertiert werden. Das Material hat ein sehr hohes Volumen bei geringem Gewicht. Gewebereste sind nicht mehr sichtbar. Das sehr hohe Volumen bleibt auch während der Hydrolyse erhalten und belastet die Raum-Zeit-Ausbeute. Diese Art der Aufmachung begünstigt allerdings deutlich die nachfolgende Kardierung und Verspinnung.

4.2 Hydrolyse

4.2.1 Allgemeines

Baumwolle enthält einen hohen Anteil von Cellulose, der bis zu 90 % betragen kann. Die Faser besteht weitgehend aus einem polymeren Gerüst von Kohlehydraten der allgemeinen Formel:

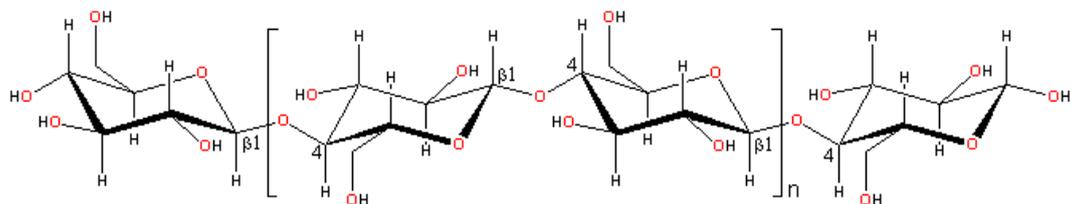


Abbildung 2: Schematische Struktur Cellulose

Grundbaustein ist die Cellulose, welches ein Polysaccharid mit variabler Kettenlänge und hoher Festigkeit bildet. Die Polymerisation kann wieder rückgängig gemacht werden durch Spaltung der β -1,4-glycosidischen Bindung mittels geeigneter Cellulasen oder durch Einwirkung starker Mineralsäuren. Unter Verwendung von Salzsäure ergibt sich beispielsweise folgende allgemeine Formel:



Abbildung 3: Allgemeine Formel Hydrolyse Cellulose

4.2.2 Die Verarbeitungseigenschaften der verschiedenen Aufmachungsarten während der Hydrolyse

Diesem Thema wurde speziell ein Unterkapitel gewidmet, da die Aufmachungsart einen ganz wesentlichen Einfluss hat auf die Prozessführung und die Prozessdauer. Zur Erzielung einer möglichst guten Raum-Zeit-Ausbeute versucht man das Verhältnis von Hydrolyselösung zu Wasser möglichst klein zu halten. Dem sind, aufgrund der Aufmachung, der Quellung der Baumwolle und der Raumbanspruchung des aufbereiteten Textils, Grenzen gesetzt. So lag das Verhältnis von Ware zu Hydrolyselösung zwischen 1:10 bis 1:25, je nach Aufmachung. In der Textilindustrie nennt man diese Zahl das Flottenverhältnis (FV).

Während der Versuche wurde zunächst der Weg beschritten die CO/PES Mischung direkt mit Säure zu hydrolysieren. Letztlich erwies sich dieser Weg als nicht zielführend, was im Detail in den folgenden beiden Unterkapiteln erläutert wird.

Der erste Prozessschritt besteht aus einer schonenden Vorhydrolyse der Faser Mischung zwecks Abtrennung der Baumwolle in Form eines fein verteilten Prä-Hydrolysates von den PES Faser bzw. dem PES-Gewebegitter.

Entscheidende Kriterien der Prä-Hydrolyse sind dabei:

- Erzeugung eines feinverteilten CO-Faserpulvers durch mechanische Agitation,
- Walken der zurückbleibenden PES Fasern zu möglichst quantitativer Trennung beider Komponenten voneinander,
- Zerbrechen der vorgeschädigten Baumwolle durch Bewegung,
- Möglichst quantitative mechanische Separierung von partiell hydrolysierten Faserstoffen von der zurückbleibenden PES Faser,
- Entwicklung einer Methodik zur Isolierung des CO-Prä-Hydrolysates zur Weiterverarbeitung,
- Möglichst hohe Ausbeute bei der Rückgewinnung der Hydrolysemischung.

Die Bewegung der Ware ist essentiell zur Freisetzung des pulvrigen und leicht isolierbares CO-Prä-Hydrolysates und in dem Zusammenhang wurden verschiedene Methoden getestet um möglich schnell und effektiv eine möglichst gute Trennung der CO und PES Komponente zu realisieren.

Eine Methode ist das klassische Rührverfahren, bei dem ein Überkopfrührer eingesetzt wird um die Ware zu durchmischen. Es wurden zahlreiche verschiedene Rührergeometrien getestet, angefangen von Flügelrührern, über Löffelrührer, Stabrührer und schraubenförmigen Rührern. Es zeigte sich, dass Löffelrührer als auch Stabrührer mit einer J-Form dieser Aufgabe am bestens gewachsen waren. Zwei der Rührer wurden extra angefertigt für diesen Zweck und mit einem PVC Überzug, als Korrosionsschutz, versehen.

Textilien, vor allem in Form von nassen Fasern, haben die Eigenschaft aneinander zu haften, zu verfilzen und damit muss das Rühraggregat viel Arbeit leisten. Vor allem der J-förmige Rührer passiert die Fasern bzw. Gewebeabschnitte recht gut und sorgt so für die erforderliche Mechanik im Fasermaterial.

Am besten geeignet hinsichtlich der Raum-Zeit-Ausbeute das nur grob vorgechnittene Material. Es ließ sich gut Rühren und der Zeitbedarf für die Hydrolyse war trotzdem etwa 10 % niedriger als bei den anderen beiden, faserigen Materialien. Diese ließen sich erst durchgreifend Rühren, wenn die Hydrolyserate zu fein verteiltem Prä-Hydrolysat bei mehr als 50 % lag. Es handelt sich hier um einen reinen Verdünnungseffekt, da weniger Fasermaterial bezogen auf das Volumen der Hydrolyselösung bewegt werden muss.

Bei dem standardmäßig aufgelösten Fasermaterial war das untere FV 1:20 und beim fein verteilten Fasermaterial musste es auf bis zu 1:25 angehoben werden, was letztlich höhere Kosten verursachen würde. Bei einer optionalen Fortführung des Projektes würde das grob geschnittene Material favorisiert werden, da hier die beste Raum-/Zeitausbeute erzielt wurde und gleichzeitig die Feinauflösung der Faser auf dem Wolf beim Textilrecycler voraussichtlich mit geringerem Energieaufwand möglich wäre.

Während bei der Ausgangsmischung im Gewebe noch dicke Garne und eine weitgehend geschlossene Struktur sichtbar sind, kann mit dem PES Gitter nach der Hydrolyse ein deutlich schlankeres Garn hergestellt werden.

Aus der Entwicklung ergaben sich Überlegungen und erste Versuche auf das Rühren als Methode völlig zu verzichten und einen Stampfmechanismus zu verwenden, der durch Walkbewegungen das Prä-Hydrolysat aus den Gewebeabschnitten walkt. Vorversuche zeigten, dass diese Methode sehr vielversprechend vor allem für größere Batches sein könnte. Die Ausbeuten an Prä-Hydrolysat waren im Labormaßstab nur unwesentlich geringer als beim Rühren und lassen

sich durch Optimierungsmassnahmen aufholen. Ein weiterer Vorteil wäre die Möglichkeit das Prä-Hydrolysat kontinuierlich abzuziehen, die Dispersion zu filtern und wieder dem System zuzuführen. Damit ließe sich die Zeit für die Filtration einsparen und die Menge an zusätzlichem Waschwasser würde reduziert. Angedacht sind im Produktionsmassstab Batch-Größen von min. 500 kg CO-PES Mischung im Ballen.

4.2.3 Die Herstellung des CO-Prä-Hydrolysates

Als Eingangsbemerkung ist festzustellen, dass die Bedingungen der Hydrolyse nativer Cellulose nicht mit der Hydrolyse der gefärbten Baumwolle vergleichbar sind. Die Behandlung ist grundsätzlich länger und intensiver, vor allem hinsichtlich der Behandlungstemperaturen. Dies gilt schon in der ersten Behandlungsstufe, der Bildung des Prä-Hydrolysates und vor allem während des hydrolytischen Abbaus zu Zuckern.

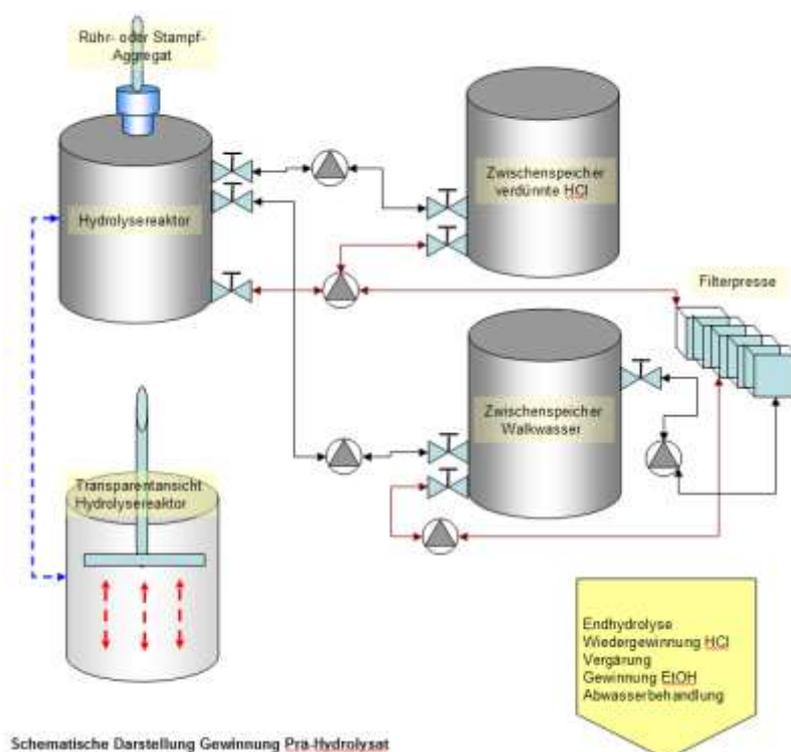


Abbildung 4: Schematische Darstellung Gewinnung CO-Prä-Hydrolysat

Wie oben bereits beschrieben erwies sich nach mehreren Versuchen die direkte Hydrolyse der Baumwolle aus der CO/PES Mischung als ein nicht gangbarer Weg. Selbst bei mittleren Säurekonzentrationen von 10 % HCl wurde die PES deutlich geschädigt. Das resultierende Fasermaterial wurde brüchig und damit

zur Weiterverarbeitung ungeeignet. Bei verdünnter Salzsäure tritt, selbst bei Temperaturen von 85-90°C, das Problem nicht auf. Die Festigkeit der PES Faser blieb vollständig erhalten, einzig die Bruchdehnung sank um etwa 10 % ab. Damit können die mechanischen Eigenschaften der ansonsten auch mit Säuren hydrolysierbare PES Faser erhalten und die Baumwolle abgetrennt werden.

Im Unterschied zum ursprünglichen Verfahren ergibt sich ein verändertes Verfahrensschema bezüglich der Gewinnung des CO-Prä-Hydrolysates (Abbildung 4).

Es resultierte ein graubläuliches CO-Pulver, welches durch Filtration isoliert werden kann. Zur Abtrennung restlicher PES Faser wurde das Baumwoll-Wasser Gemisch über ein Glasfasertuch filtriert, welches das feine Prä-Hydrolysat glatt passiert. Die Ausbeuten des Prozesses sind sehr gut reproduzierbar und lagen bei über 95%, bezogen auf einen mittleren Baumwollanteil von 50 %. Durch die geringe Wasseraufnahme des PES Restgewebes kann auch die verdünnte Salzsäure mit hoher Ausbeute wieder gewonnen werden. Probeweise wurde die verdünnte Salzsäure bis zum Trocknen eingeeengt und die Menge der gelösten Substanz gemessen. Demnach werden nur 1,2-1,4 % der Baumwolle in lösliche Bestandteile konvertiert. Da die Säurehydrolyse ein katalytischer Prozess ist und wenig Bestandteile in Lösung gehen, kann der Prozess rechnerisch bis zu 25 mal mit derselben verdünnten Salzsäure durchgeführt werden, bevor sich eine Aufarbeitung lohnt. Im Labor wurde dies dreimal mit derselben Hydrolyselösung getestet mit vergleichbaren Ausbeuten an Prä-Hydrolysat.

Ein sehr angenehmer Nebeneffekt der sauren Vorhydrolyse, sowohl für die enzymatische als auch für die säurekatalytische Hydrolyse, ist der sehr weitgehende Abbau der Farbigkeit der Baumwollkomponente. Die wenigsten Textilfarbstoffe überstehen die gewählten Bedingungen und werden speziell durch Hydrolyse der Azogruppe im Molekül entfärbt. Daraus resultierte eine deutlich vereinfachte Prozedur bei der Abwasserreinigung durch eine kaum vorhandene Restfarbigkeit nach der weitgehenden Hydrolyse der Cellulose zu Zuckern. Die wässrige Lösung zeigt einen honigfarbenen, gelb-braunen Farbton und einen leicht süßlichen Geruch. Das Restgewebe oder die Restfasern wurden noch 2-3 dreimal gewalkt, um anhaftenden Baumwollstoffe weitmöglichst zu entfernen. Dabei kann auch die Walklösung, nach Absetzen des CO-Prä-Hydrolysates, immer wieder verwendet werden. Sinnvoll ist es ein Neutralisationsbad am Ende der Prozedur zu verwenden um das CO-Prä-Hydrolysat für Folgeprozesse leichter handhaben zu können. Wie sich im Projektverlauf herausstellte, könnte dieses Prä-Hydrolysat in

Substanz und mit seinen Derivaten in einem Folgeprojekt der Schlüssel sein zur Maximierung des wirtschaftlichen Ergebnisses dieses Recyclingprojektes.

4.2.4 Enzymatische Hydrolyse

Zum enzymatischen Abbau von Cellulose gibt es bereits umfangreiche Literatur, da eine Reihe von Entwicklern darin eine Variante zur Lösung des Problems der Treibstoffversorgung in Zukunft sehen. Forscher arbeiten vor allem an der Hydrolyse schnell nachwachsender Biomasse wie Seegrass und Algen. In diesem Zusammenhang werden Systeme von Enzymen entwickelt, die konzentriert Biomasse verschiedener Art in der Lage sind zu hydrolysieren.

Tabelle 1: Eingesetzte Enzyme und deren Arbeitsbereich

Musterbezeichn.	Enzyme Typ	Empf. Menge	pH Bereich	T.-bereich [°C]	Herkunft
NS 29061	Cutinase	0,1-1,0%	8,0-10,0	70-80	Novozym
NS 59001	Endo- Cellulase	0,2-0,8%	6,0-11,0	20-60	Novozym
NS 59023	Pectinase, Cellulase hemicellulase blend	0,1-0,5%	3,5-5,5	30-50	Novozym
NS 59033	Endo-Cellulase	0,1-1,0%	5,5-11,5	20,65	Novozym
NS 59027	Endo-Xylanase	0,1-1,0%	4,5-5,5	40-50	Novozym
NS 59030	Lipase	0,1-0,5%	6,5-11,5	20-65	Novozym
NS 59026	Endo- and Exocellulase blend	0,2-2%	4,0-6,0	40-60	Novozym
NS 59029	Protease	0,1-0,5%	6,0-8,0	40-50	Novozym
NS 59032	Protease	0,2-1%	6,5-11,5	20-45	Novozym
NS 59028	Cellobiase (beta Glucosidase)	0,1-0,5%	2,5-6,5	45-70	Novozym
NS 59031	Endo-Xylanase	0,1-0,5%	6,5-7,5	30-50	Novozym
NS 59025	Endo-Cellulase	1-4%	5,0-8,0	50-60	Novozym
NS 59006	Endo-Cellulase	0,3-2%	5,0-8,0	35-55	Novozym
Rucolase	Enzymgemisch vom Typ Trichoderma Resei	1-3%	4,5-6,5	45-55	Rudolf Chemie

Zur Entwicklung einer enzymatischen Hydrolyse wurden in ersten Linie spezifische Enzyme der Fa. Novozymes A/S, Dänemark verwendet, sowie ein Enzymgemisch der Fa. Rudolf Chemie GmbH, Geretsried, welche ein technisches Produkt zu enzymatischen Oberflächenveredlung darstellt. Dabei wurden die in Tabelle 1 genannten Enzyme verwendet.

Die Enzyme arbeiten, wie oben ersichtlich, am besten in gewissen pH- und Temperaturbereichen, so dass nur bestimmte Enzymkombinationen sinnvoll sind. Basierend auf dem Eigenschaftsprofil der Enzyme wurden eine Anzahl verschiedener Kombinationen ausgewählt und vor allen die Reaktionszeiten variiert. Daraus resultierten unterschiedliche Hydrolyseraten, d.h. der Anteil der von dem Enzym oder der Enzymkombinationen hydrolysierten Mengen an Cellulose Prä-Hydrolysat. Es wurden, bedingt durch die erhaltenen Ergebnisse auch lange bis extrem lange Hydrolysezeiten von bis zu einem Monat getestet, was hinsichtlich

der Wirtschaftlichkeit natürlich nicht sinnvoll sein kann. Für die Hydrolysen im Sauren wurde ein 0,1m Citratpuffer verwendet, dessen pH-Wert nach Bedarf eingestellt wurde. Für die Hydrolysen im Alkalischen wurde ein Puffer aus 0,1 m Na_3PO_4 verwendet, dessen pH Wert mit NaH_2PO_4 eingestellt wurde.

Tabelle 2: Kombinationsschema enzymatische Hydrolyseversuche

Muster-bezeichnung	Kombinationen der enzymatischen Hydrolyse																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NS 29061	1%	1%								2%						1%				
NS 59001	1%			3%	3%											1%		1%	2%	
NS 59023											3%									2%
NS 59033		1%																		2%
NS 59027			2%					5%												
NS 59030																1%				
NS 59026														2%	2%		2%			
NS 59029									2%											
NS 59032										2%										
NS 59028												2%	2%							
NS 59031																	1%			
NS 59025			2%					5%												
NS 59006			2%					5%												
Rucolase																				
pH-Wert	9,3	10,3	5,5	6	6	5,5	5,5	5,5	6	9	4,5	4,5	6	5,5	5,5	9,5	5,5	6	9,5	5
Temperatur [°C]	60	60	50	60	60	55	55	55	50	45	45	60	55	55	55	60	55	60	60	50
Umsatzzeit [Std.]	72	72	288	9	16	168	720	20	48	96	72	72	72	96	96	96	120	96	96	120
Umsatzrate über Gesamtzeit [%]	7,30	6,00	18,00	2,90	4,80	18,00	38,50	13,00	5,10	7,70	17,5	6,3	8,5	7,5	8,7	8,1	9,5	19	8,2	19,5
Umsatzrate pro 24 Std. [%]	2,43	2,00	1,50	7,73	7,20	2,57	1,28	15,60	2,55	1,93	5,83	2,10	2,83	1,88	2,18	2,03	1,90	4,75	2,05	3,90

Die Spaltausbeuten wurden wie bei der säurekatalytischen Spaltung normiert auf eine Hydrolyserate von 24 Std. In der folgenden Übersicht wurden exemplarisch 20 Enzymkombinationen ausgewählt. Die Anzahl der gemachten Versuche ist allerdings höher. Um belastbare Ergebnisse zu bekommen mussten die Spaltzeiten stark ausgedehnt werden und auch die Empfehlungen der Hersteller erhöht werden.

Es ist ersichtlich, dass die Hydrolyseraten bislang nicht das gewünschte Maß in entsprechend kurzer Zeit erreichen. Der Zeitbedarf ist noch zu hoch und die enzymatische Hydrolyse der gefärbten Baumwolle noch nicht wirtschaftlich. Über mögliche Ursachen wird am Ende des Kapitels diskutiert werden.

4.2.5 Säurekatalytische Hydrolyse

Cellulose ist ein hocheffektiver, natürlicher Energiespeicher der Natur. Schon über ein Jahrhundert versucht man sich diesen Energiespeicher nutzbar zu machen, indem man über eine säurekatalytische De-Polymerisation wieder Zucker gewinnt um diesen vor allem zu Ethanol im Rahmen einer enzymatischen Vergärung konvertiert.

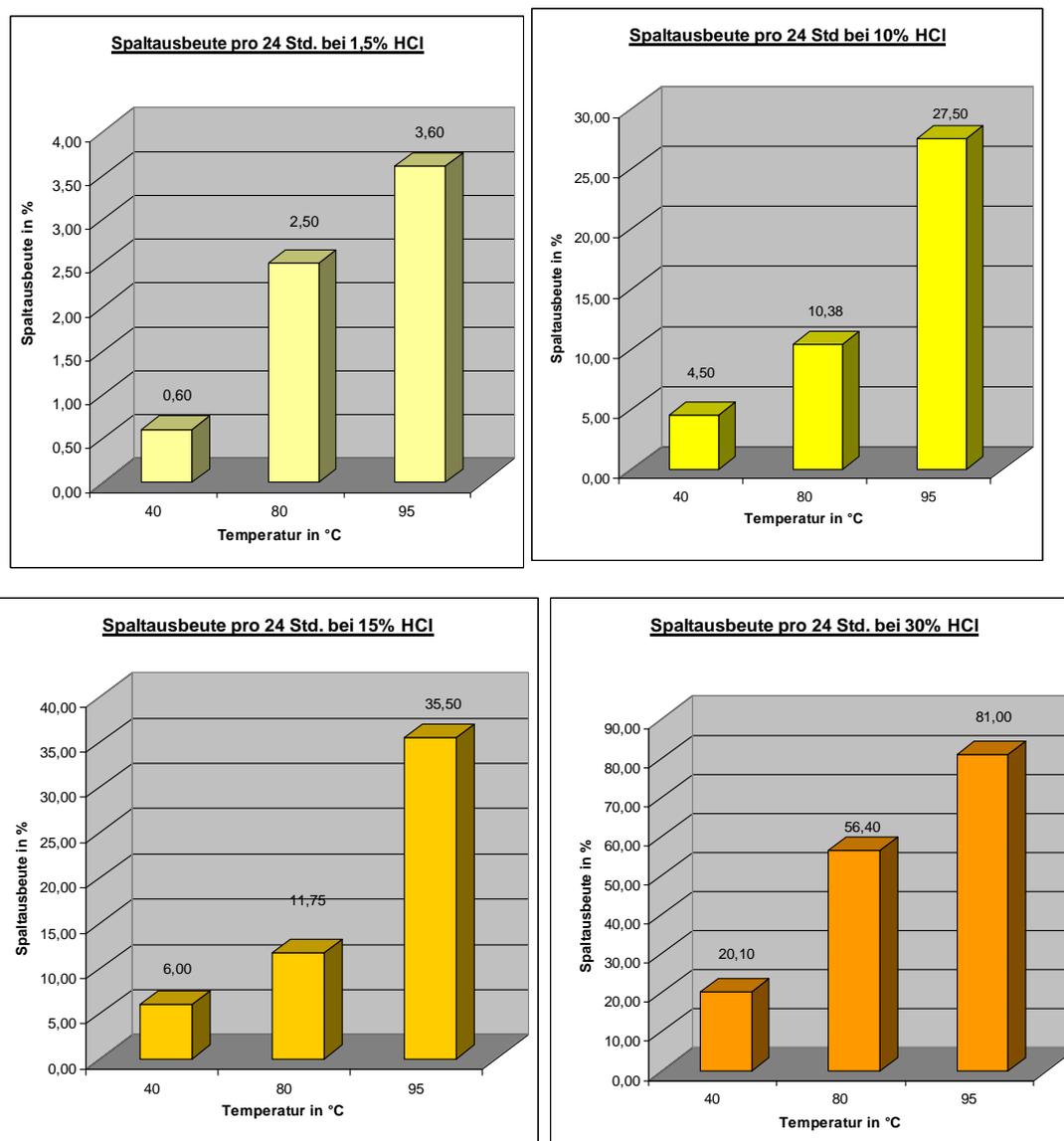


Abbildung 4: Spaltausbeuten saure Hydrolyse bei variablen Bedingungen

In diesem Projekt wurde, aufgrund der Möglichkeit zur Rückgewinnung der Säure, gezielt Salzsäure verwendet. Variiert wurde die Konzentration, angefangen mit derselben Salzsäurekonzentration die zur Vorhydrolyse der Baumwolle verwendet wurde. Weitere Variablen des Prozesses waren die Temperatur und die

Prozessdauer. Verwendet wurde das in der ersten Stufe gewonnene CO-Prä-Hydrolysat als standardisiertes Edukt.

Es wurde maximal eine Salzsäurekonzentration von nicht mehr als 30 % eingesetzt, um rauchende Säuren um erhöhte Sicherheitsanforderungen zu vermeiden. Alle Hydrolysen wurden mit mindestens 10 g und höchsten 100 g CO-Prä-Hydrolysat gemacht. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt um Schwankungen bei der Umsetzung durch Rührgeometrien und Temperaturschwankungen zu mitteln. Die Werte wurden, obwohl teils unterschiedliche Spaltzeiten verwendet wurde (Fehlerminimierung) auf eine Spaltausbeute von 24 Std. normiert.

Die Diagramme in Abbildung 4 zeigen die Spaltausbeute bei unterschiedlichen Temperaturen bei einer HCl-Konzentration.

Wie zu erwarten ist die Zunahme der Hydrolyserate mit der Konzentration der Säure und der Temperatur erkennbar. Es zeigt sich aber auch wie stabil die gefärbte Baumwolle im Vergleich zu nativer Cellulose ist, da höhere Temperaturen erforderlich sind um die Hydrolyse mit guter Ausbeute durchführen zu können.

Nach Filtration verbleibt ein schwarzer, unlöslicher Rückstand, der vor allem aus nicht hydrolysierten Baumwollanteilen, aber wahrscheinlich auch aus wasserunlöslichen Farbstoff-Abbauprodukten besteht. Diese entstehen vor allem aus gespaltenen Komponenten der Azofarbstoffe, aber auch aus zersetzten Küpenfarbstoffen. Solche Effekte sind bei Farbstoffherstellern hinlänglich untersucht worden, ohne allerdings veröffentlicht worden zu sein. Eine detaillierte Analyse hätte den Rahmen des Projektes verlassen und wurde nicht durchgeführt. Das Filtrat hat einen dunkelorange, honigartigen Farbton.

4.3 Weiterverarbeitung der Hydrolysatlösung und Vergärung zu Ethanol

Bei der enzymatischen Hydrolyse blieben die Spaltausbeuten so weit hinter den Erwartungen zurück, dass auf eine Weiterverarbeitung zu Ethanol, allein schon wegen der Mengen, verzichtet wurde. Daher wurde die Vergärung nur mit dem Produkt aus den Säurehydrolysen weiter geführt. Die HCl saure Lösung wurde bei 60-70°C im Vakuum vollständig eingedampft, bis eine honigartige, viskose Masse entstanden war. Diese wurde mit Wasser aufgenommen und der pH Wert auf pH 6 gebracht.

4.3.1 Vergärung zu Ethanol

Die Vergärung des Hydrolysats zu Ethanol ist ein etablierter Prozess und kann kurz beschrieben werden. Verwendet wurde zur Vergärung eine sogenannte Turbohefe, welche in der Lage ist einen Zuckeransatz innerhalb von 48 Std. vollständig zu vergären. Dabei hat die Hefe den Vorteil Ethanol Konzentrationen bis zu 20 % zu erzeugen und es ist nicht erforderlich anaerob zu arbeiten.

Im vorliegenden Fall wurde jeweils der Ansatz aus der Hydrolyse von 100 g CO-Prä-Hydrolysats in 500 ml Wasser aufgenommen und 2-3 g Turbohefe zugesetzt. Nach 48 Std. wurde der Ansatz direkt über eine Kolonne destilliert und Konzentration und Menge der Alkoholfraktion bestimmt. Aufgrund der Reinheit war dies recht genau durch Bestimmung des Brechungsindexes möglich. Hier wird bewusst auf aufwändige Analytik verzichtet, da die Umsetzungen im Produktionsmaßstab möglichst von einem Textilunternehmen ausgeführt werden soll, welches einfache Verfahren braucht, die im Produktionsalltag angewendet werden können. Der Brechungsindex ist hierbei noch eine einfache Lösung.

Aus mehreren Versuchen ergab, bezogen auf 1000 g Baumwolle, eine Ethanol Ausbeute von 200-410 g oder 20-41 %. Theoretisch wäre eine Ausbeute bis zu 60% möglich gewesen. Damit bleibt die Ethanol Ausbeute noch hinter den Erwartungen zurück, doch muss man berücksichtigen, dass alle Umsetzungen im Labormaßstab gemacht wurden und damit verlustreicher sind als in einem Produktionsprozess. Außerdem gibt es durchaus noch Optimierungspotenzial bei der Hydrolyse um die Ausbeute zu steigern.

4.4 Anfärbung des PES Anteils

Die Ausbeuten bei der Garnherstellung in der Spinnerei zeigten, dass es sinnvoller ist nicht direkt auf die PES/CO Mischung zu färben, sondern auf das fertige Garn. Beiden ist gleichwohl problemlos möglich. Der PES Anteil zeigte keine größeren Probleme bei der Anfärbung in dunklen Tönen, welche Farbunterschiede aufgrund der Feinheit der verschiedenen Fasern überdeckt. Selbst bei einem Garn aus 100 % Recycling PES war dies möglich, vor allem in den Farbtönen Navy und Schwarz. Durch Verdünnung der Fasermischung durch steigende Anteile von nativem PES werden sich die Farbunterschiede noch stärker verwischen, so dass sie ohne Analytik nicht mehr sichtbar sind.

Der Anteil an PES Oligomeren lag in Größenordnungen, welche man bei einem PES Material erwarten kann, welches ein zweites Mal gefärbt wird. Daher kann man feststellen, dass es keine Bedenken von der koloristischen Seite für die Verwendung des Recycling PES gibt.

4.5 Abwasserbehandlung

Bei der Abwasserbehandlung wird Bezug genommen auf die Teilströme die während der sauren Hydrolyse des CO-Prä-Hydrolysates entstehen.

Wie oben beschrieben, wird die Bildung des CO-Prä-Hydrolysates mittels einer verdünnten Salzsäure erreicht. Durch die geringe Hydrolyserate der Baumwolle unter diesen Bedingungen ist eine mehrfache Verwendung der Hydrolysatlösung problemlos möglich. Ab einer Zykluszahl im zweistelligen Bereich lohnt sich eine Aufarbeitung der Lösung, da erst dann der lösliche Hydrolysatanteil ausreichend hoch ist. Die Aufarbeitung wird in konventioneller Weise durch Verdampfung erst des Wassers und dann durch Rückgewinnung der konstant siedenden 10 n HCl. Beide Komponenten lassen sich wieder einsetzen. Im Verlauf der Aufkonzentration der Säure wird die Farbigekeit vollständig eliminiert. Es bleiben in Wasser unlösliche Bestandteile der Hydrolyse der Farbstoffe in Form eines schwarzen Niederschlages übrig, der sich über eine Filtration oder besser noch über eine Zentrifugation entfernen lässt. Der resultierende Rückstand wird nicht separat verarbeitet, sondern dem Produkt aus der Hydrolyse des CO-Prä-Hydrolysates vor der enzymatischen Umsetzung zugesetzt.

Sofern es erforderlich ist bereits die leicht gefärbte, verdünnte Säure zu entfärben gibt es die Möglichkeit die Farbigekeit durch Zusatz von Eisenspänen zur Salzsäuren Lösung direkt zu entfärben. Nach wenigen Stunden blieb nur die schwach gelbliche Restfärbung der bereits hydrolysierten Baumwolle übrig, wie auf der Abbildung 5 unten ersichtlich.



Abbildung 5: Hydrolyselösung links vor und rechts nach Behandlung mit Eisen­spänen

Die zweite Methode ist die Absorption der Farbstoffe an einem speziell von F-U-F entwickelten Absorptionsmedium. Die Farbstoffe werden dabei auf dem Material physikalisch gebunden und nach Sättigung des Absorptionsmittels wieder freigesetzt, wie auf der Abbildungsreihe unten ersichtlich.

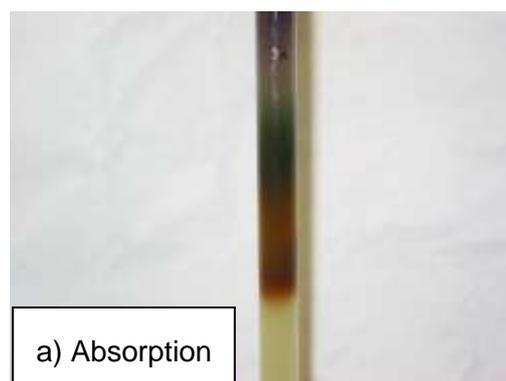


Abbildung 6: Absorptionsverlauf am Absorptionsmittel



b) Desorption



c) gereinigte Säule

Abbildung 7: Desorptionsverlauf am Absorptionsmittel

Es handelt sich hier um Absorptionsmittel die speziell auf bestimmte Reinigungsprobleme zugeschnitten sind und auf Selektivität bei der Absorption ausgelegt sind. Das Ergebnis ist vergleichbar wie bei der Reinigung mit Eisenspänen wie unten ersichtlich.



Abbildung 8: Links vor, rechts nach absorptiver Reinigung

Der große Vorteil dieser Methode ist, dass sie unabhängig von der Konzentration der Farbstoffe in der Lösung ist und „Creeping“, also das langsame Ausschwemmen des erst gebundenen Produktes nicht stattfindet.

Mit diesem Ansatz lassen sich voraussichtlich auch viele andere Reinigungsprobleme der Abwassertechnik lösen. Bei einer großen Anlage würden zwei Sammler im Tandembetrieb arbeiten, so dass der eine Sammler sammelt, während der andere Sammler sich im Regenerationsmodus befindet. Bei der Desorption entsteht eine Farbstofflösung mit einer Konzentration von bis zu 70 g/l.

Betrachten wir die Teilströme nach der Vergärung zum Alkohol und der destillativen Gewinnung von Ethanol bleibt eine gelblichbraune Lösung zurück, deren Farbigekeit nicht mehr von den Textilfarbstoffen stammt. Diese werden bereits bei der Hydrolyse der Baumwolle und der Abtrennung von Wasser und Salzsäure vollständig zerstört.

Zur Reduzierung der Abwasserfrachten wurde eine Fenton analoge Reaktion verwendet, bei der das Abwasser zusammen mit wenig Wasserstoffperoxid und viel Luftsauerstoff über Eisenspäne gesprüht und dort oxidiert. Dieses Verfahren wurde speziell für die Textilindustrie von der Fa. Tex-A-Tex entwickelt und erwies sich als sehr leistungsfähig. Heute gibt es nur noch eine laufende Anlage in Europa bei der Fa. Schoeller Textil AG, Sevelen, Schweiz.

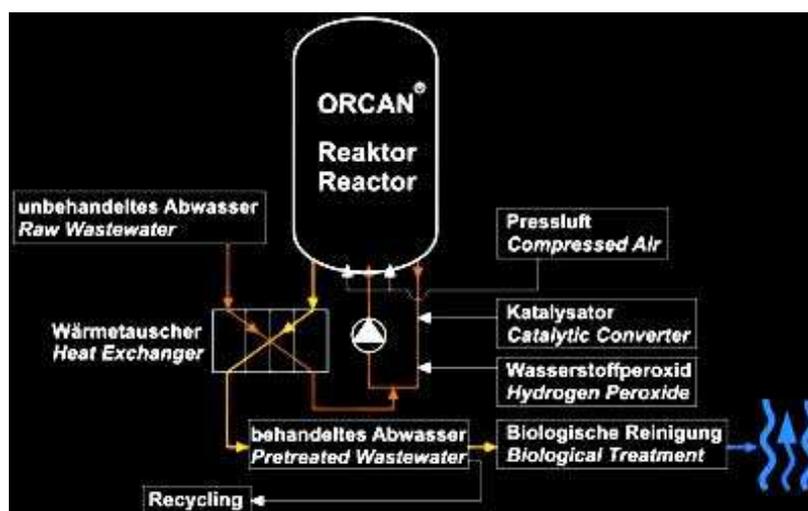


Abbildung 9: Orcan Anlage

Im großem Maßstab lagen die Behandlungskosten bei 0,25-0,35 €/m³ bei einer CSB Abbaurate von 95-97 %. Im Labormaßstab kann dieses Verfahren nur adaptiert angewandt werden, da die exotherme Reaktion bei der Oxidation größerer Schmutzfrachten den Prozess trägt. Dabei wurde die Abwassermischung zusammen mit erhitzter Luft über den Kontakt geleitet.

Zum Vergleich wurde der CSB Wert von und nach der Umsetzung bestimmt. Es zeigt sich, dass bereits im Labormaßstab ein CSB Abbau von 85 % und mehr möglich ist. Als alternative wirksame Variante des Orcan Verfahrens erwies sich die Kombination von Eisenspänen, einen Anteil von 10 % Abwasser aus der Vorhydrolyse als Säurespender und dem Rückstand aus der Alkoholdestillation.

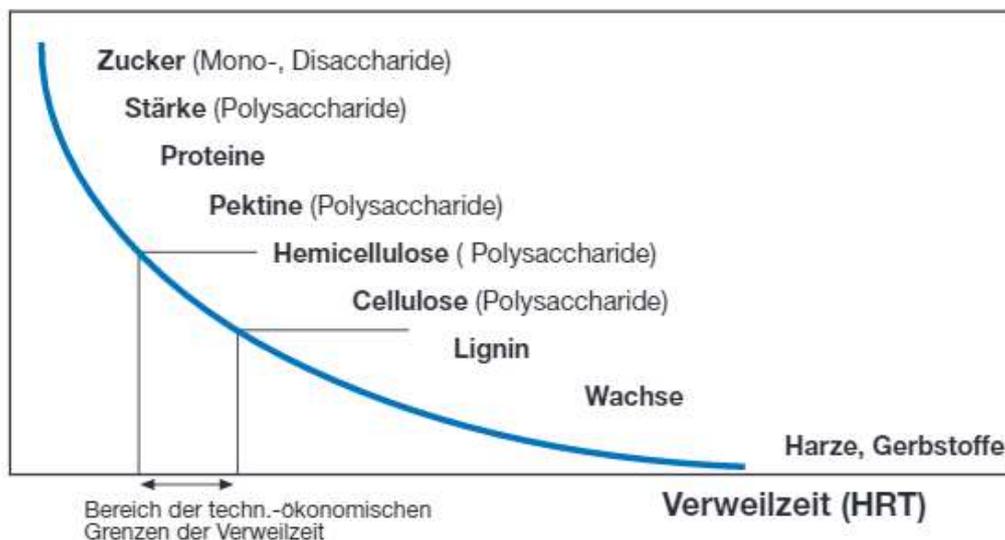
Als Alternative wurde eine Entfärbung mit einer UV-Tauchlampe getestet, was allerdings nicht erfolgreich war, da Effekte erst nach langer Belichtung sichtbar waren. Aufgrund der Zusammensetzung des Abwassergemischs und erheblichen Probleme durch Schimmel wurde auf die geplante Membranbehandlung verzichtet.

4.6 Verwendung des Baumwollhydrolysates als Substrat für Biogas-Anlagen

Nach Rücksprache mit Herstellern von Biogas-Anlagen können aussagefähige Ergebnisse für das entstandene Hydrolysat erst ab Mustermengen von mehreren Kilogramm gemacht werden. Diese Mengen waren im Labormaßstab nicht her-

stellbar und hätten deutlich den Rahmen des Projektes überschritten. Daher reduziert sich dieser Teil auf eine prinzipielle Betrachtung der Verwendbarkeit.

Zucker sind besonders effektive Energiespeicher, da sie sehr schnell z.B. in Methan umgewandelt werden können.



Quelle: Volmer, 1982 in Eder, Schulz 2006

Abbildung 10: Abbaugeschwindigkeit von Stoffgruppen

Zuckerrüben beispielsweise ergeben hohe Methanerträge, die deutlich über den Erträgen von Mais und Getreide liegen.

Der Zusatz des zuckerhaltigen Baumwollhydrolysats wird eine deutliche Verbesserung der Abbaugeschwindigkeit ergeben. Dieses Thema sollte, um quantifizierbare und belastbare Ergebnisse zu erhalten, im geeigneten Maßstab in einem Folgeprojekt aufgegriffen werden.

4.7 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Hydrolyse

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit muss man berücksichtigen, dass das Projekt unter ganz anderen Bedingungen gestartet wurde. Der Ölpreis war noch relativ hoch und damit auch der Weltmarktpreis für Zucker und Ethanol. Mit dem Preisverfall des Öls haben sich auch die Preise für Zucker und Ethanol signifikant reduziert, was die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens schwächt.

Die folgende Übersicht gibt eine Abschätzung der Produktionskosten aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse. Die Kostensätze basieren auf den Standardkosten der Textilindustrie.

Bei den gegenwärtigen Kosten für Personal, Maschinenkosten, Energie und Chemikalien liegen die Kosten für die Herstellung der CO-Prä-Hydrolysat bei 6,3 Cent/kg bzw. 63,64 €/t gewonnenes Produkt ohne Einbeziehung der Investitionskosten. Die vollständige Hydrolyse im Folgeprozess mit 30 %-iger HCl kostet pro Tonne CO-Prä-Hydrolysat 81,56 €/t. Die Gewinnung des Ethanol und die anschließende Abwasserbehandlung kosten etwa 40,55 €/t CO-Prä-Hydrolysat. Beim bisherigen Stand und einer Ausbeute von 200-420 l/EtOH pro Tonne CO-Prä-Hydrolysat ergeben sich Prozesskosten von 179,75 €. Bei einem Verkaufspreis von 80-168 € für das gewonnene Ethanol und unter Berücksichtigung des Rohstoffkostenanteils ist eine Wirtschaftlichkeit nicht darstellbar.

Ganz anders gestaltet sich die Situation unter direkter Verwendung des CO-Prä-Hydrolysat. Die Kosten für die Umfärbung zu einem vielfältig nutzbaren Farbpigment liegen, je nach Farbe und Farbtiefe, bei etwa 0,55 €/kg. Der Wert eines solchen Produktes liegt zwischen 2,50 €/kg und 5 €/kg, somit kann eine hohe Marge erwartet werden, sofern sich die Eignung bestätigt. Erste positive Ergebnisse liegen bereits vor.

Dies alles lässt den Schluss zu, dass in einem Folgeprojekt man sich auf die Entwicklung der Derivate des CO-Prä-Hydrolysat konzentrieren sollte, obwohl, bei geeigneter Optimierung der Hydrolyse und anderen Marktbedingungen auch das untersuchte Verfahren wirtschaftlich werden könnte.

5 Beitrag RVN

Bearbeitungsschritte

Folgende Bearbeitungsschritte werden im Rahmen dieses Projektes durch die Fa. RVN durchgeführt:

1. Marktrecherche (Berufsbekleidung)
2. Rohstoffauswahl ca. 60% PET, 40% Co.
3. Rohstoffbeschaffung - Konstruktionen
4. Produktionsversuche
 - 4.1. Schneiden
 - 4.2. Pickern (Groböffnung)
 - 4.3. Mischen der Rohwaren
 - 4.4. Mehrstufiger Zerfaserungsprozess
 - 4.5. Fasernachreinigung
 - 4.6. Faserausrüstung
5. Versuchsauswertung Faserbeurteilung
6. Feststellen von weiteren Einflussfaktoren auf den Folgeprozess des säurekatalytischen Hydrolyseverfahrens.
 - 6.1. unterschiedlichen Farben und der Farbstoffe,
 - 6.2. Restaktivagen sowie die Spezialausrüstungen der Berufsbekleidung (Hydrophob, Oleophob, FH oder FR)
 - 6.3. der Auflösungsgrad bei der Faseröffnung
 - 6.4. Fasereigenschaften bezüglich Gewebekonstruktion Faserlänge und Festigkeit
 - 6.5. Reduktion der aufzuwendenden Energie
7. Maßnahmen, Einflüsse um die weitere Vorgehensweise der folgenden Bearbeitungsprozesse positiv zu beeinflussen.
8. Festlegung der weiteren Vorgehensweise

Durch die weiteren Hydrolyseversuche und den anschließenden Spinnversuch, hat sich gezeigt, dass das vorgeöffnete Fasermaterial keine optimalen Vorteile bietet.

Nachteile des beschriebenen Vorgehens:

- Durch den Produktmix Mischgewebe (Polyester-Cotton) können die Fasern nicht in der gewünschten Qualität aus der textilen Fläche zurück gewonnen werden, denn Polyester und Cotton sind von der mechanische Festigkeit sehr unterschiedliche Rohmaterialien und dadurch befinden sich ein hoher Kurzfaserteil, sowie unauflösbare Garnfragmente bis zu Gewebereste in der aufbereiteten Rohware.

- U.a. werden durch das Hydrolyseverfahren sämtliche Spinnhilfsmittel von Avivagen abgewaschen, die jedoch für eine optimale Weiterverarbeitung (Spinn- oder Vlies-produktion) unumgänglich bzw. erforderlich sind.

Auf Grund dieser Erkenntnisse musste die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte neu überdacht werden, um die qualitativen Parameter zu optimieren und gleichzeitig die Prozesskosten zu reduzieren.

D.h. das Hydrolyseverfahren wird nicht mit dem aufbereiteten Fasermaterial als Ausgangsmaterial durchführt, sondern mit textilen Flächen Stücke, aus dieser die Cellulose ausgefällt wird und anschließend der weiteren Bearbeitung der Faseröffnung (Reißen) zugeführt.

Vorteile des beschriebenen Vorgehens:

- Dadurch können die technischen Parameter zur Faseröffnung wesentlich optimaler eingestellt werden.
- Das Zellulose Fasermaterial wurde bereits aus der textilen Fläche entfernt, es liegt ein relativ lockeres PESS-Gewebe als Ausgangsrohstoff vor.
- Das Material kann mit einer Restfeuchte von ca. 10 % dem anschließenden Faseröffnungsprozess (Reißen) vorgelegt werden, es muss keine Feuchtigkeit zugegeben werden, um die statischen Probleme bei Synthetikmaterialien zu minimieren.
- Das Material lässt sich leichter und mit geringerem energetischen Kraftaufwand schonender, bei optimalerem Qualitätsziel, öffnen.
- Nach dem Reißprozess kann die Faser direkt mit einer Spinnavivage wieder benetzt werden, um optimale Voraussetzungen für den anschließenden Spinn- oder Vliesproduktionsprozess zu gewährleisten.
Durch diese Ausrüstungsmöglichkeit kann eine bessere Faseröffnung und somit eine optimale Faserqualität bezüglich Auflösung und Stapellänge gewährleistet werden.
- Es müssen nur ca. 60 % der Fasermasse mechanisch aufbereitet gerissen werden. Aufgrund der nicht zu 100 % zu öffnenden Fasermasse ergibt sich ein Energiekostenvorteil.

Auf Grund der unzureichenden Spinnergebnisse aus den ersten Öffnungsversuchen, bedingt durch unaufgelöste Garn- und Stoffreste und auch durch eine weitere Bearbeitung der Feinöffnung in den Technikums Produktionen bei den Firmen Trützschler GmbH & Co. KG, Mönchengladbach und der Firma Temafa Maschinenfabrik GmbH, Bergisch Gladbach, konnten die erhofften Ergebnisse nicht erzielt werden.

Durch diese Erkenntnisse mussten weitere Öffnungsversuche, mit unterschiedlichen Reißer Belägen und optimierten Maschineneinstellungen an der Reißanlage, durchgeführt werden, um die Voraussetzungen für die weitere Bearbeitung zu

optimieren. Eine Übersicht der verwendeten Walzengarnituren ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben:

Tabelle 3: Garnitur der Walzen bei den Versuchen 1 bis 3

Versuch 1 (Dreitambourig)	T1 - Stiftöffnung	T2- Stiftöffnung	T3- Stiftöffnung
Versuch 2 (Dreitambourig)	T1 -Stiftöffnung	T2 - Stiftöffnung	T3 - Sägezahn
Versuch 3 (Dreitambourig)	T1 -Stiftöffnung	T2 - Sägezahn	T3 -Sägezahn

Das Ergebnis (Versuch 3 in Tabelle 3) zeigte eine wesentliche verbesserte Faseröffnung. Dieses Material kann auch einer Karde vorgelegt werden, ohne Bedenken haben zu müssen, dass eine evtl. Maschinen-schädigung an der Karde durch unaufgelöste Rohmaterialien verursacht werden könnte. Dabei kann dieses Ergebnis weiter optimiert werden, wenn die Versuche nicht nur mit dem Ausgangsrohstoff in der Mischung Polyester Baumwolle durchgeführt worden würden. Dies ist im Rahmen des Projektes realisierbar, da der chemische Prozess derzeit nur im Labor durchgeführt werden kann und es für diese Methode derzeit keine industrielle Fertigungsmöglichkeit gibt, die es erlauben würde, eine Charge von mindestens 200 kg zu produzieren, um anschließend entsprechende Reiß-Öffnungsversuche durchführen zu können. Eine Menge von ca. 200 kg wird allerdings für ein repräsentatives Ergebnis benötigt.

Dabei sollte aus den erarbeiteten Ergebnissen der Faserrückgewinnung bei Polyester nicht nur den Fokus auf den Einsatz für Spinnzwecke Garne konzentrieren, sondern müssen ebenfalls über die alternativen Einsatzmöglichkeiten der Nonwoven-Industrie informieren, bzw. sollte dieses Anwendungsgebiet unbedingt mit berücksichtigen.

6 Beitrag ITA

Ziel der Arbeitspakete des ITA sind Faseraufbereitung nach dem Recyclingprozess sowie die Weiterverarbeitung der Faserflocken zu neuen Garnen. Für die Faseraufbereitung werden unterschiedliche Maschinen und Technologie für das Recyclingmaterial getestet. Die Garnherstellung erfolgt auf einer Rotorspinnmaschine.

6.1 Material

Bei den von FUF gelieferten Fasern handelt es sich um die Probe „RVN Nr. 5“ nach säurekatalytische Zersetzung der Baumwolle.

Charge 1

Bei Charge 1 handelt es sich um Recyclingmaterial, das vor der säurekatalytischen Zersetzung geschnitten und gerissen wurde.

Charge 2

Bei Charge 2 wurde das Material nur geschnitten und anschließend chemisch behandelt. Das Reißen der Gewebestücke wurde anschließend durchgeführt.

Charge 3

Das Material der Charge 3 wurde sehr stark ausgelöst, so dass keine Gewebereste und nur Garnreste vorhanden sind, um die Ausreinigung der Garnreste mittels Industriekarde zu untersuchen.

6.2 Maschinen

6.2.1 Laborkrempel

Die Laborkrempel dient zur Faseröffnung. In diesem Projekt wird eine Laborkrempel der Fa. Anton Guillot KG, Aachen, für die Faserauflösung getestet. Die Laborkrempelmaschine dient zur Faseröffnung. Durch mehrere gegenläufig-verzahnte Walzen wird die Fasermasse geöffnet. Das Material wird zwischen den Arbeiter- und Wendepaaren und dem Tambour geöffnet und auf diesem nach rechts transportiert, bis es die Abnehmerwalze erreicht. Das Material wird auf der Aufwickleinheit gesammelt.

6.2.2 Feinöffner/Vliestonne

Die Vliestonne ist ein Feinöffner CVT3 1200 der Fa. Trützschler GmbH & Co. KG, Mönchengladbach. Die Vliestonne wird hauptsächlich zur Herstellung von Vliesen genutzt, kann aber aufgrund des Feinöffners auch sehr gut zur Faseröffnung genutzt werden.

6.2.3 Randvliesöffner

Der Randvliesöffner, Temafa Maschinenfabrik GmbH, Bergisch Gladbach, dient zur Feinöffnung von Fasermaterial. Hierbei wird das Material einem Speiseschacht zugeführt und gelangt anschließend zu zwei mit unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeit laufenden Walzen. Die erste Walze besitzt eine deutlich geringere Geschwindigkeit als die zweite Walze. Gleichzeitig kann die erste Walze mit Stiften oder mit Sägezähnen bestückt sein. Die zweite Walze, die mit einer höheren Geschwindigkeit läuft, ist mit Sägezähnen ausgestattet. Das zugeführte Material wird in der ersten Walze aufgrund der geringen Geschwindigkeit geklemmt und teilweise von der zweiten Walze erfasst. Dabei wird das Material geöffnet und die Faserflocken gelangen anschließend in einen Sammelbehälter.

6.2.4 Stufenreiniger

Der Lin-Stufenreiniger LIC, Temafa Maschinenfabrik GmbH, Bergisch Gladbach, ist eine Faseröffnungsanlage und ist speziell für die Reinigung von Naturfasern wie Hanf und Kenaf entwickelt worden. Die Maschine besitzt aufsteigend angeordnete Schlagwalzen und verschiedenen Reinigungssiebe. Das Material wird der Maschine zugeführt und über die Schlagwalzen und Reinigungssiebe von Fremdbestandteilen gereinigt. [Tem04], [Tem15]

6.2.5 UNiflex B 60

Der Feinöffner UNiflex B 60, Rieter AG, Winterthur, CH, dient zur Öffnen von Fasern. Dabei wird das Material zunächst angesaugt und anschließend in den Lamellenschacht eingeblasen. Das Material wird über einen Ventilator verdichtet und der Speisemulde zugeführt. Über die Speisewalze wird das Material der Öffnerwalze zugeführt und geöffnet. Die Fasern werden dabei auch über ein Rost geschleift, wodurch eine Reinigung des Materials erfolgt. Anschließend gelangen die Fasern in die Abgangswanne, verlassen die Maschine durch einen Kanal und werden in einem Behälter gesammelt [Rie02].

6.2.6 Industriekarde

Industriekarde TC 11 der Fa. Trützschler GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, wird zur Faseröffnung und anschließenden Bandherstellung verwendet.

6.2.7 MDTA3

Mittels MDTA3 der Fa. Textechno, Mönchengladbach, werden zunächst Bänder aus den Faserflocken gebildet, welche anschließend mittels Rotorspinnverfahren zu Garnen weiterverarbeitet werden können. Das Material wird als Flocke über ein Transportband in die Maschine geführt. Nach Auflösung werden alle Fasern aufgrund der Rotordrehung durch die Zentrifugalkraft in die Rotorrille transportiert und ausgerichtet.

6.2.8 Rotorspinnmaschine

Die Rotorspinnmaschine dient zur Herstellung des Garns aus Faserband. Das Faserband wird in der Auflösewalze eingezogen und ausgelöst. Durch den Luftstrom und die Zentrifugalkraft werden sich die Spinnfasern ausgerichtet. In der Rotorrille wird am Anfang ein offenes Garnende eingefügt. Daran werden die neuen Fasern angedreht. Das Garn wird kontinuierlich abgezogen und auf einer Spule gewickelt [LH11].

Auf der Rotorspinnmaschine werden vier Parameter eingestellt, die die Eigenschaften des fertigen Garns beeinflussen. Die Parameter sind folgende:

- Rotorgeschwindigkeit [1/min]
- Abzugsgeschwindigkeit [m/min]
- Einzugsgeschwindigkeit [m/min]
- Geschwindigkeit der Auflösewalze [1/min]

Durch folgende Beziehungen kann der Prozess beschrieben werden:

$$\text{tex} = \frac{V_{\text{Einzug}} \cdot \text{Bandfeinheit}}{V_{\text{Abzug}}} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{V_{\text{Rotor}}}{V_{\text{Abzug}} \cdot \sqrt{\frac{1000}{\text{tex}}}} \quad (2.2)$$

Die Einheit tex bezeichnet die Garnfeinheit. Ein tex ist folgendermaßen definiert:

$$\text{tex} = \frac{1g}{1000m} \quad (2.3)$$

Die Aufwicklung und Garnspeicherung erfolgt auf einer Kreuzspule.

6.3 Durchführung

6.3.1 Spinnereivorbereitung

Charge 1

Vor der Bandherstellung müssen die gelieferten Fasern sehr stark aufgelöst und die Fremdbestandteile entfernt werden. Hierfür eignen sich zunächst **Handkarden**. Als nächstes wird eine **Laborkrempel** der Fa. Anton Guillot KG, Aachen, für die Faserauflösung getestet. Hierfür werden drei unterschiedlich stark voraufgelöste Faserproben verwendet. Bei dem Versuch mit der Laborkrempel ist es interessant zu sehen, inwieweit der Auflösungsprozess optimiert werden kann. Es ist unklar, ob Fremdbestandteile durch den Krempelprozess vollständig herausgelöst werden können. Es wird zudem vermutet, dass Fremdbestandteile durch die Garnituren zerstört werden und diese Bruchstücke weiterhin im Probenmaterial verbleiben. Das Material wird zwei Mal in die Laborkrempel zugeführt. Die Ergebnisse der Faseröffnung beider Versuchsdurchgänge werden optisch miteinander verglichen und bewertet.

Es wird ein **Feinöffner** CVT3 1200 der Fa. Trützschler GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, verwendet. Dieser Feinöffner wird hauptsächlich zur Herstellung von Vliesen im Airlay-Verfahren genutzt, kann aber aufgrund des Feinöffners auch sehr gut zur Faseröffnung genutzt werden. Es wird eine definierte Materialmenge der Maschine zu geführt. Nach dem ersten Versuchsdurchlauf wird die Materialprobe erneut gewogen und der Materialverlust berechnet. Der Grad der Faseröffnung wird optisch mit den Ergebnissen aus den Versuchen mittels Laborkrempel verglichen und bewertet. Anschließend wird das Material ein weiteres Mal geöffnet. Die Materialmenge nach der zweiten Faseröffnung wieder abgewogen und der Materialverlust bestimmt. Der Grad der Faseröffnung nach dem zweiten Mal Öffnen, wird wieder den Ergebnissen aus den Versuchen mittels Laborkrempel verglichen und bewertet.

Tabelle 4: Maschinenparameter Randvliesöffner, fein, Material Charge 1

	Einlaufgeschwindigkeit v [m/min]	Garnierung der Öffnerwalze	Anzahl Spitzen [1/zoll ²]	Drehzahl n [1/min]
Randvlies-öffner, fein	6	Ganzstahl, 8-gängig, genutet	200	3000

Das Material wird in einen **Randvliesöffner** mit feiner Garnitur der Fa. Temafa GmbH, Bergisch Gladbach, gegeben, um verbliebene Garnreste aufzulösen bzw. auszureinigen. In Tabelle 4 sind die gewählten Einstellungen aufgelistet.

Der **Stufenreiniger** weist mehrere Abscheidemöglichkeiten auf. Es wird ein Versuch mit einer geringen Menge Fasern von ca. 50 g durchgeführt, um die Abscheidung der Garnreste mittels Stufenreiniger zu untersuchen. Für eine ausreichende Untersuchung an einem Stufenreiniger steht jedoch nicht ausreichend Fasermaterial zur Verfügung. Weiterführende Arbeiten sollten darin bestehen, die nicht aufgelösten Garnreste zu Einzelfasern aufzulösen, anstatt sie abzuscheiden.

Die **UNiflex B 60** dient ebenfalls der Öffnung bzw. Ausreinigung der Garnreste im geöffneten Fasermaterial. In Tabelle 5 ist die gewählte Maschineneinstellung aufgeführt. Bei der UNiflex können nur begrenzt Parameter variiert werden. Für diesen Versuch wird die maximale Drehzahl gewählt, um eine möglichst effektive Faseröffnung und -ausreinigung zu erreichen.

Tabelle 5: Maschinenparameter UNiflex B 60

	Einlaufgeschwindigkeit v [m/min]	Garnierung der Öffnerwalze	Anzahl Spitzen [1/zoll ²]	Drehzahl n [1/min]
UNiflex B 60	-	-	-	960

Charge 2

Tabelle 6: Maschinenparameter Randvliesöffner, grob u. fein, Material Charge 2

		Einlaufgeschwindigkeit v [m/min]	Garnierung der Öffnerwalze	Anzahl Spitzen [1/zoll ²]	Drehzahl n [1/min]
Versuch Nr. 1	Randvliesöffner,	5,4	Stiftwalze, 8-gängig, benadelt	-	1500
		6,1			
Versuch Nr. 2	Randvliesöffner, fein	3,5	Ganzstahl, 8-gängig, genutet	200	1500

Für das Öffnen der Gewebestücke werden ein **Randvliesöffner** mit grober Garnitur der Einzugswalze und ein Randvliesöffner mit feiner Garnitur der Einzugswalze verwendet. In Tabelle 6 sind die Maschinenparameter der Versuche 1 und 2 aufgeführt. Das Öffnen der Gewebe erfolgt in zwei Stufen: 1. Durchlauf und 2.

Durchlauf. Für den ersten Versuch wird das Gewebe zunächst mit einem groben Randvliesöffner geöffnet und anschließend mit einem feinen Randvliesöffner. Im zweiten Versuch wird das Gewebe zweimal mittels eines feinem Randvliesöffner geöffnet.

6.3.2 Band- und Garnherstellung

Charge 1

Um Material zu sparen wird das recycelte PES zunächst mit virgin Baumwolle in einem 50/50 Verhältnis gemischt. Anschließend wird der PES-Anteil in zwei Stufen auf 100 % gesteigert. Es werden folgende Fasermischungen auf der **MDTA3** zu Bändern mit einer Feinheit von 6 ktex weiterverarbeitet:

- 50/50 recyceltes PES und virgin Baumwolle
- 70/30
- 100/0

Für die Garnherstellung wird eine Oerlikon **Rotorspinnmaschine** mit einer Spinnbox Typ SE 10 verwendet. Es werden zunächst die Maschinenparameter für die Garnfeinheit 40 tex ermittelt. In Tabelle 7 sind die gewählten Maschinenparameter aufgeführt. Die Abweichungen in den Einzugs- und Abzugsgeschwindigkeiten sind auf den unterschiedlichen Materialzusammensetzungen begründet.

Tabelle 7: Maschinenparameter Rotorspinnmaschine, Material Charge 1

Mischgarn		Parameter		
rPES [%]	vCO [%]	Rotordrehzahl n_{Rotor} [1/min]	Abzugsgeschwindigkeit V_{Abzug} [m/min]	Einzugsge- schwindigkeit V_{Einzug} [mm/min]
50	50	18.500	17	230
70	30	18.500	15	285
100	0	18.500	15	350

Charge 3

Die von der Fa. RVN gelieferten Fasern enthalten PES und CO. Da für die Industriekarde Mengen ab 50 kg benötigt werden, ist es derzeit im Projekt nicht möglich, die CO vorher auszufällen. Diese Versuche geben jedoch einen Hinweis darauf, ob es grundsätzlich möglich ist, die Problematik der Garnreste zu lösen. In Tabelle 8 sind die gewählten Maschinenparameter der Karde aufgeführt.

Tabelle 8: Maschinenparameter Karde

Bandfeinheit [ktex]	Verzug	Regulierung IDF	Liefargeschwindigkeit [m/min]
5	1,02-fach	Ja	100

Tabelle 9: Maschinenparameter Rotorspinnmaschine, Material Charge 3

Rotordrehzahl n_{Rotor} [1/min]	Abzugsge- schwindigkeit V_{Abzug} [m/min]	Einzugsgeschwin- digkeit V_{Einzug} [mm/min]	Auflösewalzen- geschwindigkeit $n_{\text{Auflöse}}$ [1/min]
24500	15,77	253	7020

Zur Optimierung des Spinnprozesses, werden ein Rotor (S 246 – BD) sowie eine Auflösewalze für synthetisches Fasermaterial eingebaut (S 21 DN Garnitur). In Tabelle 9 sind die gewählten Maschinenparameter für die Verarbeitung des Materials aus Charge 3 aufgelistet.

6.3.3 Laborprüfungen

6.3.3.1 Faser

Mikroskopie

Es werden die Fasern vor und nach der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle mit Chlorzinkjod eingefärbt und mittels Lichtmikroskopie untersucht. Durch die violette Einfärbung der Baumwollfaser kann ein Nachweis der Zersetzung der Baumwolle getroffen werden.

Faserlänge

Die Einzelfaserlängenprüfung erfolgt in Anlehnung an DIN 53808 Teil 1 mit einer Faseranzahl von 300 Einzelfasern.

Festigkeit und E-Modul

Die Prüfungen der Festigkeit und des E-Moduls der Fasern werden in Anlehnung an die Prüfnorm DIN EN ISO 5079 durchgeführt. Folgende Einstellungen werden hierbei gewählt:

- Einspannlänge: 20 mm
- Verformungsgeschwindigkeit: 20 mm/min
- Vorspannkraft F_v : 1 cN/tex

6.3.3.2 Garn

Feinheit

Das Verfahren zur Bestimmung der Feinheit erfolgt nach DIN EN ISO 2060. An der Garnweife wird die erforderliche Länge der Prüfstränge festgestellt, die in diesem Fall 10 m beträgt. Das Gewicht der einzelnen Proben wird anschließend bestimmt. Die Feinheit wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$T_{tc} = \frac{m_c \cdot 10^3}{L} \text{ [tex]} \quad (3.1)$$

Wobei m_c die Masse der Messprobe in Gramm und L die Länge ist. Die Ergebnisse sind der Mittelwert, der Variationskoeffizient und die Standardabweichung der Feinheit. Es werden außerdem Angaben zur Vorspannkraft, zur Temperatur und zur relativen Luftfeuchtigkeit gemacht [DIN EN ISO 2060].

Gleichmäßigkeit und Haarigkeit

Die Prüfung der Gleichmäßigkeit und Haarigkeit erfolgt nach DIN 53 817 (zurückgezogen). Durch den Garngleichmäßigkeitsprüfer „Uster“ wird die Ungleichmäßigkeit der Masse und Feinheit der Spinnfasergarne bestimmt. Die Prüfung wird auch „Usterprüfung“ genannt. Die Usterprüfung ist ein elektrisches Verfahren, welches mit Hilfe eines Kondensators durchgeführt wird. Die Messprobe läuft durch die Platten des Kondensators und verursacht Kapazitätsänderungen, die durch einen Umwandler in elektrische Spannungsschwankungen umgesetzt werden. Die Spannungsschwankungen werden auf Diagrammpapier registriert und dann bewertet.

Bei der Durchführung ist auf das Prüfklima zu achten, welches dem Normalklima (Temperatur = $20 \pm 2^\circ\text{C}$, relative Luftfeuchte = $65 \pm 4 \%$) entsprechen muss. Es sind außerdem folgende Angaben notwendig:

- Temperatur [$^\circ\text{C}$] und relative Feuchtigkeit [%]
- Probenbeschaffenheit
- Feinheit [tex] und Drehung [Drehung/m]
- Anzahl der Messschlitze
- Material-Vorschub [m/min]
- Prüfdauer [min]

Die Auswertung erfolgt anhand des Varianzkoeffizienten und des Abweichungskoeffizienten der Masse [DIN 53817]. Der CV-Wert und der Ungleichmäßigkeitswert U werden anhand der folgenden Gleichung ermittelt:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

$$U = \frac{a}{A} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Wobei s die Standardabweichung ist, \bar{x} die gemittelte Garnmasse, a die Fläche der Abweichungen und A die Fläche ist, die das Rechteck bildet aus der mittlere

Garnmasse und der Prüflänge. Angegeben wird der gemittelte Durchmesser und außerdem werden die Stellen gezählt, wo der Durchmesser -30 %, -40 %, -50 %, +35 %, +50 %, +140 %, +280 %, +400 % des durchschnittlichen Durchmesser entspricht. Die Haarigkeit wird anhand des Haarigkeitswertes H ermittelt, der die Gesamtlänge der abstehenden Fasern innerhalb 1 cm Garnabschnitt angibt. H ist ein dimensionsloser Wert, da er das Verhältnis zweier Längen ausdrückt.

Höchstzugkraft und Dehnung

Die Bestimmung der HZK (Höchstzugkraft) und der dazugehörigen Dehnung erfolgt nach DIN EN ISO 2062. Durch ein Prüfgerät werden die Messproben bis zum Bruch mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit gedehnt. Als erstes werden die Messproben vorbereitet: mit Hilfe einer Garnweife werden Prüfsträngen mit bestimmter Länge aus dem Garn abgeschnitten. Diese werden dann in den Klemmen des Prüfgerätes befestigt. Die Einspannlänge beträgt 500 mm, die Vorspannung 0,50 cN/tex. Nach dem Angleichen an das Normalklima kann die Prüfung gestartet werden. Es wird eine Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min gehalten. Die Höchstzugkraft und die Dehnung werden bestimmt. Eine Angabe über die Feinheit ist in diesem Fall erforderlich, da die Ergebnisse der HZK feinheitbezogen sind [DIN EN ISO 2062].

6.3.3.3 Gewebe

Mikroskopie

Das Material aus Charge 2 wird erst nach der säurekatalytischen Zersetzung geöffnet. Daher werden die Gewebestücke vor und nach der säurekatalytischen Zersetzung auch optisch mittels Mikroskopie hinsichtlich ihrer Struktur untersucht. Die Mikroskopieaufnahmen erfolgen bei gleichzeitiger Auf- und Durchlichtmikroskopie.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Fasermaterial

Charge 1

Die Fasern liegen sehr verklumpt vor. Beim ersten Auflösen per Hand zeigt sich eine sehr starke Staubentwicklung. Auffällig sind große Gewebereste, Garnreste und teilweise auch poröse Beschichtungsreste. Die Garnreste haben teilweise eine Länge von 20 cm. Diese Fremdbestandteile müssen entfernt werden, da sie einerseits die Spinnereivorbereitung deutlich erschweren, aber andererseits einen erheblichen Einfluss auf die späteren Garneigenschaften haben würden.

Charge 2

Das Material der Charge 2 enthält Gewebegitter aus recyceltem PES, bei welchem die CO bereits herausgefällt wurde.

Charge 3

Das Material der Charge 3 enthält bereits viele Einzelfasern, vereinzelt noch Garnreste.

6.4.2 Spinnereivorbereitung

Charge 1

Das Verfahren zur Faseröffnung mittels **Handkarden** löst die Faserklumpen auf, per Hand können größere Gewebereste leicht entfernt werden, aber Garnreste und die porösen Beschichtungsreste verbleiben. Außerdem ist dieses Verfahren sehr zeitaufwendig und eignet sich nicht für die Vorbereitung von größeren Fasermengen. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für die Probenvorbereitung für die Laborprüfungen genutzt.

Die Versuche mit der **Laborkrempel** zeigen, dass eine vorangehende leichte Auflösung der Fasern mit Entfernung größerer Fremdbestandteile keine nennenswerte Verbesserung der Krempelerggebnisse hervorruft. Große Gewebe- oder Beschichtungsreste sind nicht mehr erkennbar, diese werden von der Krempel ausgereinigt.

Die erste Probe wird zweimal in der **Vliestone** geöffnet und wird beim ersten Öffnen bereits stark aufgelöst. 120 g wurden in die Vliestone gegeben. Materialverlust nach erstem Öffnen liegt bei 21,7 %. Die Fasern wurden sehr stark geöffnet, jedoch liegen auch nach dem ersten Öffnen mittels Vliestone noch Ge-

webe-, Beschichtungs- und Garnreste vor. Diese Verunreinigungen konnten nur teilweise ausgereinigt werden und konnten weder vollständig geöffnet noch vollständig ausgereinigt werden. Der mit 21,7 % sehr hohe Materialverlust ist teilweise auf die leichte Ausreinigung zurückzuführen. Der größte Materialverlust wird aber dadurch verursacht, dass Fasern an den Innenwänden der Rohrleitungen der Vliestonne festhaften, vermutlich aufgrund von elektrostatischer Aufladung. Der gesamte Innenwand des Schachts wies viele Faserreste auf, aufgrund der Schachthöhe auch nicht vollständig zurückgewonnen werden konnten. Das bereits einmal mittels Vliestonne geöffnete Material wird erneut in die Vliestonne gegeben, um eine höhere Auflösung der Materialreste zu erreichen. Nach dem zweiten Öffnen beträgt der Materialverlust 13,3 %. Die Fasern liegen etwas stärker geöffnet vor. Größere Gewebe- und Beschichtungsreste konnten fast vollständig ausgereinigt werden. Eine Verbesserung der Ausreinigung der Garnreste konnte jedoch auch nach dem zweiten Öffnen nicht erreicht werden. Die Annahme, dass der größte Materialverlust durch das Anhaften der Fasern an den Innenwänden der Rohrleitungen verursacht wird, wird somit bestätigt. Aufgrund des hohen Materialverlustes und des nicht zufriedenstellenden Ausreinigens bzw. Öffnens der Garnreste wird eine Spinnereivorbereitung mittels Vliestonne nicht weiterverfolgt.

Nach einem Durchlauf des Fasermaterials der Charge 1 (Faserflocke) durch einen **Randvliesöffner** mit feiner Einzugswalze wird deutlich, dass das Faservolumen nimmt zu, also findet eine weitere Auflösung statt. Garnreste verbleiben jedoch im geöffneten Fasermaterial.

Der **Stufenreiniger** hat mehrere Abscheidemöglichkeiten. Ein Versuch mit sehr wenig Material (~ 50 g) liefert den Hinweis darauf, dass nicht aufgelöste Garne in stärkerem Maße abgeschieden werden. Allerdings steht für Untersuchungen mit dem Stufenreiniger nicht ausreichend Material zur Verfügung. Weiterführende Arbeiten sollten darin bestehen, die nicht aufgelösten Garnreste zu Einzelfasern aufzulösen, anstatt sie abzuscheiden. Das Material wurde teilweise durch die in der Maschine noch vorhandenen Bastfasern verunreinigt.

Mit der **UNiflex B 60** werden keine Garnreste durch die Roste abgeschieden. Dieser Feinöffner ist somit nicht für die Öffnung des Recyclingmaterials geeignet.

Charge 2

1. Durchlauf: Randvliesöffner, grob

Nach dem ersten Versuch sind das unaufgelöste Gewebe, die vielen unaufgelösten Garnabschnitte und wenig Einzelfasern deutlich erkennbar.

2. Durchlauf: Randvliesöffner, fein

Nach dem zweiten Versuch wird deutlich, dass das Gewebe besser aufgelöst ist nach dem zweiten Durchlauf. Jedoch sind viele Reststücke von unaufgelösten Garnabschnitten und nur wenig Einzelfasern vorhanden.

1. Durchlauf: Randvliesöffner, fein

Auch hier sind viele Reststücke von Gewebegittern, nicht aufgelösten Garnabschnitten und wenig Einzelfasern vorhanden.

2. Durchlauf: Randvliesöffner, fein

Das Gewebe ist besser aufgelöst, es sind weniger Reststücke, jedoch viele unaufgelöste Garnabschnitte sowie wenig Einzelfasern vorhanden.

Bei diesen Versuchen wurde deutlich, dass das Öffnen des Gewebes deutlich stärker erreicht, wenn zweimal ein Randvliesöffner mit feiner Garnitur gewählt wurde. Das Öffnen der Gewebe mittels feiner Garnitur ist jedoch deutlich aggressiver für die Fasern.

6.4.3 Band- und Garnherstellung

Charge 1

Bei der Bandherstellung mittels **MDTA3** wird deutlich, dass verbliebenen Gewebe- und Garnreste nur bedingt aufgelöst werden können und auch nur bedingt ausgereinigt werden. Die ausgereinigten Fasermaterialien verbleiben in der Maschine und können letzten Endes ein Blockieren der Walzenpaare verursachen. Die hergestellten Bänder weisen eine hohe Gleichmäßigkeit und Festigkeit auf, so dass sie für die Weiterverarbeitung mittels Rotorspinntechnologie geeignet sind. Jedoch beinhalten diese Bänder noch viele Garn- und Gewebereste.

Die zu Beginn festgelegte Garnfeinheit von 40 tex führt zu nicht ausreichender Festigkeit. Die Maschinenparameter für **Rotorspinnmaschine** müssen deswegen angepasst werden. Diese sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Einstellungen der Rotorspinnmaschine

Mischgarn		Parameter			
PES [%]	CO [%]	V_{Rotor} [1/min]	V_{Abzug} [m/min]	V_{Einzug} [mm/min]	Feinheit [tex]
50	50	18500	17	230	61
70	30	18500	15	285	80
100	0	18500	15	350	74

Während des Spinnverfahrens schwanken die verschiedenen Spinnparameter leicht. Das liegt daran, dass die Maschinenparameter sehr anfällig für äußere

Einflüsse sind und sie sich gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen, jedes Garn in einem Prozess auszuspinnen, damit sichergestellt ist, dass die Eigenschaften für jedes Garn annähernd konstant bleiben.

Die hergestellten Garne werden mit den vorgestellten Prüfverfahren getestet. Es werden zusätzlich Garne aus virgin PES getestet. Zur Bewertung der Qualität des recycelten PES wird somit ein direkter Vergleich der Ergebnisse ermöglicht. In den folgenden drei Abbildungen sind die fertigen Prüfgarne zu sehen.

Beim Rotorspinnen zeigte sich, dass auch die Auflösewalze, die eine feinere Garnitur aufweist als die Laborkrempel und die MDTA3, die Garn- und Gewebereste nur bedingt auflösen kann und diese vielmehr ausreinigt. Auch diese Ausreinigung erfolgt nicht vollständig und es verbleiben weiterhin Garn- und Gewebereste im Material, die anschließend auch im neu ausgesponnenen Garn erscheinen. Die im Antrag angestrebte Garnfeinheit von 40 tex (40 g auf 1000 m) konnte ausgesponnen werden. Die Festigkeit dieser Garne ist jedoch für eine Weiterverarbeitung, bspw. auf einer Laborrundstrickmaschine, nicht ausreichend. Auch eine Veränderung des Drehungsbeiwertes α_m , der maßgeblich die Garnfestigkeit beeinflusst, konnte keine Festigkeitserhöhung bewirken.

Es wird vermutet, dass die verbliebenen Garnreste im Garnquerschnitt eine derartige Fehlstelle bewirken, dass nicht ausreichend Einzelfasern im Garnquerschnitt vorliegen. Die Reibung der Einzelfasern in Kombination mit der Garndrehung bewirkt die Garnfestigkeit. Insbesondere die Fasern im Garninneren sind für die Lastaufnahme relevant. Werden diese Fasern nun durch Garnreste verdrängt, so sinkt auch die Zugfestigkeit des neuen Garns. Mit einer Erhöhung der Garnfeinheit auf 60 tex kann eine deutlich höhere Zugfestigkeit des neu ausgesponnenen Garns erreicht werden.

Charge 3

Die Kardierversuche auf einer **Industriekarde** zeigen, dass alle Garnreste ausgereinigt bzw. teilweise auch geöffnet werden können. Das Kardenband enthält keine Garnreste mehr. Es ist somit möglich, mittels Industriekarde die Problematik der Garnreste zu lösen und ein Kardenband aus Einzelfasern herzustellen.

Bei ersten Spinnversuchen mittels **Rotorspinnmaschine** wurde ersichtlich, dass sich nach wenigen Metern Garnproduktion starker ein Wickel auf der Auflösewalze gebildet hat, welcher den Spinnprozess unterbrach. Um die Wickelbildung möglichst zu vermeiden und trotzdem eine schonende Auflösung zu gewährleisten, wurden in einer Untersuchungsreihe von fünf Versuchen, verschiedene Drehzahlen der Auflösewalze eingestellt. Bei der Auflösewalzendrehzahl von 7020 U/min (V4) konnten immerhin 150 m bis 250 m Garn gesponnen werden, bevor Fadenbruch eintrat. Bei der im Versuch V1 eingestellten Auflösewalzengeschwindigkeit von 5100 U/min, gab es nach wenigen Metern einen Wickel um die

Auflösewalze und einen Garnabriss. Bei dem Versuch V2 mit der eingestellten Auflösewalzengeschwindigkeit von 8000 U/min, war ein anspinnen nicht möglich. Die Auflösewalze arbeitete zu aggressiv, so dass die kurzen Fasern stark geschädigt wurden. In Abbildung 11 ist das Rotorgarn der Charge 3 zu sehen. Die Feinheit beträgt ca. 30 tex.



Abbildung 11: Rotorgarn der Charge 3

6.4.4 Laborprüfungen

6.4.4.1 Faser

Charge 1

In Abbildung 12 sind Mikroskopieaufnahmen des Fasermaterials aus Charge 1 vor der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle (links) und danach (rechts) gezeigt. Links sind deutlich noch die mit Chlorzinkjodeingefärbten Baumwollfasern zu erkennen mit einigen PES-Fasern dazwischen. Rechts liegen ausschließlich PES-Fasern vor mit Bruchstücken der Baumwolle (schwarze Punkte). Außerdem wurden die Fasern hinsichtlich der Festigkeit und Dehnung getestet. Verglichen wurde hierbei das Recyclingmaterial vor der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle und nach der Ausfällung der Baumwolle.

Im Kraft-Dehnungs-Diagramm des Recyclingmaterials aus PES/CO der Charge 1 vor der säurehydrolytischen Zersetzung der Baumwolle können die PES- und die CO-Faser leicht voneinander durch ihren typischen Kurvenverlauf unterschieden werden. Die feinheitsbezogene Festigkeit von CO liegt bei ca. 30 cN/tex, die Dehnung bei ca. 18 %. Bei PES beträgt die feinheitsbezogene Festigkeit ca. 40 cN/tex, die Dehnung beträgt ca. 17 %. Das Kraft-Dehnungs-Diagramm des recycelten Polyesters aus Charge 1 nach der säurekatalytischen Zersetzung zeigt, dass die Festigkeit durch den säurekatalytischen Prozess nicht beeinflusst wird. Einzig die Dehnung der PES-Faser wird beeinflusst. Die Deh-

nung wird leicht verstärkt, wobei auch die Standardabweichung erhöht ist, verglichen zum Material vor dem säurehydrolytischen Prozess.

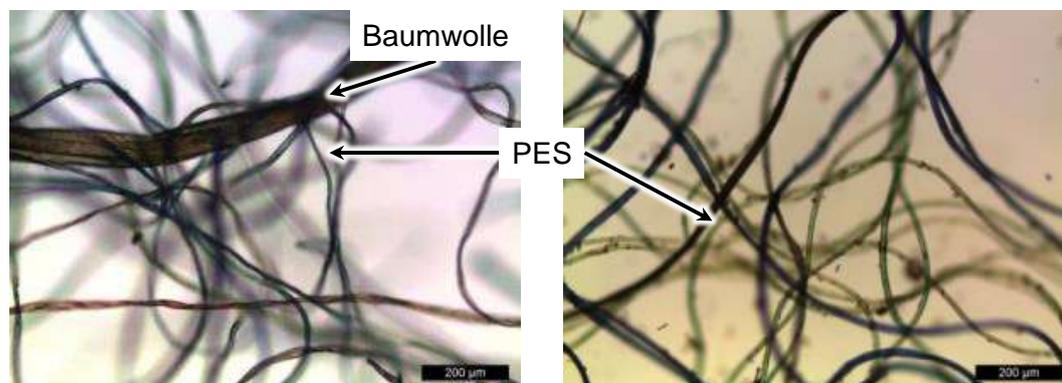


Abbildung 12: Mikroskopieaufnahme des Fasermaterials aus Charge 1 vor der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle (links) und da-nach (rechts)

6.4.4.2 Garn

Charge 1

Tabelle 11: Ergebnisse der Zugkraft- und Dehnungsprüfungen der unterschiedlichen Garne und eines Vergleichsgarns

Zusammensetzung [%]		Dehnung [%]	Bruchdehnung [%]	HZK [cN]	Feinheitsbezogene HZK [cN/tex]	Feinheit [tex]
50 rPES	50 vCO	17,66	17,76	304,84	4,85	61
70 rPES	50 vCO	12,26	12,49	253,54	3,23	80
100 rPES	0 vCO	18,14	18,22	356,48	4,09	74
Referenz:						
100 vPES	0 vCO	9,22	9,30	1734,6	18,53	40

Zunächst war es nicht möglich, die anfangs angestrebte Garnfeinheit von 40 tex auszuspinnen. Hauptursächlich waren hierbei die Garnreste im Recyclingmaterial, die nicht vollständig ausgereinigt oder geöffnet werden konnten. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse aus der Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 2062 (Höchstzugkraft HZK und Dehnung) aufgeführt. Die letzte Zeile der Tabelle zeigt ein handelsübliches Garn als Referenz. Es wird deutlich, dass Festigkeiten des Recyclingmaterials mit unter 5 cN/tex verglichen zum Vergleichsmaterial mit 18,5 cN/tex noch sehr gering sind.

Tabelle 12: Ergebnisse der Gleichmäßigkeits- und Haarigkeitsprüfung der unterschiedlichen Recyclinggarne und Vergleichsarne

Zusammensetzung [%]	PES	50, recycelt	50, virgin	70, recycelt	65, virgin
	vCO		50	50	30
U [%]		16,04	10,48	16,64	10,43
CVm [%]		21,48	13,25	23,85	4,32
Dünnstellen [%/km]	-30	5645	1735	6950	1737
	-40	935	107	1875	105
	-50	190	3	335	2
Dickstellen [%/km]	+35	2750	429	1975	341
	+50	1115	35	665	30
Nissen [%/km]	+140	8185	1295	5515	1101
	+280	760	24	440	20
	+400	135	2	125	1
I [-]		5,38	2,71	6,68	2,69
H [-]		10,67	5,27	10,11	5,34
Durchmesser [mm]		0,60	0,34	0,57	0,33
Querschnitt		0,70	0,80	0,66	0,81

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Prüfungen auf Gleichmäßigkeit und Haarigkeit in Anlehnung an DIN 53817 (zurückgezogen) zusammengefasst. Das 100 % Recycling PES Garn ist nicht aufgeführt, da nicht ausreichend Garn für die Usterprüfung ausgesponnen werden konnte. Der Gleichmäßigkeitsindex I, welcher im Idealfall I=1 ist, weicht bei den Recyclinggarne mit I=5,4 bzw. I=6,7 deutlich stärker vom Idealfall ab verglichen zu den Referenzgarnen mit I=2,7. Diese stärkere Ungleichmäßigkeit der Recyclinggarne wird auch in den Ergebnissen der Messungen der Dick- und Dünnstellen sowie Nissen deutlich. Die Recyclinggarne haben ebenfalls auch einen deutlich erhöhten Wert bei den Dick- und Dünnstellen sowie Nissen verglichen zu den Referenzgarnen. Des Weiteren zeigen die Recyclinggarne einen stärker elliptischen Querschnitt (kreisrund, Idealfall=1) als die Vergleichsarne auf.

6.4.4.3 Gewebe

Charge 2

Abbildung 13 zeigt die Gewebe des Recyclingmaterials der Charge 2 vor der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle (links) und danach (rechts). Die offenere Struktur des reinen PES-Gewebegitters ist deutlich erkennbar.

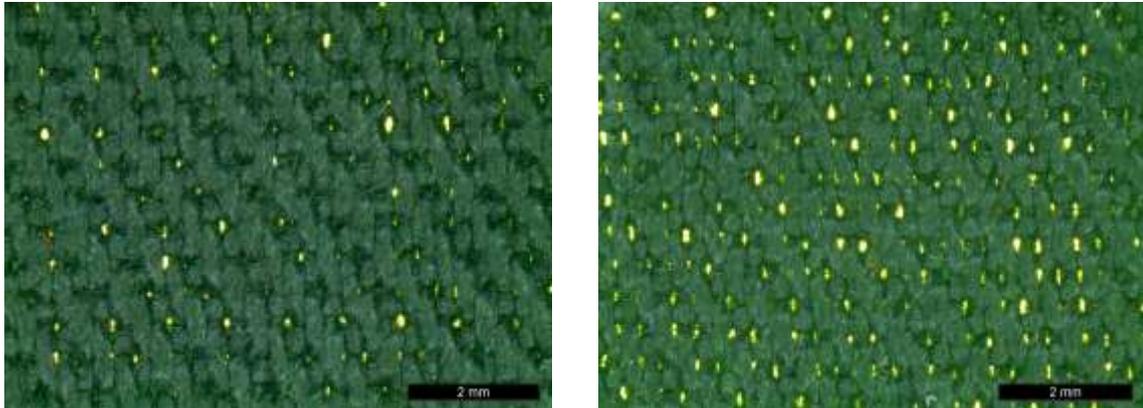


Abbildung 13: Gewebe des Recyclingmaterials der Charge 2 vor der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle (links) und danach (rechts)

7 Fazit

Es ist grundsätzlich möglich, Garne aus Recyclingmaterial herzustellen. Die Versuche zeigen, dass eine Industriekarde geeignet ist, Garnreste, die im Recyclingprozess nicht geöffnet werden können, auszuscheiden bzw. zu öffnen. Wenn diese Garnreste im neuen Garn verbleiben so setzen sie die Festigkeit des neuen Garns herab.

In zukünftigen Forschungsvorhaben sollte dieser Recyclingprozess weiter optimiert werden. Nach der säurekatalytischen Zersetzung der Baumwolle muss erneut eine Spinnvavage auf die PES-Fasern aufgebracht werden, um eine elektrostatische Aufladung des Materials zu verhindern und auch um den Spinnprozess der Garnherstellung zu verbessern. Des Weiteren ist die Zugabe von frischen PES-Fasern bereits im Kardierprozess zu empfehlen, um die Kardenbandherstellung zu stabilisieren. Durch den Recyclingprozess und den zusätzlichen Kardierprozess treten Fasereinkürzungen auf. Eine ungleichmäßige Faserlängenverteilung kann die Weiterverarbeitung des Fasermaterials erschweren. Durch die Zugabe von frischen PES-Fasern mit einer gleichmäßigen Faserlängenverteilung kann diese Problematik umgangen werden. Eine Beimischung von frischen PES-Fasern würde auch die spätere Garnherstellung erheblich vereinfachen, so dass auch höhere Prozessgeschwindigkeiten und eine höhere Wirtschaftlichkeit erreicht würde. Die Beimischung von frischen PES-Fasern sollte zwischen 10 bis 90 % variiert und validiert werden. Gleichzeitig sollte auch die Anwendung der Recyclingfasern Vliesstoffbereich untersucht werden.

Die Hydrolyse der Baumwolle, letztlich zur Gewinnung von Ethanol, konnte letztlich in einem zweistufigen Prozess gelöst werden, bei welchem zunächst einmal ein sehr feines CO-Prä-Hydrolysat unter milden Bedingungen erzeugt wird, welches dann durchgreifend mit starker Säure zu Mono- und Oligo-Sacchariden depolymerisiert wird. Die enzymatische Hydrolyse wurde eigentlich favorisiert, doch sind, wahrscheinlich durch die Färbung als elektrostatische Barriere und die häufig vorhandene Ausrüstung der Arbeitsbekleidung, sehr lange und unwirtschaftliche Hydrolysezeiten selbst für eine partielle Hydrolyse der Baumwolle erforderlich. Vergärung zum Ethanol, dessen Gewinnung und die Behandlung der Abwässer waren letztlich weitgehend unproblematisch. Die Ausbeute an sich bedarf weiterer Optimierungen im industriellen Maßstab.

Wirtschaftlich hochinteressant sind, neben der Garnherstellung, die Derivate des CO-Prä-Hydrolysates, welche gefärbt bereits als Pigmentersatz in wässrigen Beschichtungen für Textil und Leder und für Lacke erfolgreich getestet wurden. Dabei sind die Herstellungskosten niedrig und eine interessante Marge wäre erzielbar.

8 Literaturverzeichnis

- [DIN 53817] DIN 53817 Teil 1 und 2 Dez 1981
Bestimmung der Ungleichmäßigkeit an Faserbändern, Garnen und Zwirnen
- [DIN EN ISO 2060] DIN EN ISO 2060 : 1995-04
Bestimmung der Feinheit (Masse je Längeneinheit) durch Strangverfahren
- [DIN EN ISO 2062] DIN EN ISO 2062:2009
Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit
- [LH11] Lehmann, B.; Herzberg, C.: Kapitel 4: Garnkonstruktion und Garnbildungstechnik
In Cherif, C.:
Textile Werkstoffe für den Leichtbau.
Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- [Rie02] Betriebsanleitung UNIflex B 60, Rieter AG, 2002
- [Tem04] Maschinendatenblatt Lin-Stufenreiniger LIC, Temefa, 2004
- [Tem15] Sammelprospekt, Temafa, 2015
- Quelle Abb. 2 www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html
- Quelle Abb. 5 xray.bmc.uu.se/~wimal/projects/research.html
- Quelle Abb. 17 <http://www.biogest-international.de/deu/produkt-chemische-physikalische-abwasserreinigung-orcan-nassoxidation.htm>
- Quelle Abb. 18 Volmer 1982, in Eder-Schulz 2006