

PHILIPP SCHNEIDER

---

RECYCLING VON MISCHGEWEBEN AUS BAUMWOLLE UND  
PET- PROZESSENTWICKLUNG UND KOSTENSCHÄTZUNG

---



Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme  
Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik

## **MASTERARBEIT**

---

# **RECYCLING VON MISCHGEWEBEN AUS BAUMWOLLE UND PET- PROZESSENTWICKLUNG UND KOSTENSCHÄTZUNG**

---

von Philipp Schneider

Köln, 12.09.2019

Referent: Thomas Rieckmann, Prof. Dr.-Ing.  
Korreferent: Tim Schubert, Prof. Dr.-Ing.

# Zusammenfassung

---

Durch das permanente Wachstum der Weltbevölkerung wird der Bedarf von Textilien stetig steigen. Die Produktvielfalt sowie der Konsum der Textilien werden immer größer. Die aktuellen Recyclingtechniken ermöglichen es nicht, den Rohstoffkreislauf für Textilien zu schließen. Dies liegt auch darin begründet, dass derzeit große Mengen der Textilien aus Mischgeweben zwischen Baumwolle und PET bestehen. Die Trennung dieser Komponenten ist jedoch eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung eines geschlossenen Rohstoffkreislaufs und stellt gleichzeitig eine große Herausforderung für das Recycling dar. Durch chemische Recyclingverfahren können die Rohstoffe getrennt, aufbereitet und in die Textilproduktion zurückgeführt werden.

Ein mögliches Verfahren wäre die selektive Lösung der Baumwollfasern mit einem geeigneten Lösungsmittel und die mechanische Trennung der PET-Fasern von der Lösung. Das Lösungsmittel N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO) ist bereits großtechnisch zum Lösen von Cellulose für die Herstellung von Regeneratfasern im Einsatz und stellt gleichzeitig ein geeignetes Lösungsmittel für Baumwolle dar.

In dieser Arbeit wird aufgezeigt, wie ein chemischer Recyclingprozess, der einen geschlossenen Rohstoffkreislauf erlaubt, technisch realisiert werden kann. Der Prozess erzeugt eine PET-Fraktion und eine Celluloselösung, die in weiteren Verarbeitungsschritten zu einer Regeneratfaser versponnen wird. Das entwickelte Verfahren gilt für einen definierten Rohstoff, bei dem es sich um weiße bzw. ungefärbte Mischgewebe mit einem Baumwollanteil von 50 Gew.-% handelt. Gleichzeitig zeigt diese Arbeit, welche Herausforderungen für ein ganzheitliches Textilrecycling zu bewältigen sind und wie der Prozess dahingehend weiterentwickelt werden kann.

Der Prozess basiert auf einer intensiven Patent- und Literaturrecherche bezüglich der Recyclingverfahren für Textilien, den Aminoxidverfahren zur Herstellung von Regeneratfasern, sowie den rheologischen Eigenschaften des Lösungsmittelsystems Cellulose/NMMO/Wasser. Mit den Recherchen zu den Themen Textilrecycling und Aminoxidverfahren wurden die Grundfließbilder entwickelt. Aus den Grundfließbildern wurden unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften des Lösungsmittelsystems, die Verfahrensließbilder abgeleitet und die Hauptausrüstungsgegenstände dimensioniert.

In dieser frühen Projektphase werden in dieser Arbeit ebenfalls die Investitionsausgaben und die Herstellungskosten für das Verfahren abgeschätzt. Auf Grundlage der Dimensionierung wurden die Investitionsausgaben mit Hilfe geeigneter Kostenquellen wie z.B. dem DACE price booklet und der hybriden Hand-Methode abgeschätzt. Die Herstellungskosten wurden unter Berücksichtigung der variablen und fixen Kosten ermittelt.

Da sich der Prozess in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, wird in dieser Arbeit ebenfalls aufgezeigt, wie das systematische Vorgehen beim Bau einer Technikumsanlage zur Optimierung der vorangegangenen Entwicklungen aussehen könnte.

# Inhaltsverzeichnis

---

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	3
2.1	Textilien.....	3
2.1.1	Herstellung der Textilien.....	4
2.1.2	Nanomaterialien in Textilien.....	6
2.1.3	Farbstoffe für Textilien.....	6
2.2	Aktueller Stand der Recyclingtechnik.....	7
2.2.1	Textilabfälle als Rohstoff für Cellulosefasern.....	9
2.2.2	PET-Fasern.....	10
2.3	Herstellung von Chemiefasern aus Cellulose.....	11
2.4	Cellulose.....	12
2.4.1	Molekulare Struktur der Cellulose.....	13
2.4.2	Übermolekulare Struktur der Cellulose.....	14
2.4.3	Lösungsmittel für Cellulose.....	15
2.5	N-Methylmorpholin-N-oxid.....	16
2.5.1	Lösungsmechanismus des NMMO für Cellulose.....	16
2.5.2	Alternative Lösungsmittel – Ionic Liquids.....	17
2.6	Ternäres Phasendiagramm für das System NMMO/Wasser/Cellulose.....	17
2.6.1	Rheologische Eigenschaften von Cellulose in wässrigen NMMO-Lösungen.....	18
3	Grundlagen der Prozessentwicklung.....	21
3.1	Vorbehandlung der Mischgewebe.....	21
3.2	Lösen der Cellulose und Herstellung der Spinnlösung.....	22
3.3	Abtrennen der PET-Fasern.....	23
3.4	Nassspinnverfahren für die Herstellung von Cellulosefasern.....	23
3.5	Regeneration des Lösungsmittels – NMMO.....	23
4	Kostenschätzung – Methodik nach Hand.....	25
4.1	Hand-Faktoren.....	25
4.2	Korrekturfaktoren.....	25
4.3	Modifizierte Hand-Methode.....	28
5	Prozesssynthese und Analyse.....	29

5.1	Vorbehandeln der Mischgewebe .....	29
5.2	Mischen und Lösen.....	30
5.3	Trenntechnik .....	30
5.3.1	Filtration .....	30
5.3.2	Zentrifugation.....	31
5.4	Spinntechnik.....	32
5.5	Analyse .....	32
5.6	Ergebnis der Prozesssynthese .....	35
5.6.1	Anlagenstruktur.....	35
6	Prozessentwicklung .....	37
6.1	Grundfließbilder .....	37
6.1.1	Grundfließbild der Teilanlage 10 .....	38
6.1.2	Grundfließbild der Teilanlage 20 .....	39
6.1.3	Grundfließbild der Teilanlage 30 .....	40
6.1.4	Grundfließbild der Teilanlage 40 .....	41
6.1.5	Grundfließbild der Teilanlage 50 .....	42
6.2	Verfahrens und Apparateauswahl.....	43
6.2.1	Mischen und Lösen.....	43
6.2.2	Trenntechnik .....	48
6.3	Verfahrensfließbilder.....	57
6.3.1	Teilanlage 10.....	57
6.3.2	Teilanlage 20.....	58
6.3.3	Teilanlage 30.....	59
6.3.4	Teilanlage 40.....	60
6.3.5	Teilanlage 50.....	62
7	Dimensionierung der Hauptausrüstungsgegenstände.....	64
7.1	Teilanlage 10 – Vorbereitung der Mischgewebe.....	64
7.2	Teilanlage 20 – Lösen der Cellulose und Abtrennen des PET.....	66
8	Kostenschätzung der Recyclinganlage .....	70
8.1	Kostenschätzung nach der modifizierten Hand-Methodik .....	70
8.1.1	Teilanlage 10.....	70
8.1.2	Teilanlage 20.....	70
8.2	Kostenschätzung unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren.....	71
8.2.1	Teilanlage 10.....	71
8.2.2	Teilanlage 20.....	72

8.2.3	Schätzung der Ingenieursstunden.....	72
8.3	Kostenstrukturen.....	74
8.4	Schätzung der Herstellungskosten .....	75
8.4.1	Variable Kosten .....	75
8.4.2	Fixe Kosten .....	77
9	Projektierung der Technikumsanlage.....	80
9.1	Verfahrensfließbild der Technikumsanlage.....	80
10	Schlussfolgerung.....	82
11	Literaturverzeichnis.....	85
Anhang	.....	90

# Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

---

Index	Beschreibung	Einheit
EG	Ethylenglycol	
DMDHEU	Dimethyloldihydroxyethyleneurea	
NMMO	N-Methylmorpholin-N-oxid	
NMM	N-Methylmorpholin	
PET	Polyethylenterephthalat	
PES	Polyesterfasern	
TPA	Terephthalsäure	
A	Filterfläche	m <sup>2</sup>
DP	Polymerisationsgrad	-
d <sub>p</sub>	Partikeldurchmesser	µm
g	Schwerkraftbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> /K
L	Höhe des Filterkuchens	m
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/h
n	Drehzahl	min <sup>-1</sup>
p	Druck	bar
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
r	Radius	m
t	Zentrifugationszeit	s
T	Temperatur	°C
u	Geschwindigkeit	m/s
F	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /s
z	Schleuderzahl	-
$\alpha_V$	spezifischer Kuchenwiderstand	m <sup>-2</sup>
$\beta$	Filtermittelwiderstand	m <sup>-1</sup>
$\Delta p$	Druckdifferenz	Pa
$\Delta T_{log,m}$	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	K

$\eta$	dynamische Viskosität	Pa·s
$\eta_0$	Nullscherviskosität	Pa·s
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	s <sup>-1</sup>

# 1 Einleitung

---

Durch das permanente Wachstum der Weltbevölkerung leben Schätzungen zu Folge im Jahr 2050 ca. 9,7 Milliarden Menschen auf der Erde (United Nations, 2017). Der daraus resultierende Bedarf an Textilien wird damit stetig steigen. Im Jahr 2017 wurden weltweit ca. 95 Mio. t Textilfasern produziert. Etwa ein Viertel dieser Menge waren Baumwollfasern (Rauch, 2017). Die Agrarflächen sind für natürliche Rohstoffe, wie z.B. Baumwolle, begrenzt und stehen in direkter Konkurrenz zu den Agrarflächen für Nahrungsmittel und Biokraftstoffe. Die Forderung nach alternativen Produkten zur Baumwollfaser wird immer größer. Da sich die Produktionskapazität der Baumwolle kaum weiter steigern lässt, werden immer größere Mengen an synthetischen Fasern produziert (Nellemann, 2009). Diese machen ca. 75 % der weltweit produzierten Fasern aus. Der Großteil mit etwa 43 Mio. t/a besteht aus Polyethylenterephthalat (Rauch, 2017). Um den Bedarf an Textilien zu decken und die Eigenschaften der Textilien zu erweitern, bestehen diese oftmals aus Mischgeweben zwischen synthetischen Fasern und Naturfasern (Gordon, 2007).

Im direkten Zusammenhang mit der Textilproduktion, steht das Recycling. Denn der starke Konsum von Textilien führt weltweit zu einer großen Menge an Textilabfällen. Bisher fehlen adäquate Recyclingtechniken für Mischgewebe aus synthetischen und natürlichen Fasern, sodass daraus kein gleichwertiges Produkt entstehen kann. Eine Studie des Fachverbands für Textilrecycling besagt, dass im Jahr 2015 in Deutschland ca. 1,1 Mio. t. Textilien gesammelt wurden. Die Wiederverwendungsquote durch den Secondhandmarkt betrug 54 %, davon wurden allerdings nur ca. 4 % in Deutschland vermarktet und der Rest wurde innerhalb der EU, nach Afrika, Asien oder Südamerika exportiert. Des Weiteren warnt der Bundesverband für Sekundärrohstoffe und Entsorgung (BVSE) vor einem Kollaps des Secondhandmarkts. Durch die aktuelle Entwicklung der Modeindustrie, zu häufig wechselnden Kollektionen und immer günstigerer Kleidung, wird der Secondhandmarkt mit minderwertigen Materialmix-Textilien überhäuft (Korolkow, 2015). Hinzu kommt, dass die Wiederverwendung und der Export keine Lösung für die Abfallproblematik darstellt. Die Probleme werden lediglich verschleppt. Als Alternativen zur Wiederverwendung gibt es das mechanische Recycling oder die thermische Verwertung. Innerhalb des mechanischen Recyclings werden die Textilabfälle durch mechanische Krafteinwirkung und dem daraus resultierenden Zerfall des Textilgefüges wieder in die ursprüngliche faserige Form gebracht. Dabei entstehen Produkte niedriger Qualität wie z.B. Reißfasern für Dämmstoffe und Füllstoffe oder Reinigungstücher. Nur sehr geringe Mengen, wie z.B. reine Baumwolltextilien, können durch die aktuellen Recyclingtechniken als Rohstoff für die Textilproduktion zurückgeführt werden (Elander, 2016).

## 1.1 Motivation

Bedingt durch den steigenden Bedarf an Textilien, den damit verbundenen Textilabfällen und ökologischen Aspekten, wie die Umweltbelastung, ist es besonders wichtig einen geschlossenen Materialkreislauf für Textilien zu entwickeln. Ein großes Hindernis für die Rückführung der Stoffe in die Textilproduktion ist die Trennung der Mischgewebe. Um dieses Hindernis zu überwinden können stattdessen chemische Recyclingverfahren angewendet werden (Björquist, 2017). In der Patent- und Fachliteratur gibt es bereits Studien, die sich mit der Trennung der Mischgewebe aus

Baumwolle und PET beschäftigen. Das selektive Lösungsmittel N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO) wird bereits als Lösungsmittel für die Cellulose aus Holzstoffen bei der industriellen Herstellung von Chemiefasern, die gleichwertige Eigenschaften wie Baumwollfasern besitzen, verwendet (Chavan, 2003). Das Lösungsmittel kann ebenfalls bei der Trennung von Mischgeweben aus Baumwolle und synthetischen Fasern verwendet werden (Sayed et al., 2019; Walker, 2013; Schneider, 2019b). Die PET-Anteile könnten anschließend separat aufbereitet und in die Faser- bzw. Textilproduktion rückgeführt werden.

## 1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll ein Prozess für das Recycling von Mischgeweben aus Baumwolle und PET entwickelt werden. Bei diesem Prozess soll die Baumwolle in wässriger Phase mit Hilfe des selektiven Lösungsmittels N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO) aus dem textilen Verbund gelöst werden. Die weiteren technischen Funktionen sind das Abtrennen des PET von der flüssigen Phase und das Ausfällen der Cellulose, sowie die Aufbereitung des Lösungsmittels. Ebenfalls ist die Machbarkeit einer Produktionsanlage im industriellen Maßstab zu untersuchen. In Abb. 1-1 ist die Gesamtfunktion des Prozesses schematisch dargestellt.

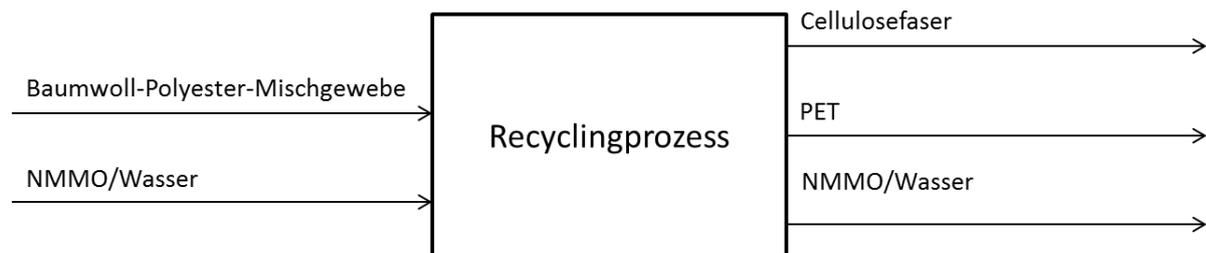


Abb. 1-1 – Grundfließbild des Recyclingprozesses für Mischgewebe aus Baumwolle und PET

# 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Für die Prozessentwicklung, Machbarkeitsstudie und Projektierung einer Anlage, ist eine detaillierte Betrachtung des gesamten Prozesses notwendig. Denn um für den gegebenen Zweck des Textilrecyclings eine Prozesskonfiguration zu finden, gibt es einen bestimmten Informationsbedarf, der in diesem Kapitel erarbeitet werden soll (Blass, 1997). Dazu zählen Informationen über Textilien und ihre allgemeinen Recyclingtechniken, Eigenschaften der Rohstoffe, Wechselbeziehungen der Rohstoffe und weitere Grundlagen für die Planung einer Anlage zur Herstellung von Chemiefasern und gleichzeitigem Recycling der Mischgewebe aus der allgemeinen Patentliteratur.

## 2.1 Textilien

Textilien gehören seit vielen Jahrhunderten zu den Grundbedürfnissen der Menschen. Die ersten Fasererzeugnisse waren die Naturfasern. Dafür wurden pflanzliche, tierische oder mineralische Rohstoffe verwendet. Die Baumwollfaser ist die bedeutendste Naturfaser der Menschheit und gleichzeitig eine der reinsten Cellulosequellen. Die Baumwollfasern enthalten 88,0 – 96,5 % Cellulose. Die nicht-cellulosischen Bestandteile sind Proteine, Wachse, Pektine, anorganische Stoffe und andere Substanzen (Sixta, 2006). Heutzutage finden Textilien im Bekleidungssektor, im Bereich der Heim- und Nutztexilien sowie im technischen Bereich Anwendung. Dies erfordert ein breites Eigenschaftsspektrum der Textilfasern und daher sind mit der Zeit weitere Textilfasertypen entwickelt worden. Hinzu kamen die Chemiefasern auch „Man-made-fibres“ genannt. Dazu gehören die Regeneratfasern und die synthetischen Fasern. Regeneratfasern werden aus nachwachsenden Rohstoffen, wie z.B. Cellulose, durch verschiedenen chemische Prozesse hergestellt. Die Produktion von synthetischen Fasern erfolgt aus fossilen Rohstoffen. In Abb. 2-1 ist die Klassifizierung der Textilfasern schematisch dargestellt (Schneider, 2019b).

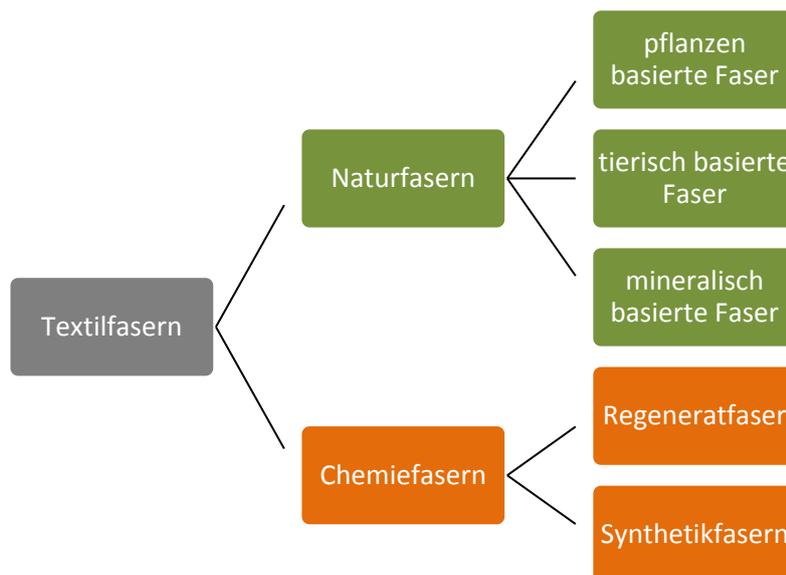


Abb. 2-1 - Klassifizierung der Textilfasern (Sayyed et al., 2019)

## 2.1.1 Herstellung der Textilien

Die Produktion der Textilien setzt sich aus einer Vielzahl von Fertigungsstufen zusammen. Die Abb. 2-2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Fertigungsschritte der verwendeten Rohstoffe. Zum Einsatz kommen sowohl fossile Rohstoffe für synthetische Fasern als auch nachwachsende Rohstoffe wie z.B. Baumwolle für Natur- und Regeneratfasern. Betrachtet man die Herstellungsprozesse genauer wird deutlich, dass der Anteil der chemischen Verarbeitungsschritte und damit auch der Einsatz von Chemikalien bei der Herstellung von Textilien aus Naturfasern keineswegs geringer ist als bei Produktion der Chemiefasern (Gries et al., 2015).

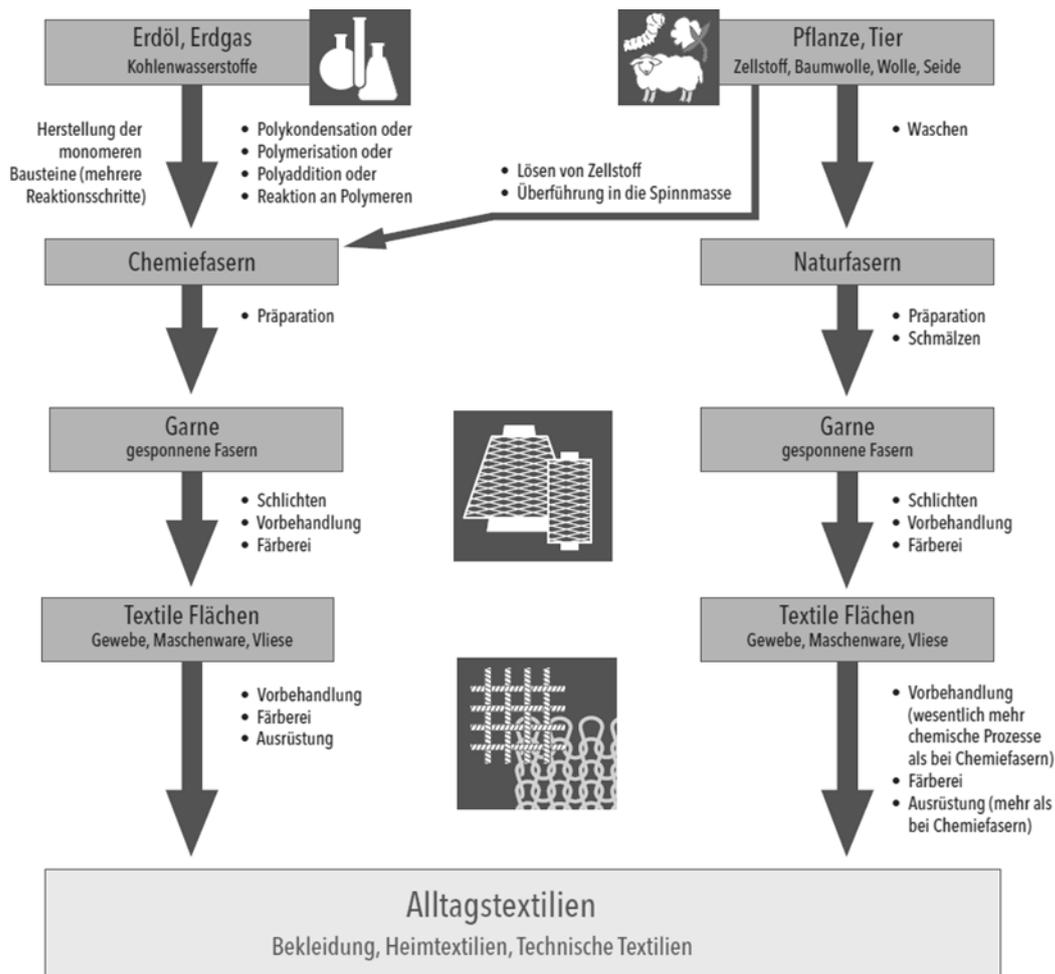


Abb. 2-2 - Die Fertigungsstufen vom Rohstoff bis zum Textil (Bode, 2007)

Im ersten Prozessschritt werden die Fasern hergestellt und anschließend zu Garnen weiterverarbeitet. Die Garne können in unterschiedlichen Strukturen aufgebaut werden. Ein Überblick typischer Garnstrukturen ist in Abb. 2-3 dargestellt. Bei „Spinnfasergarn“ handelt es sich um Garne, die aus Stapelfasern (d.h. Fasern mit definierter Länge, wie z. B. Baumwollfaser oder geschnittene Chemiefasern) hergestellt werden. Gefachte Garne bestehen aus mindestens zwei nebeneinander liegenden Garnen, Zwirne aus mindestens zwei miteinander verdrehten Garnen (Gries et al., 2015).

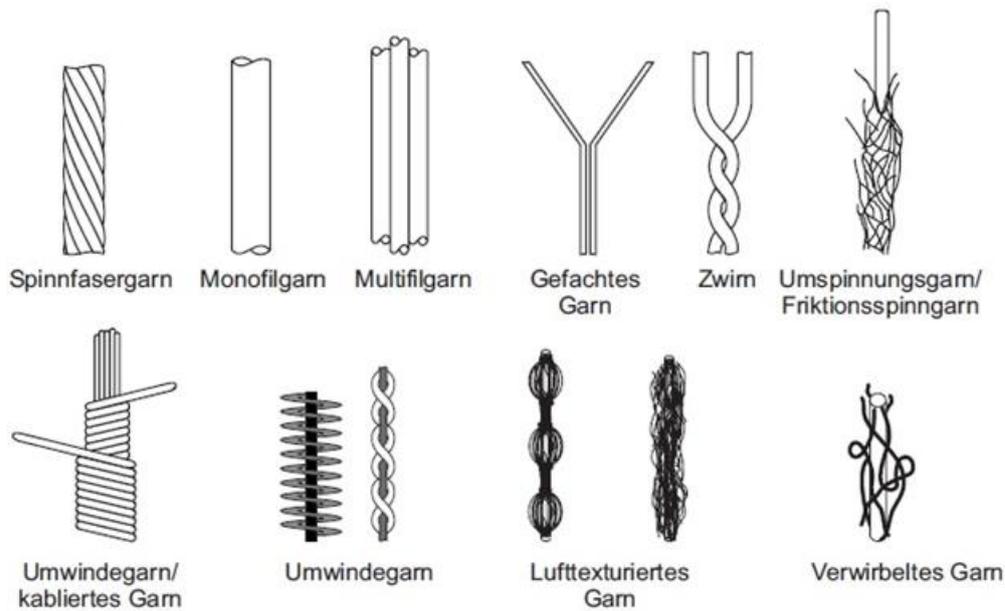


Abb. 2-3 – Übersicht für unterschiedliche Garnstrukturen (Gries et al., 2015)

Vor der Vollendung zu einem Textil werden die Fasern bzw. Garne zu Flächengebilden weiterverarbeitet. Dabei wird zwischen faserbasierten und garnbasierten Flächen unterschieden. Eine Übersicht der möglichen Flächenstrukturen ist in Abb. 2-4 zu sehen. In den Fertigungsstufen der Garn- bzw. Flächenherstellung, werden die Textilien gefärbt und mit weiteren Additiven (Nanomaterialien) versehen (Gries et al., 2015).

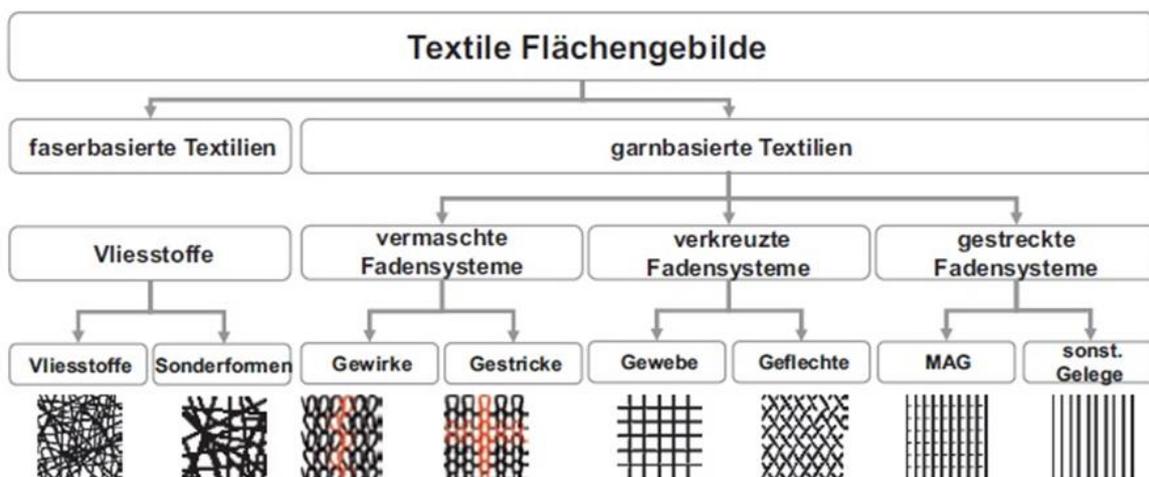


Abb. 2-4 – Einteilung der Flächenstrukturen von Textilien (Gries et al., 2015)

## 2.1.2 Nanomaterialien in Textilien

Nanomaterialien werden in Textilien eingesetzt, um die Funktionalität und das Eigenschaftsspektrum zu verbessern bzw. zu erweitern. Sie können entweder während der Faserherstellung oder während der Fertigung der textilen Flächengebilde hinzugefügt werden. Die Nanomaterialien werden unmittelbar auf die Faseroberfläche aufgetragen oder in die oberen Faserschichten eingearbeitet. Sie können als Einzelpartikel, als agglomerierte (schwach gebunden) oder aggregierte (stark gebunden) Nanopartikelklümpchen von verschiedener Größe und Form aufgebracht werden. Die häufigsten in Textilien eingesetzten Nanomaterialien sind: Titandioxid, Siliziumdioxid, Zinkoxid, Silber und Kupfer. In Tabelle 2-1 ist eine Übersicht der Nanomaterialien und ihre möglichen Eigenschaften gegeben (UBA, 2013).

Nanomaterial	Eigenschaften von Nanomaterial
<b>Titandioxid</b>	Mattierungsmittel, Färbbarkeit, antimikrobiell, selbstreinigend und wasserabweisend, UV-Schutz,
<b>Zinkoxid</b>	erhöhte Strapazierfähigkeit, antimikrobiell
<b>Siliziumdioxid</b>	verbesserte Färbbarkeit
<b>Kupfer</b>	antistatisch
<b>Silber</b>	antimikrobiell
<b>Industrieruß (engl. Carbon Black)</b>	verbesserte Färbbarkeit, antistatisch
<b>Polypyrrol</b>	antistatisch
<b>Polyanilin</b>	antistatisch
<b>Flouracrylat</b>	wasserabweisend
<b>Kohlenstoffnanoröhre (engl. CNT)</b>	antistatisch, wasserabweisend, selbstreinigend, Feuerfestigkeit, isolierend, Abriebfestigkeit

Tabelle 2-1 - Allgemein verwendete Nanomaterialien und ihre Eigenschaften in der Textilindustrie (UBA, 2013)

## 2.1.3 Farbstoffe für Textilien

Die Farbstoffe für Textilien lassen sich nach dem färbetechnischen Verfahren und nach der chemischen Struktur des Farbstoffs unterteilen. Für das chemische Recycling sind das Wissen über die Bindung und Anlagerung des Farbstoffs an der Faser, also die chemische Struktur und der Aufbau des Farbstoffs wichtig (DIN EN ISO 16373-1).

Je nach Färbeverfahren und Farbstoff gibt es folgende Bindungs- bzw. Anlagerungsmöglichkeiten des Farbstoffs:

- Van-der-Waals-Kräfte
- ionische Bindungen
- kovalente Bindungen
- koordinative Bindung
- Anlagerung in Faserhohlräumen
- Anlagerung im Molekülgitter eines synthetischen Polymers

In Tabelle 2-2 sind die nach DIN EN ISO 16373-1 wichtigsten Farbstoffklassen der Textilindustrie aufgeführt:

Farbstoffklasse	Beschreibung
Säurefarbstoff	Ein Säurefarbstoff ist ein wasserlöslicher anionischer Farbstoff unter Verwendung neutraler bis saurer Farbstoffbäder. Die Bindung an der Faser (z. B. Proteinfasern und Polyamid Fasern) wird zumindest teilweise der Salzbildung zwischen anionischen Gruppen in dem Farbstoff und kationischen Gruppen in der Faser zugeschrieben.
Metallkomplexfarbstoff	Ein Metallkomplex-Säurefarbstoff ist ein Säurefarbstoff, der über ein zentrales Metallatom in seinem Molekül verfügt.
Azofarbstoff	Der Azofarbstoff ist ein Farbstoff, der über die Funktionsgruppe R=N=N-R' verfügt, wobei R und R' entweder Aryl oder Alkyl sein können. Die N=N-Gruppe wird als eine Azogruppe bezeichnet.
Basischer Farbstoff	Ein basischer Farbstoff ist ein wasserlöslicher kationischer Farbstoff unter Verwendung neutraler bis saurer Farbstoffbäder. Die Bindung an der Faser (z. B. Acryl) wird zumindest teilweise der Salzbildung zwischen kationischen Gruppen im Farbstoff und anionischen Gruppen in der Faser zugeschrieben.
Beizenfarbstoff	Ein Farbstoff, der eine Verbindung mit einem Metallion (z. B. Chrom) bilden kann, wodurch sich ein Metallkomplexfarbstoff innerhalb der Faser bildet.
Direktfarbstoff	Ein üblicherweise in einem elektrolythaltigen Wasserbad aufgebracht anionischer Farbstoff, der durch mechanische Adsorption mit der Faser (z. B. Cellulosefasern, Polyamidfasern) interagiert.
Dispersionsfarbstoff	Ein wasserunlöslicher Farbstoff mit einer Affinität für hydrophobe Fasern (z. B. Polyester und Acetatfasern). Das Farbmittel lagert sich im Molekülgitter an.
Reaktivfarbstoff	Ein Reaktivfarbstoff enthält spezifische reaktive Gruppen, die mit dem Fasersubstrat chemisch reagieren können, um eine kovalente chemische Bindung zwischen dem Farbstoff und der Faser herzustellen.
Schwefelfarbstoff	Schwefelfarbstoff ist wasserunlöslich. Er muss bei einer Temperatur von etwa 80 °C mit einem Reduktionsmittel und einem Alkali behandelt werden; dabei bricht der Farbstoff in kleine Teilchen auf, die dann wasserlöslich werden und deshalb von der Faser absorbiert werden können.
Küpenfarbstoff	Der Küpenfarbstoff ist im Wesentlichen wasserunlöslich und kann Fasern nicht direkt färben. Die Reduktion in alkalischer Lösung erzeugt jedoch das wasserlösliche Alkalimetallsalz des Farbstoffes, das in dieser Leukoform über eine Affinität zur Textilfaser verfügt. Die nachfolgende Oxidation bildet erneut den unlöslichen Ursprungsfarbstoff.

Tabelle 2-2 – Übersicht der Farbstoffklassen in der Textilindustrie (DIN EN ISO 16373-1)

## 2.2 Aktueller Stand der Recyclingtechnik

Für das Recycling bzw. eine Verwertung von Textilien gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten (vgl. Abb. 2-5). Die Wiederverwendung (engl. Reuse) und das mechanische Recycling (Open-loop-Recycling in Form von Downcycling) sind bereits als Verwertungswege etabliert. Bei der Wiederverwendung werden die Textilien dem Secondhandmarkt (ca. 50-60 % der jährlich gesammelten Textilien) zugeführt und neu vermarktet bzw. exportiert. Beim sogenannten „Open-loop-Recycling“ oder auch „Downcycling“ genannt, werden die Textilien (ca. 15-20 % der jährlich gesammelten Textilien) mechanisch recycelt. Neben der Wiederverwendung und dem

mechanischen Recycling, wird ein weiterer großer Teil thermisch verwertet (Energierückgewinnung) (Sandin, 2018). Nur sehr geringe Mengen der Textilabfälle, werden wieder der Textilfaserproduktion zugeführt (Palme et al., 2017).

Beim mechanischen Recycling wird das Textilgefüge durch mechanische Krafteinwirkung in eine faserige Form überführt. Das erhaltene Material kann für die Bildung von Vliesstoffen, als Dämm- oder Füllmaterial verwendet werden. Die Homogenität hinsichtlich Fasermischung und Farbe ist in solchen Anwendungen meist von geringer Bedeutung. Mechanisches Recycling führt in der Regel zu einem Produkt von niedrigerem Wert, daher der Begriff „Downcycling“. Ebenfalls kann sich die Faserlänge durch die starke mechanische Krafteinwirkung erheblich reduzieren (Elander, 2016).

Angesichts der aktuellen Verwertungswege besteht ein großes Potenzial für chemische Recyclingtechniken, die eine Trennung der Mischgewebe und eine Rückführung der Rohstoffe in den Faserproduktionsprozess erlauben (Closed-loop-Recycling). Das chemische Recycling erfordert reine Fraktionen und daher ist die Entwicklung von Trennverfahren ein zentrales Thema für den Fortschritt des chemischen Textilrecyclings (Palme et al., 2017).

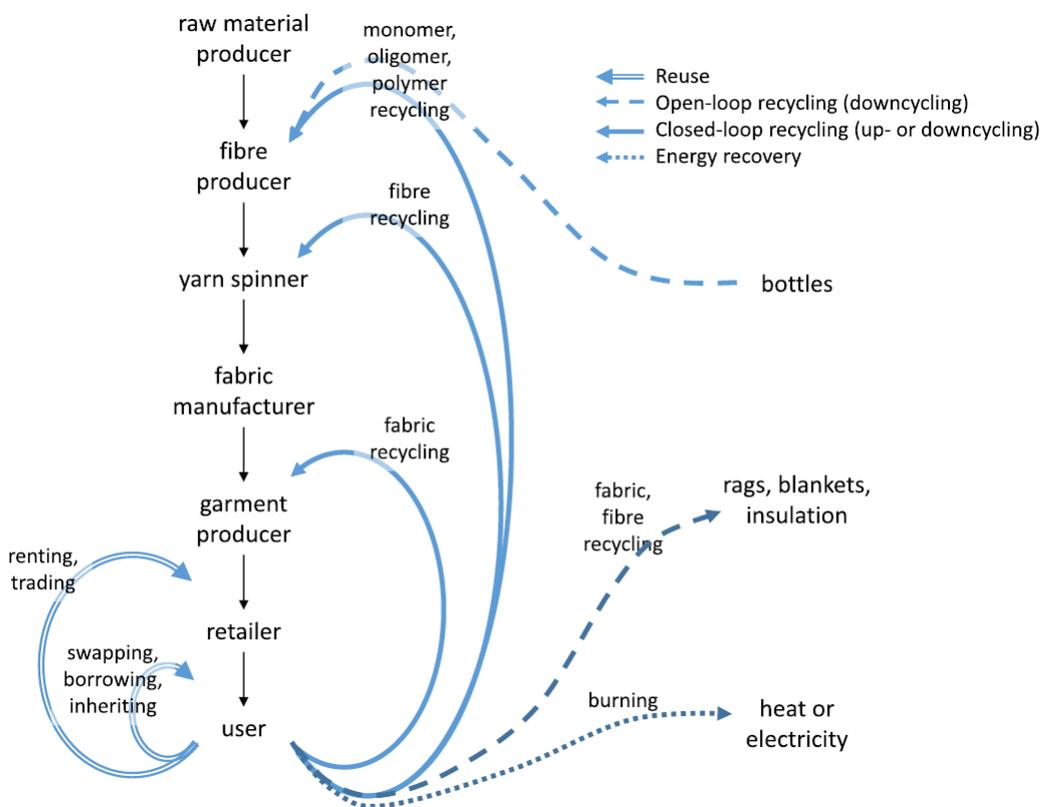


Abb. 2-5 – Klassifizierung der Verwertungswege für Textilien (Sandin, 2018)

Das chemische Textilrecycling beinhaltet somit die Trennung der Mischgewebe, z.B. durch Depolymerisation oder durch Lösen einer Komponente aus dem Faserverbund mit selektiven Lösungsmitteln. Damit ergeben sich zwei Hauptwege, um beispielsweise ein Baumwoll-Polyester-Mischgewebe zu trennen. Je nachdem, ob diese Ansätze auf Baumwolle oder Polyester angewendet werden, existieren vier Möglichkeiten (vgl. Abb. 2-6) für das Recycling von Baumwoll-Polyester-Mischgeweben (Björquist, 2017; Peterson, 2015).

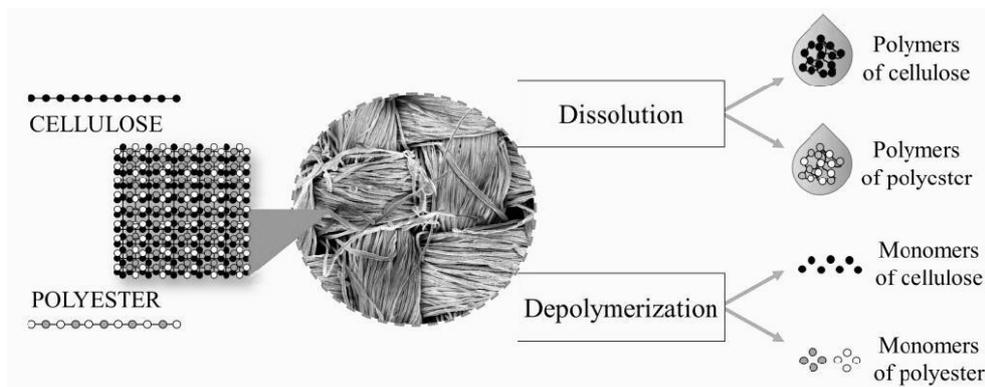


Abb. 2-6- Übersicht der Trennungswege für Mischgewebe

Der Ansatz dieser Arbeit ist es, die Cellulose aus den Mischgeweben textiler Abfälle selektiv zu lösen und das PET als feste Phase abzutrennen. Er ist darin begründet, dass das Lösen und Regenerieren der Cellulose, bereits für die Herstellung von Chemiefaser in der Textilfaserproduktion im industriellen Maßstab angewendet wird. Das Verfahren nennt sich Aminoxidverfahren und hat sich seit den 1980er Jahren im industriellen Maßstab etabliert. Bei diesem Verfahren werden Chemiefasern aus einer Celluloselösung hergestellt. Die Cellulose wird dabei aus verschiedenen Holzarten bzw. dem Zellstoff der Holzarten gelöst und wieder regeneriert (Rosenau et al., 2019). In der Celluloseforschung wurden in Bezug auf das Aminoxidverfahren viele Bemühungen unternommen, um die Cellulose effektiv zu lösen. Dabei sind verschiedenste Lösungsmittel untersucht worden. Die Studien haben ergeben, dass N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO) als selektives Lösungsmittel für Cellulose besonders gut geeignet ist (Chavan, 2003). Das Aminoxidverfahren unter Verwendung des NMMO als Lösungsmittel gilt als besonders ökonomisch, da das NMMO regeneriert wird und Umweltbelastung durch das Lösungsmittel gering ist. Es gibt bereits viele Untersuchungen und Patente die sich mit dem System Cellulose und NMMO befassen (Walker, 2013; Sayyed et al., 2019; Cibik, 2003; Peters, 2004).

### 2.2.1 Textilabfälle als Rohstoff für Cellulosefasern

Die Textilabfälle sind im Gegensatz zu den Holzstoffen als natürliche Rohstoffe für die Cellulose mit Farbstoffen, Additiven und sogenanntem „spin finish“ für die Faserherstellung versehen (Gries et al., 2015).

Erste Prozessentwicklungen des Rohstoffs Baumwolle für das Aminoxidverfahren stammen aus dem Jahr 1995. Dieser Prozess beinhaltet die selektive Lösung der Cellulose aus der Baumwolle mittels NMMO. Die physikalischen Eigenschaften der hergestellten Cellulosefasern aus Baumwolle waren sehr ähnlich im Vergleich zu den herkömmlich hergestellten Cellulosefasern aus Holzstoffen (Firgo, 1995). Die Einflüsse der Farbstoffe, Additive und der „spin finish“s, welche in den Textilabfällen enthalten waren, sind nicht berücksichtigt worden (Haule et al., 2016).

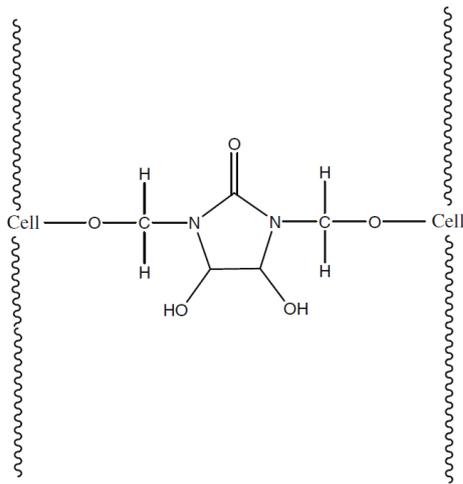


Abb. 2-7 – Querverbindung zwischen DMDHEU und Cellulose (Cell = Cellulose) (Haule, 2014)

Bei dem „spin finish“, der besonders für die Veredelung der Baumwollfasern eingesetzt wird, handelt es sich oftmals um Dimethyloldihydroxyethyleneurea (DMDHEU). Dadurch werden wesentliche Eigenschaften wie Knitterreduzierung, Schmutzabweisung und Fixierung von Farbstoffen positiv beeinflusst (Bollmus, 2000; Haule et al., 2012). Die Faltenbildung in Baumwollgeweben tritt hauptsächlich durch den Waschprozess auf, weil die Wasserstoffbrücken durch die mechanische Verformung in der Drehtrommel gelöst werden. Besonders die Nässe und das damit verbundene Aufquellen der Faser verringert die Kohäsion zwischen den Polymerketten. Es entstehen teilweise neue Wasserstoffbrücken, die sich dann im trockenen Gewebe als Falten widerspiegeln. Auch am Ende ihres Lebenszyklus besitzen die Textilgewebe noch signifikante Mengen des DMDHEU (Haule et al., 2016). Das DMDHEU bildet Esterbindungen mit den Hydroxylgruppen der Cellulose und erzeugt so eine Quervernetzung (vgl. Abb. 2-7) zwischen den Cellulosepolymeren (Haule, 2014).

Basierend auf dem Vernetzungsmechanismus des DMDHEU mit der Cellulose ist davon auszugehen, dass sich diese vernetzte Cellulose nicht gleichermaßen löst wie DMDHEU-freie Cellulose. Das DMDHEU kann mittels Alkali- und Säurebehandlungen effektiv entfernt werden. Durch diesen Prozessschritt wird der Polymerisationsgrad der Cellulose verringert. Dies ist allerdings als unkritisch zu bewerten, da der endgültige Polymerisationsgrad der Cellulose nach der Behandlung den üblichen Bereich für die Faserproduktion im Aminoxidverfahren nicht unterschreitet. Ebenfalls wird erwähnt, dass die Mischung aus Primärzellstoff und der Cellulose aus Baumwollgewebe ein kommerzielles Ausgangsmaterial für das Aminoxidverfahren bilden kann (Haule, 2014).

### 2.2.2 PET-Fasern

Polyethylenterephthalat (PET) ist einer der am häufigsten verwendeten Kunststoffe in der Textil- und Lebensmittelverpackungsindustrie. Die jährlich produzierten Chemiefasern bestehen zu großen Anteilen aus PET. In der Textilindustrie werden die Chemiefasern aus PET auch als Polyesterfasern (PES) bezeichnet. Das Polymer wird durch eine Stufenwachstumsreaktion aus den Stoffen Terephthalsäure (TPA) und Ethylenglycol (EG) hergestellt. Die Strukturformel der Wiederholeinheit von PET ist in Abb. 2-8 dargestellt.

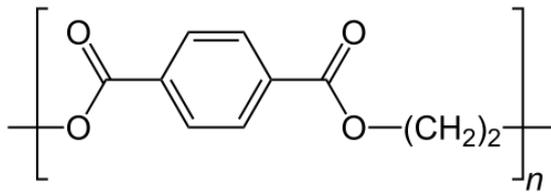


Abb. 2-8 – Molekulare Struktur der PET Wiederholungseinheit (Björquist, 2017)

Polyesterfasern werden in der Textilindustrie durch Schmelzspinnverfahren hergestellt. Das Schmelzspinnverfahren ist in der Praxis ein sehr komplexes Verfahren, da die Fasern viele verschiedene Eigenschaften erfüllen müssen. Zum einen die mechanischen Eigenschaften, wie z.B. eine gewisse Zugfestigkeit der hergestellten Produkte, Reibungseigenschaften die für die folgenden Bearbeitungsschritte der Textilherstellung notwendig sind, wie z.B. die Texturierung und weitere Eigenschaften, die z.B. für den Färbeprozess unterstützend sind. Die Reibungseigenschaften werden durch sogenannte „spin finish“ erzeugt. Dabei wird die Garnoberfläche mit verschiedenen Wasseremulsionen und Schmierstoffmineralien behandelt. Um die Eigenschaften für den Färbeprozess zu erfüllen wird bei der Polykondensation Titandioxid als Mattierungsmittel hinzugefügt. Dafür werden dem Glykol noch 0,1 bis 0,5 % Titandioxid, welcher auch zeitgleich katalytisch wirkt, zugesetzt (McIntyre, 2005).

Für das Recycling des PET können Extruder verwendet werden, um das PET zu einem Regranulat zu verarbeiten. Die Recyclingmethoden für Polyester gehören zum Stand der Technik und werden im Rahmen des PET-Flaschenrecyclings sehr facettenreich praktiziert und weiterentwickelt. Aus dem Bereich des Recyclings von PET-Flaschen gibt es bereits Verfahren und Patente um das PET zu dekontaminieren um den Rohstoff anschließend wieder in der Lebensmittelindustrie einzusetzen. Dabei wird zerkleinertes PET mit einer „solid state polycondensation“ behandelt. Bei diesem Prozess findet eine Dekontamination durch Veränderung der Molekülketten des PET statt (Rieckmann, 2013). Als alternatives Dekontaminationsverfahren gibt es ein Hydrolyseverfahren unter Herstellung von Bishydroxyethylterephthalatester und Ethandiol, bei dem durch den Einsatz von Aktivkohle und aktiviertem Ton Farbstoffe, Pestizide und/oder gefärbte Polymere adsorbiert werden (West, 1995). Für eine Dekontamination von Polyesterfasern können diese Verfahren wahrscheinlich nicht übertragen werden. Aber deren Ansätze könnten für weitere Forschungszwecke nützlich sein.

Welches Verfahren für Polyester, der seinen Ursprung in der Textilindustrie hat, am besten geeignet ist, muss weiter untersucht werden. Der wichtigste Prozessschritt stellt weiterhin die effektive Trennung zwischen Baumwolle und Polyester dar. Anschließend ist eine Untersuchung bezüglich der Dekontamination sinnvoll und die Abscheidung der Additive im textilen PET wie z.B. das Mattierungsmittel Titandioxid von elementarer Bedeutung (Schneider, 2019a).

## 2.3 Herstellung von Chemiefasern aus Cellulose

Für die Herstellung von Chemiefasern aus Cellulose wird die Cellulose in eine Lösung überführt und innerhalb eines Spinnprozesses geformt und wieder ausgefällt bzw. regeneriert. Eine Übersicht der einzelnen Prozesse für die Herstellung verschiedenster Chemiefasern aus Cellulose ist in Abb. 2-9 dargestellt. Es gibt zwei Hauptprozesse, den Derivatisierungsprozess und den Direktlösungsprozess (ohne Derivatisierung). Im Derivatisierungsprozess wird die Cellulose modifiziert, d.h. es werden Cellulosederivate wie z.B. Cellulosenitrat, Celluloseacetat oder Viskose gebildet. Im Direktlösungsprozess wird die Cellulose ohne Derivatisierung zur Faser gesponnen.

Der Direktlösungsprozess beinhaltet ein Kupfer-Ammoniak-Verfahren (zur Herstellung von Cupro auch Kupferseide genannt), ein Verfahren in dem die Cellulose durch das Lösungsmittelsystem LiCl/DMAc (Lithiumchlorid/Dimethylacetamide) gelöst wird. Das Aminoxidverfahren wird auch Lyocellprozess genannt. Für den Lyocellprozess können neben dem Lösungsmittel NMMO alternativ ionische Flüssigkeiten als Lösungsmittel eingesetzt werden (Woodings, 2001)

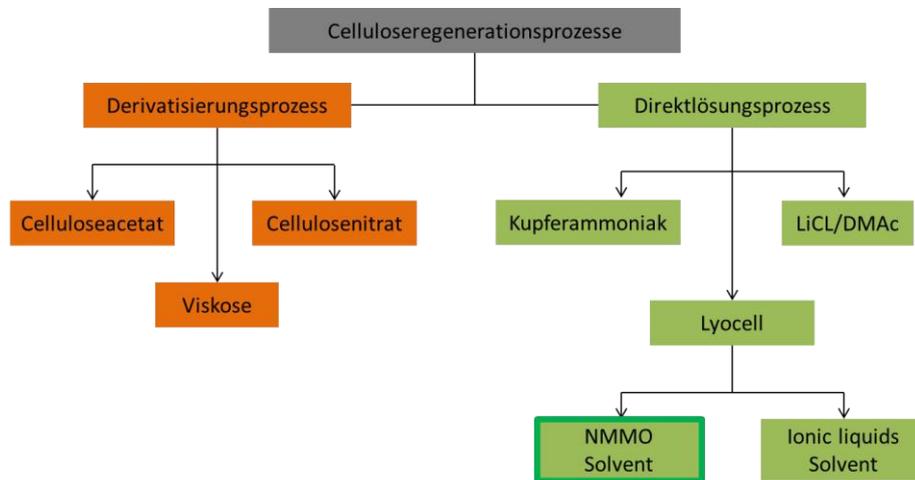


Abb. 2-9 – Klassifizierung der Celluloseregenerationsprozesse (Sayyed et al., 2019)

Ein allgemeines Prozessschema für das Aminoxidverfahren als Direktlösungsprozess, wie z.B. den Lyocellprozess, ist in Abb. 2-10 dargestellt. Die Cellulose wird in einer wässrigen NMMO-Lösung in eine flüssige Phase überführt. Nach einem Filtrationsschritt wird die Lösung durch das Nassspinnverfahren zu Fasern geformt und anschließend gewaschen, veredelt und getrocknet. Als Produkt entstehen Regeneratfasern. Beim Waschprozess wird die Cellulose ausgefällt und das Lösungsmittel aus der Faser entfernt. In einem weiteren Prozessschritt wird das Lösungsmittel regeneriert und aufbereitet (Woodings, 2001; Sayyed et al., 2019).

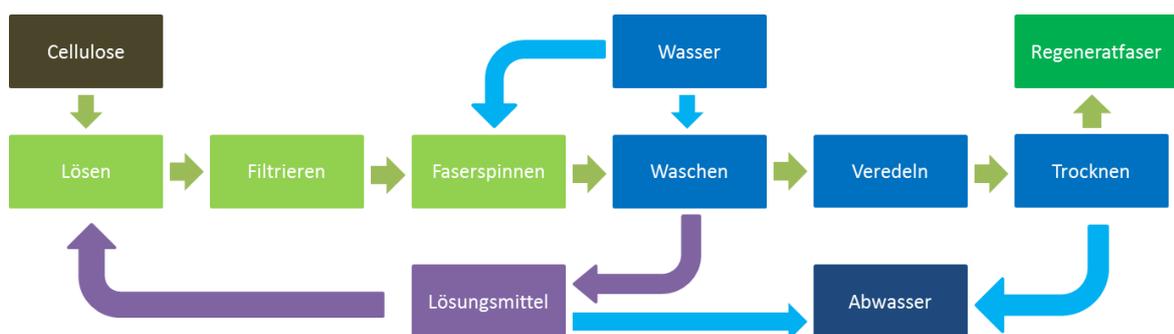


Abb. 2-10 – Allgemeines Prozessschema für die Herstellung von Regeneratfasern aus Cellulose (Sayyed et al., 2019)

## 2.4 Cellulose

Die Cellulose ist das weltweit am häufigsten vorkommende nachwachsende Polymer. Die kommerzielle Celluloseproduktion konzentriert sich auf Erntequellen wie Holz oder auf hochreine Quellen wie Baumwolle (Sixta, 2006). Die Cellulose der Baumwolle hat das höchste Molekulargewicht und die höchste strukturelle Ordnung unter allen Pflanzenfasern. Die Struktur der Cellulose in Baumwollfasern ist hochkristallin, orientiert und fibrillär (faserförmig gestreckt)

(Gordon, 2007). In den primären Zellwänden der Baumwollfaser liegt der Polymerisationsgrad (DP) der Cellulose zwischen 2.000 und 6.000. Die Sekundärwand der Baumwolle besteht fast zu 100 % aus Cellulose. In der Sekundärwand beträgt der DP ca. 12000 - 14.000 und die Molekulargewichtsverteilung ist gleichmäßiger. Bei zu großer Wärmeeinwirkung zersetzt sich Cellulose. Es ist bisher unmöglich Cellulose zu schmelzen und somit thermoplastisch zu verarbeiten (Gordon, 2007; Cibik, 2003).

Daher werden für die Verarbeitung der Cellulose Verfahren eingesetzt, die auf der Verwendung von Lösungsmitteln basieren. Um die Eigenschaften und das Verhalten der Cellulose bei chemischer bzw. physikalischer Behandlung nachvollziehen zu können, muss die molekulare und übermolekulare Struktur der Cellulose betrachtet werden (Peters, 2004; Woodings, 2001).

### 2.4.1 Molekulare Struktur der Cellulose

Das Monomer der Cellulose wird Cellobiose genannt und besteht aus zwei  $\beta$ -1,4-D(+)-Glucopyranose-Einheiten, wie in Abb. 2-11 gezeigt. Diese Einheiten sind mit einer abwechselnden  $180^\circ$  Konfiguration um die Kettenachse 1,4-glycosidisch verknüpft. Die sterischen Effekte verhindern die freie Rotation um diese Verknüpfung. Jede Glucopyranose-Einheit besitzt drei Hydroxylgruppen, eine primäre an C-6 und zwei sekundäre an C-2 und C-3. Die Hydroxylgruppen und die Kettenkonformation ermöglichen eine umfassende intermolekulare und intramolekulare Wasserstoffbrückenbildung (Gordon, 2007). Die Wasserstoffbrückenbindungen sind für die Eigenschaften der Cellulose hinsichtlich Löslichkeit und dem Verhalten bei Erhitzung verantwortlich (Peters, 2004).

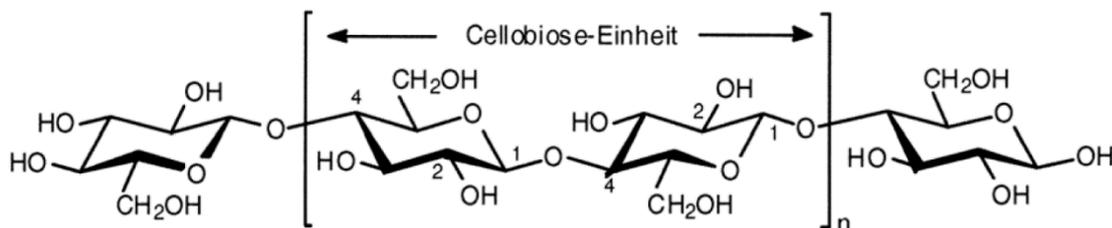


Abb. 2-11 – Molekülstruktur der Cellulose (Cibik, 2003)

## 2.4.2 Übermolekulare Struktur der Cellulose

Die übermolekulare Struktur von Baumwollcellulose wurde mittels Röntgenkristallographie, einem gut entwickelten und leistungsfähigen Werkzeug für die Erkennung des strukturellen Aufbaus von Polymerfeststoffen, untersucht (Gordon, 2007). Die Cellulose kann verschiedene Kristallgitter bilden. Dabei wird zwischen vier Modifikationen unterschieden, die mit Cellulose I, II, III und IV bezeichnet werden (Cibik, 2003). Die bedeutendsten Modifikationen sind die native Cellulose I und die durch Regeneration (Lösen von Cellulose I und anschließendes Ausfällen) gewonnene Cellulose II. Die wesentlichen Unterschiede sind mit der Anordnung der Ketten in der Elementarzelle begründet. Die Ketten der Cellulose I besitzen eine parallele Anordnung und die Ketten der Cellulose II sind antiparallel angeordnet (vgl. Abb. 2-12 ). Daher ist das Wasserstoffbrückensystem jeweils unterschiedlich aufgebaut (Peters, 2004). Thermodynamisch betrachtet stellt Cellulose II die stabilste Modifikation dar und damit ist auch die Umwandlung von Cellulose I nach Cellulose II ein irreversibler Prozess (Müller, 2004).

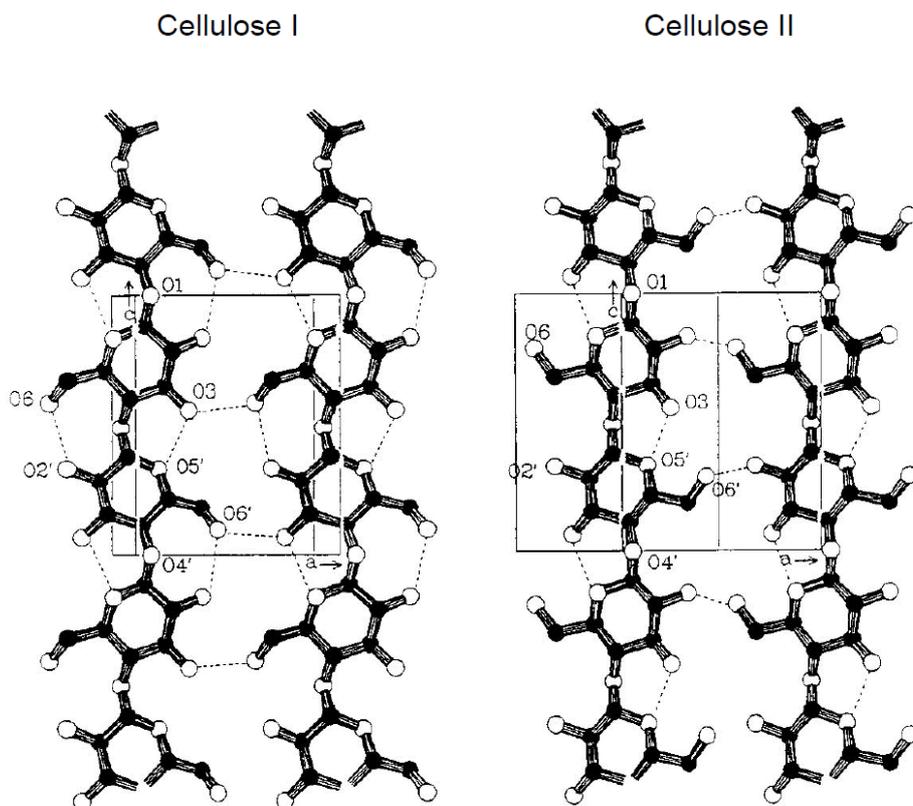


Abb. 2-12- -Wasserstoffbrücken zwischen Molekülketten von Cellulose I und Cellulose II (Peters, 2004)

Die Bindungskräfte der Wasserstoffbrücken und weitere sekundäre Bindungen, wie die van der Waals-Kraft, sowie die lineare Struktur der Cellulosemoleküle sind die Grundlage für den geordneten und stabilen übermolekularen Aufbau. In ihrer Gesamtheit ist die Cellulose als dreidimensionales Netzwerk aufgebaut. Durch die Reversibilität der Wasserstoffbrücken ist ein Umbau bzw. Lösen des Netzes mit entsprechenden Lösungsmitteln möglich (Cibik, 2003).

### 2.4.3 Lösungsmittel für Cellulose

Das selektive Lösen der Cellulose war in der Celluloseforschung immer von großem Interesse. Denn gelöste Cellulose ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Charakterisierung (z. B. Molekulargewicht und Molekulargewichtsverteilung) und das Formen der Cellulose (z. B. Faserspinnen) und somit von großer wirtschaftlicher Bedeutung (Heinze, 2005). Mit der Celluloseforschung wurden verschiedene Lösungsmittel entwickelt, charakterisiert und angewendet. Die Literatur unterscheidet zwischen wässrigen und nichtwässrigen Lösungsmitteln, nach Art und Weise ihrer Wechselwirkung in Verbindung mit Cellulose und nach derivatisierenden und nichtderivatisierenden Systemen (Peters, 2004). In Tabelle 2-3 sind Beispiele für derivatisierende und in Tabelle 2-4 für nicht-derivatisierende Lösungsmittel aufgelistet. Für die Auswahl eines Lösungsmittels sind neben der Anwendung Aspekte, wie Regeneration und Umweltbelastung zu berücksichtigen.

<b>derivatisierende Systeme</b>	<b>weitere Merkmale</b>
<b><math>N_2O_4</math></b> / DMF (Distickstofftetroxid/Dimethylformamid)	nichtwässrig
<b><math>NOHSO_4</math></b> /DMF (Nitrosylhydrogensulfat/Dimethylformamid)	nichtwässrig
<b><math>(CH_3)_3SiCl</math></b> /DMF (Trimethylchlorsilan/Dimethylformamid)	nichtwässrig
<b><math>(CH_2O)_x</math></b> /DMSO (Paraformaldehyd/Dimethylsulfoxid)	nichtwässrig

Tabelle 2-3 – Auflistung für derivatisierende Lösungsmittel für Cellulose (Cibik, 2003; Peters, 2004)

<b>nichtderivatisierenden Systeme</b>	<b>weitere Merkmale</b>
<b>Cuoxam</b> (Kupferoxidammoniak=Kupfer(II)-Tetraamin-Hydroxid)	wässrig/metallbasiert
<b><math>ZnCl_2/H_2O</math></b> (wässrige Zinkchloridlösung)	wässrig/metallbasiert
<b><math>NH_3/NH_4SCN</math></b> (Ammoniumthiocyanat in flüssigem Ammoniak)	flüssig/metallbasiert
<b>DMSO/Methylamin</b> (Dimethylsulfoxid/Methylamin)	nichtwässrig
<b>DMAc/LiCl</b> (Dimethylacetamid/Lithiumchlorid)	nichtwässrig organisches Lösungsmittel
<b>NMMO <math>H_2O</math></b> (N-Methylmorpholin-N-oxid-Monohydrat)	wässrig organisches Lösungsmittel

Tabelle 2-4 - Auflistung für nicht-derivatisierender Lösungsmittel für Cellulose (Peters, 2004; Cibik, 2003)

Für diese Prozessentwicklung wurde das Lösungsmittel N-Methylmorpholin-N-oxid ausgewählt. Die Auswahl wird damit begründet, dass dieses Lösungsmittel bereits in industriellen Prozessen zum Lösen der Cellulose und der Herstellung von Regeneratfasern verwendet wird. Darüber hinaus existiert ein breites Publikationsfeld (Sayyed et al., 2019; Rosenau et al., 2019; Woodings, 2001).

## 2.5 N-Methylmorpholin-N-oxid

N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO, CAS: 7529-22-8) ist ein organischer Stoff aus der Reihe der Aminoxide. Die Herstellung erfolgt durch die Oxidation von N-Methylmorpholin (NMM) mit Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Es ist meist als 50 Gew.-%ige wässrige Lösung oder als kristalline Substanz bzw. als Monohydrat erhältlich (Cibik, 2003; Paulussen, 2019a). Wasserfreies NMMO hat die Summenformel  $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2$ , eine molare Masse von 117,15 g/mol und der Schmelzpunkt liegt zwischen 180 – 184 °C (GESTIS-Stoffdatenbank, 2019). NMMO ist stark hygroskopisch und bildet mindestens zwei stabile, kristalline Hydrate. Das bedeutendste ist das Monohydrat (vgl. Abb. 2-13) mit einem Wasseranteil von 13,3 Gew.-%. Es schmilzt bei ca. 72°C. Bei 95°C besitzt es eine Dichte von 1,09 g/cm<sup>3</sup> und eine Viskosität von 8 mPa·s (Paulussen, 2019a).

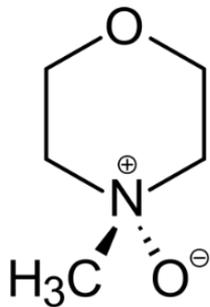


Abb. 2-13 – Strukturformel von N-Methylmorpholin-N-oxid (Paulussen, 2019a)

### 2.5.1 Lösungsmechanismus des NMMO für Cellulose

Damit die Cellulose aus einem baumwollhaltigen Mischgewebe herausgelöst werden kann, ist das Phänomen, dass die Cellulose beim Kontakt mit der wässrigen NMMO-Lösung aufquillt, essentiell. Durch das Quellen der Cellulose können die Lösungsmittelmoleküle in die interkristallinen und intrakristallinen Bereiche der Cellulose eindringen. Anschließend können die Lösungsmittelmoleküle mit den Hydroxylgruppen der Cellulose in Wechselwirkung treten, wodurch die Auflösung zustande kommt (Pinkert et al., 2010).

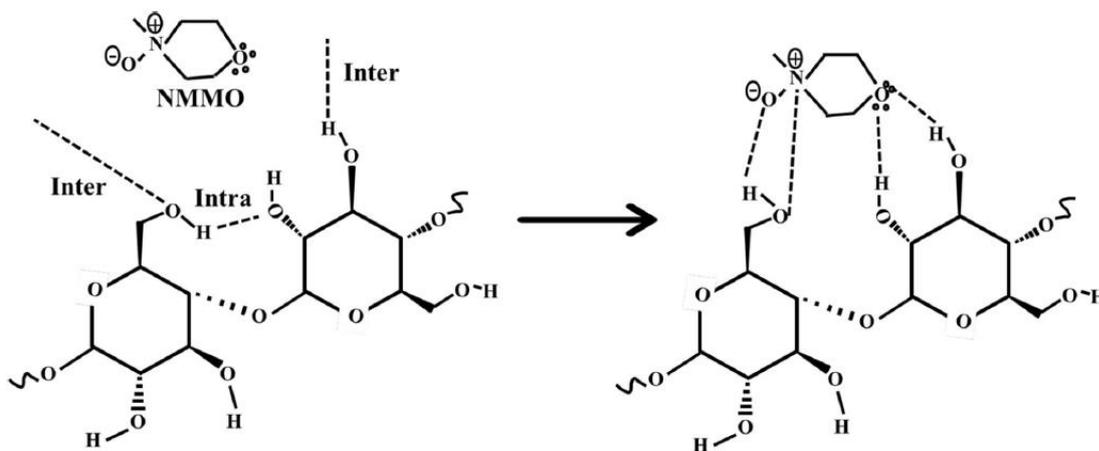


Abb. 2-14 – Lösungsmechanismus des NMMO für Cellulose (Sayyed et al., 2019)

Die inter- und intramolekularen H-Brücken der Cellulose werden durch Wechselwirkung mit dem NMMO gelöst. Das geschieht dadurch, dass die N-O-Gruppe des NMMO-Moleküls sowohl mit dem Wasserstoffatom als auch mit dem Sauerstoffatom der Cellulosehydroxylgruppe eine Ionenbindung eingeht (vgl. Abb. 2-14 ), wobei sich das Donatorzentrum (O-) des NMMO-Moleküls am Wasserstoffatom und das Akzeptorzentrum (N+) am Sauerstoffatom der Cellulosehydroxylgruppen bindet (Cibik, 2003; Rosenau et al., 2019). Auf die Cellulose der Mischgewebe aus Baumwolle und PET, hat der Zerkleinerungsgrad der Gewebe einen besonders großen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Lösungsvorgangs. Wenn die Fasern der Mischgewebe nahezu vereinzelt vorliegen, läuft der Lösungsvorgang schneller ab (Paulussen, 2019a).

## 2.5.2 Alternative Lösungsmittel – Ionic Liquids

Der Lösungsprozess kann auch mit ionischen Flüssigkeiten als Lösungsmittel ablaufen. Das Verfahren ist fast identisch zum NMMO basierten Aminoxidverfahren aufgebaut. Die typischen ionischen Flüssigkeiten die verwendet werden, sind z.B. 1-Butyl-3-Methylimidazolium oder 1-Allyl-3-Methylimidazolium Chlorid. Allerdings ist eine weitere Forschung und Optimierung der Prozesse erforderlich, um diese Lösungsmittel nachhaltig in industrieller Anwendung zu nutzen (Sun, 2010). Ein weiteres Lösungsmittelsystem, mit dem bereits Versuche und teilweise Patenanmeldungen einhergehen, besteht aus Lithiumchlorid und Dimethylacetamid (LiCl/DMAc). Das Lösungsmittelsystem LiCl/DMAc kann bis zu 16% Cellulose aufnehmen, welches den Anforderungen des Nassspinnverfahrens zur Herstellung von Cellulosefasern aus Cellulosesuspensionen entspricht (Pillichshammer, 2015; Haslinger, 2016). Allerdings müssen die Polymerketten vorher aktiviert bzw. geöffnet werden, damit das Lösemittel in die Ketten diffundieren kann. Dies macht den Prozess teuer und zeitaufwändig. Außerdem gilt das Lösungsmittelsystem als hoch giftig (Sayyed et al., 2019).

## 2.6 Ternäres Phasendiagramm für das System NMMO/Wasser/Cellulose

In Abb. 2-15 ist ein ternäres Phasendiagramm für NMMO, Wasser und Cellulose bei einer Temperatur von 95 °C abgebildet. Auf den Dreieckskoordinaten sind die Konzentrationen der Stoffe (in Gew.-%) aufgetragen. Um den Zustand eines beliebigen Systems zu bestimmen, sind die Konzentrationen für zwei Komponenten frei wählbar und die dritte steht damit fest. Das Diagramm zeigt in welchen Konzentrationsbereichen die Cellulose bei einer Temperatur von 95 °C als Lösung vorliegt. Das Lösungsprozessfenster verkleinert sich mit Abnahme der Temperatur. Rechts vom Lösungsprozessfenster kristallisiert das NMMO. Das bedeutet, wenn der Wassergehalt zu gering ist, bildet sich das NMMO-Monohydrat. Links vom Lösungsprozessfenster löst sich die Cellulose nicht und liegt als Feststoff vor. Das bedeutet, wenn der NMMO-Gehalt zu niedrig ist, kann sich die Cellulose nicht lösen oder wenn der Wassergehalt der Lösung ansteigt, wird die Cellulose ausgefällt. Diese Eigenschaft macht man sich z.B. bei der Verarbeitung der Lösung zu Regeneratfasern zu nutzen, indem man die Fasern mit Wasser auswäscht (Woodings, 2001). Es gibt Untersuchungen, in denen bis zu 30% Cellulose gelöst wurden, für technische Anwendungen wie z.B. beim Aminoxidverfahren liegen die Konzentrationen meist zwischen 12-14 Gew.-% (Navard, 2012).

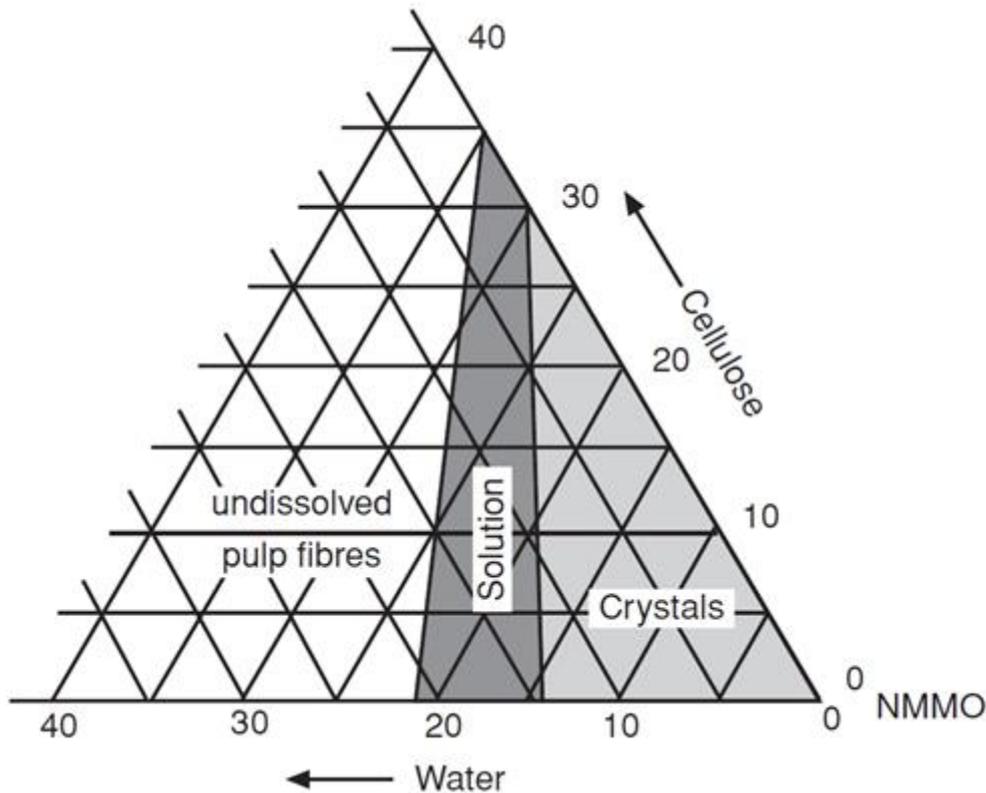


Abb. 2-15 – Ternäres Phasendiagramm für NMMO – Wasser – Cellulose bei 95 °C (Woodings, 2001)

### 2.6.1 Rheologische Eigenschaften von Cellulose in wässrigen NMMO-Lösungen

Das System Cellulose/NMMO/Wasser ist sehr komplex. Für eine Beschreibung des Systems hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften, müssen folgende Effekte berücksichtigt werden:

- Temperatureffekt
- Konzentrationseffekt
- Effekt des Molekulargewichts

Blachot et al. (1998) haben diese Effekte mit ihren Untersuchungen nachgewiesen. Dafür wurden dynamische Messungen und Steady-State-Messungen durchgeführt. Die dynamischen Messungen wurden mit einem Schergefälle von 12 % in einem Frequenzbereich von 0,1 – 500 rad/s. Die Steady-State-Messungen wurden mit Scherraten im Bereich von 0,001 – 100 rad/s durchgeführt (Blachot, 1997).

#### Temperatureffekt

In Abb. 2-16 sind die Messergebnisse der Steady-State-Viskosität  $\log(\eta)$  und der dynamischen Viskosität  $\log(\dot{\eta})$  gegenüber der Scherrate  $\log(\dot{\gamma})$  bzw. der Frequenz  $\log(\omega)$  für unterschiedliche Temperaturen aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Viskosität mit der Scherrate und ebenfalls mit der Temperatur abnimmt. Die Abnahme der Viskosität der Celluloselösung unter Scherung ist mit der Strukturviskosität, die typisch für Polymerlösungen ist zu erklären (Blachot, 1997).

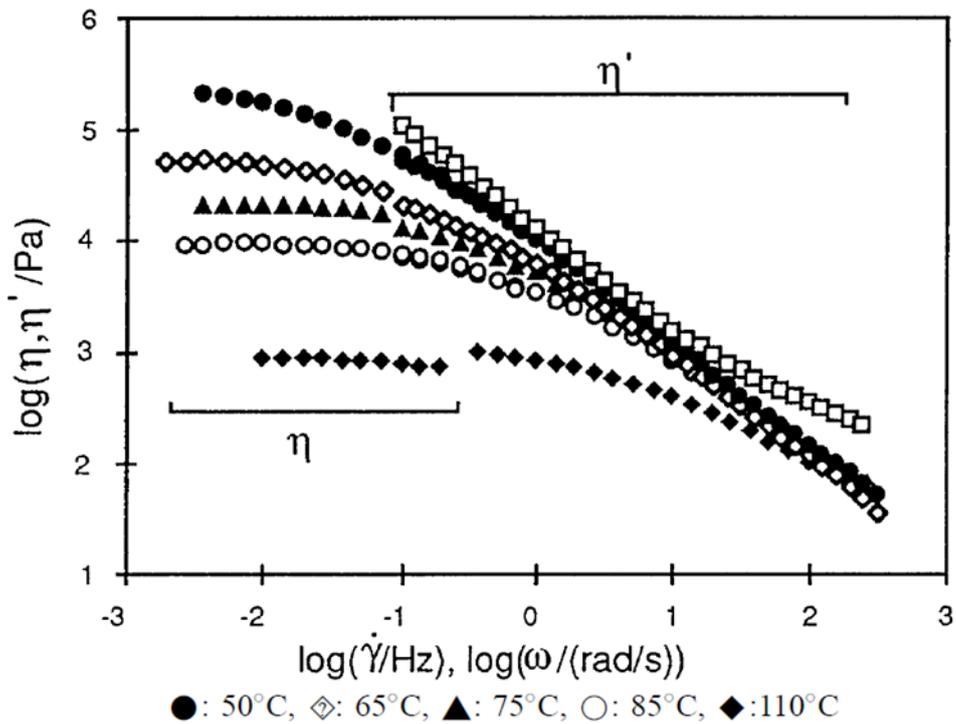


Abb. 2-16 – Steady-State-Viskosität  $\eta$  und dynamische Viskosität  $\eta'$  aufgetragen über die Scherrate  $\dot{\gamma}$  und die Frequenz  $\omega$  für verschiedene Temperaturen (Blachot, 1997)

### Konzentrationseffekt

In Abb. 2-17 ist die Nullscherviskosität und die Relaxationszeit für verschiedene Cellulosekonzentrationen abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die beiden Werte mit der Konzentration exponentiell steigen. Blachot et al. (1998) haben herausgefunden, dass die Nullscherviskosität  $\eta_0$  mit der Konzentration zu  $c^{4,6}$  ansteigt (Blachot, 1997).

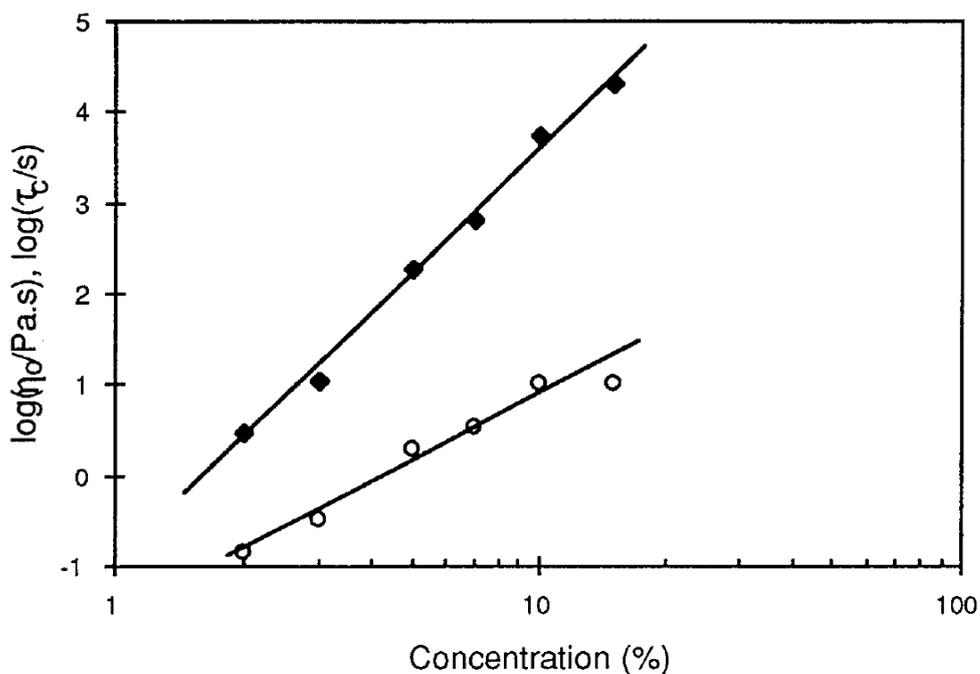


Abb. 2-17 - Nullscherviskosität  $\eta_0$  und Relaxationszeit  $\tau_c$  aufgetragen über die Cellulosekonzentration (Blachot, 1997)

### Effekt des Molekulargewichts

In Abb. 2-18 ist die Nullscherviskosität und Relaxationszeit über die Polymerisationsgrade unterschiedlicher Celluloserohstoffe aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Viskosität mit dem Polymerisationsgrad ansteigt (Blachot, 1997).

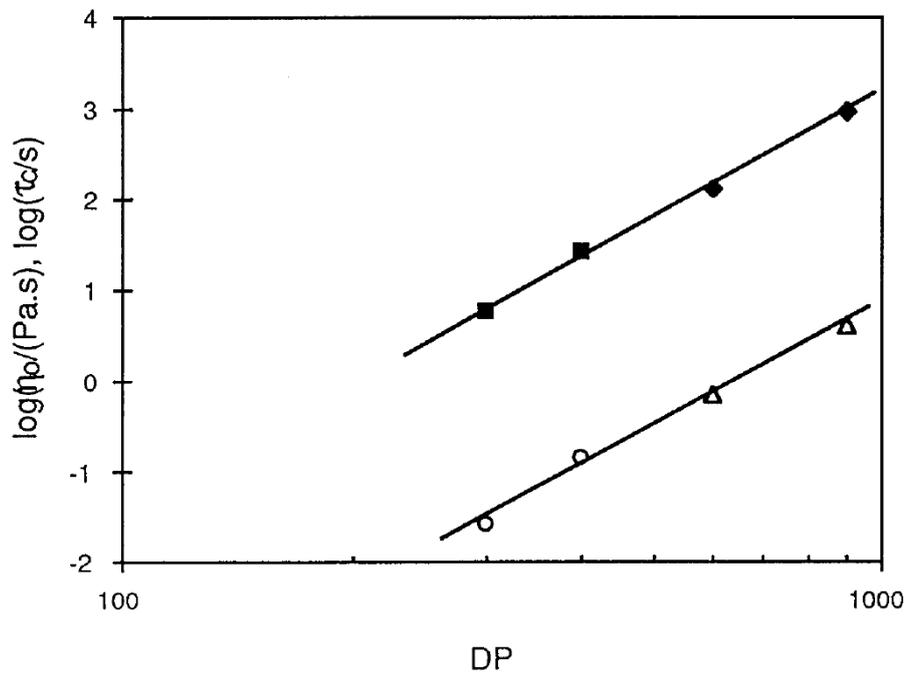


Abb. 2-18 – Nullscherviskosität und Relaxationszeit aufgetragen über unterschiedliche Polymerisationsgrade der Cellulose

# 3 Grundlagen der Prozessentwicklung

---

Die Herstellung von Spinnlösungen aus Cellulose für die Produktion cellulosischer Formkörper, wie Fasern, Filamenten und Folien ist seit längerer Zeit bekannt und Stand der Technik. Als Industrieverfahren wäre als Beispiel das Aminoxid- bzw. Lyocellverfahren zu nennen, bei dem ein cellulosischer Rohstoff mit einem selektiven Lösungsmittel, bevorzugt bestehend aus NMMO und Wasser, aufgelöst und in einem wässrigen Fällbad in beliebiger Form wieder ausgefällt wird (Zikeli, 1993; Sayyed et al., 2019; Rosenau et al., 2019). Im Jahr 1984 wurden cellulosische Regeneratfasern das erste Mal kommerziell hergestellt. Die Produktion und Technik wurde seit dieser Zeit stetig weiterentwickelt (Woodings, 2001; Pillichshammer, 2015).

Als Planungsgrundlage für das Recycling von Mischgeweben und die Produktion von Cellulosefasern müssen folgende Punkte betrachtet werden:

- Vorbehandlung der Mischgewebe
- Zerkleinerung der Mischgewebe und Lösen der Cellulose
- Abtrennen der PET-Fasern
- Konzentration der Celluloselösung
- Nassspinnverfahren für die Herstellung von Cellulosefasern
- Regeneration des Lösungsmittels

## 3.1 Vorbehandlung der Mischgewebe

Die Verwendung von Textilabfällen unterschiedlicher Gütegrade und Farben, für die Herstellung von Formkörpern aus regenerierter Cellulose, erfordert ein Verfahren zur Vorbehandlung der rückgewonnenen Baumwollstoffe. Denn dies ist eine Voraussetzung für das effiziente Recycling der Baumwollfasern zu qualitativ hochwertigen Produkten wie Regeneratfasern aus Cellulose, die in der Textilherstellung verwendet werden können. Im Jahr 2015 hat die Lenzing AG ein Patent angemeldet, in dem ein solches Verfahren beschrieben wird. Die Erfindung zeigt ein Verfahren, für die chemische Vorbehandlung, damit die Baumwolle bei der Herstellung von Formkörpern aus regenerierter Cellulose verwendet werden kann. Die Baumwollfasern können als Reinstoff oder in einer Mischung mit herkömmlichem Chemiefaserzellstoff vorliegen. Das beschriebene Verfahren ist ein mehrstufiges Verfahren, wobei oxidative Bleichbehandlung mit sauren Waschbehandlungen und/oder einer Behandlung mit wässrigen Lösungen von Komplexbildnern kombiniert werden. Bei Komplexbildnern, handelt es sich z.B. um Stoffe, die Metallionen binden können und zusammen einen sogenannten Stoffkomplex bilden (Hanemann, 2013).

Die oxidative Bleichbehandlung kann beispielsweise mit Peroxid erfolgen. Das Peroxidbleichen kann bei einem pH-Wert zwischen 10 und 11, bei Temperaturen zwischen 70 bis 80 °C und einer Behandlungszeit von 30 bis 60 min erfolgen. Alternativ kann Sauerstoff als Bleichmittel verwendet werden. Die saure Waschbehandlung dient als Metallentfernungsstufe und erfolgt vorzugsweise bei einem pH-Wert zwischen 2 bis 3 und bei Temperaturen zwischen 50 bis 70 °C. Die Behandlungszeit beträgt 15 bis 60 min. Der Metallgehalt wird den Textilien beim Färben bzw. der Veredelung hinzugefügt. Die Reduzierung des Metallgehalts ist erforderlich, damit die Mischgewebe als Rohstoff für das Aminoxidverfahren verwendet werden können. Ebenfalls ist

sicherzustellen, dass der Polymerisationsgrad der zu verarbeitenden Spinnlösung eingestellt wird (Hanemann, 2013). Für die Cellulose, die im Aminoxidverfahren eingesetzt wird, ist ein Polymerisationsgrad zwischen 400-1200 üblich (Navard, 2012).

Neben der Entfärbung, der Reduzierung des Metallgehalts sowie der Einstellung des Polymerisationsgrads, ist die Entfernung weiterer Veredelungsmaterialien, wie z.B. des sogenannten „spinn finish“, erforderlich (Haule, 2014; Haule et al., 2016).

### **3.2 Lösen der Cellulose und Herstellung der Spinnlösung**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden am Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik der Technischen Hochschule Köln, Versuche zur selektiven Lösung von Baumwolle aus textilen Mischgeweben unter Verwendung von NMMO durchgeführt. Die ersten Löseversuche wurden mit einer Standardrührapparatur unter Einsatz eines Rührers aus PTFE-Flügeln durchgeführt. In mehreren Versuchsreihen wurde der Baumwollstoff in unterschiedlichen Partikelgrößen hinzugegeben. Bei der Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse wurde deutlich, dass der Zerkleinerungsgrad der Textilien einen signifikanten Einfluss auf die Geschwindigkeit des Lösungsprozesses hatte. Anschließend wurde der Versuchsaufbau geändert und es kam ein Rotor-Stator-Mischer zum Einsatz. Durch diese Ausführungsform des Mixers, konnten die Textilgewebe gleichzeitig zum Lösungsvorgang zerkleinert werden. Innerhalb dieser Lösungsversuche mit einem Rotor-Stator-Mischer konnten in der Lösung Cellulosekonzentrationen bis zu 3 Gew.-% erreicht werden. Bei höheren Konzentrationen konnte keine vollständige Durchmischung erreicht werden. Die Celluloselösung ist stark strukturviskos. Dies hat zur Folge, dass die Viskosität der Lösung im Bereich des Rührers durch die Scherung niedrig und außerhalb des Rührzentrums stark erhöht war (Blachot, 1997; Paulussen, 2019a).

In der konventionellen Prozessführung wird das Mischgewebe bzw. die Cellulose zerkleinert, bevor es mit dem Lösungsmittel in Kontakt kommt. Dafür wird in den Prozessen ein Zerkleinerungsschritt vor dem Lösungsprozess integriert, wodurch die Partikelgröße auf unter 5 mm reduziert wird (Zikeli, 1995). Zusätzlich werden in der industriellen Prozessführung deutlich höhere Cellulosekonzentrationen mit speziellen Mixern erreicht. Da in diesen Verfahren Reinstoffe aus Cellulose verwendet werden, muss die Abscheidung des PET, die in dieser Arbeit als Ziel formuliert ist, nicht berücksichtigt werden. In den Patenten der Lenzing AG wurden in den Anfangsjahren der Entwicklung sogenannte Ringschichtmischer für den ersten Lösungs- bzw. Homogenisierungsschritt eingesetzt (Pillichshammer, 2015). Die erhaltene Suspension wird anschließend in einen Dünnschichtbehandlungsapparat, beispielsweise in einen sogenannten Filmtruder, überführt und durch Verdampfen des Wassers bei einer Temperatur von 70 - 80 °C und einem Druck von 100 -150 mbar auf ca. 12-13 Gew.-% Cellulose konzentriert (Zikeli, 1989). Alternativ wurde die Suspension in einem Zwischenschritt auf eine Doppelsiebbandpresse aufgebracht und dort auf einen Cellulosegehalt von ca. 9,0 Gew.-% abgepresst und anschließend in einem Extruder mit Entgasungszone konzentriert. Aktuelle Prozessführungen verwenden einen Hochkonzentrations-Mischer, in dem eine Suspension mit einer Cellulosekonzentration von über 9 Gew.-% in einem Schritt hergestellt werden kann (Pillichshammer, 2015).

### 3.3 Abtrennen der PET-Fasern

Für das Recycling von Mischgeweben aus Baumwolle und PET soll die Cellulose der Baumwolle gelöst werden, damit anschließend die PET-Fasern als feste Phase abgeschieden werden können. Für dieses Vorhaben wurden am Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik verschiedene Versuche für die Abtrennung von PET-Fasern in einer Zentrifuge durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass mit der zur Verfügung stehenden Zentrifuge eine Abscheidung machbar erscheint. Allerdings stellt eine limitierende Größe die Viskosität der Lösung dar. Denn die Viskosität steigt mit der Cellulosekonzentration sehr stark an und reduziert die Trennleistung der Zentrifuge (Blachot, 1997). Daher können während des Lösungsschritts, im Vergleich zum allgemeinen Aminoxid- bzw. Lyocellverfahren, nur geringe Mengen an Cellulose gelöst werden. Für die Trennversuche wurde eine 1,5 Gew.-%ige Celluloselösung mit PET-Fasern in einer Zentrifuge untersucht. Die Viskosität der Lösung betrug ca. 1 Pa·s und die PET-Fasern haben sich in den Behältern zum Großteil abgesetzt. In einer zweiten Versuchsreihe wurden die PET-Fasern mit Glycerin gemischt. Glycerin besitzt ebenfalls eine Viskosität von etwa 1 Pa·s und dieser Versuch hat zu ähnlichen Ergebnissen geführt. Die Versuche zeigen, dass eine Abtrennung der PET-Fasern mittels einer Zentrifuge machbar ist. Industrielle Zentrifugen besitzen außerdem deutlich größere Trennleistungen als die verwendete Laborzentrifuge (Paulussen, 2019b).

Als alternative Verfahren können die Filtration oder das Pressen in Betracht gezogen werden. In der Patentliteratur gibt es bereits Verfahren, die sich mit Textilien aus Baumwolle oder Mischtextilien aus Baumwolle und synthetischen Fasern als Rohstoff für Regeneratfasern befassen (Brinks, 2016; Haslinger, 2016). Der Trennungsschritt von PET und der Celluloselösung wird zwar oberflächlich erwähnt aber eine effiziente und wirtschaftlich sinnvolle Lösung für diese Problematik scheint es noch nicht zu geben. Zu den Randbedingungen, wie der Cellulosekonzentration, der Viskosität und der Größe der Fasern werden in den genannten Patenten keine Angaben gemacht.

### 3.4 Nassspinnverfahren für die Herstellung von Cellulosefasern

Die Herstellung der Cellulosefasern aus der Suspension erfolgt innerhalb des Aminoxidverfahrens durch das Nassspinnverfahren. Das Nassspinnverfahren ist ein kontinuierlicher Prozess, bei dem die Celluloselösung mittels eines Extruders durch eine Spinndüse gepresst wird. Der Extruder besitzt eine Entgasungszone, in der Wasserdampf und andere flüchtige Stoffe abgezogen werden. Die Spinnlösung im Extruder enthält 12,5-20 Gew.-% Cellulose und der Prozess läuft bei einer Temperatur von etwa 115 °C ab. Die Lösung wird durch einen Filter und in einen statischen Mischer gefördert. Anschließend fördert eine Pumpe die Spinnlösung durch die Spinndüse. Dabei entstehen die Filamente, die in einem Luftspalt gekühlt werden. Über Förderrollen werden die Filamente durch ein Fällbad geführt. Im Fällbad wird die Cellulose ausgefällt und das NMMO ausgewaschen. Anschließend werden die Filamente abgezogen bzw. aufgerollt und getrocknet (Woodings, 2001).

### 3.5 Regeneration des Lösungsmittels – NMMO

Die Regeneration des Lösungsmittels – NMMO ist ein besonders wichtiges Element im Aminoxidprozess. Denn für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist es von entscheidender

Bedeutung, das NMMO möglichst vollständig rückzugewinnen. Es gibt zwei Möglichkeiten im Prozess NMMO rückzugewinnen. Durch Regeneration der Flüssigkeit im Fällbad nach dem Nassspinnverfahren und aus den Brüden bei der Konzentration der Spinnlösung (Kalt, 1997).

Im Fällbad wird die Cellulose durch Zugabe von Wasser ausgefällt und das NMMO aus der Regeneratfaser ausgewaschen. Der Gehalt an NMMO im Fällbad beträgt 10 – 20 Gew.-%.

Das Lösungsmittel wird aus der extrudierten Spinnmasse mittels Wasser ausgewaschen und im Fällbad aufgefangen. Dem Fällbad wird stetig frisches Wasser hinzugegeben und gleichzeitig wird die Flüssigkeit, die bis zu 30 % NMMO enthalten kann, aus dem Fällbad abgeführt. Das Fällbad sollte außerdem auf eine Temperatur von unter 10 °C temperiert werden. Diese niedrigen Temperaturen wirken sich positiv auf die Fasereigenschaften, wie z.B. die Zugfestigkeit aus. Die extrudierte Lösung enthält ca. 75% des Lösungsmittels. Im Fällbad wird der Lösungsmittelgehalt auf ca. 45 % reduziert. Anschließend erfolgt ein Waschvorgang mit demineralisiertem Wasser bei 35 – 70 °C, um so viel Lösungsmittel zu entfernen wie wirtschaftlich sinnvoll. Es sollten mindestens 95 % regeneriert werden, damit der Prozess wirtschaftlich ist. Das Limit der wirtschaftlichen Regenerierung liegt bei ca. 99,98%. Vorzugsweise sollte die Cellulosemasse am Ende 1000 – 2000 ppm Lösungsmittel, bezogen auf die Trockenmasse, enthalten (Kalt, 1995).

Zusammen mit dem NMMO reichern sich im Fällbad diverse Nebenprodukte des Prozesses an, die vor der Konzentrierung entfernt werden müssen. Dies erfolgt durch einen Flotations- und einen Filtrationsprozess (Sayyed et al., 2019). Nach dem Entfernen der Nebenprodukte kann die Flüssigkeit des Fällbads mit weiteren Prozesswässern des Verfahrens, wie z.B. den Brüdenkondensaten, die bei der Konzentrierung der Celluloselösung anfallen, vereinigt werden. Die Brüden bestehen hauptsächlich aus Wasser. Das Brüdenkondensat enthält ca. 100 mg/L NMMO. In den Brüdenkondensaten befinden sich ebenfalls Abbauprodukte des NMMO. Das Brüdenkondensat enthält somit ebenfalls bis zu 240 mg/L N-Methylmorpholin und bis zu 30 mg/L Morpholin (Kalt, 1997). Die Konzentration der vereinigten Lösung aus dem Fällbad und dem Brüdenkondensat wird anschließend durch Umkehrosiose gesteigert.

Die erhaltene wässrige Lösung enthält danach bis zu 4 g/L NMMO, bis zu 10 g/L N-Methylmorpholin und bis zu 1 g/L Morpholin. Um die Verluste an NMMO möglichst gering zu halten, wird N-Methylmorpholin unter dem Einsatz von Wasserstoffperoxid wieder zu N-Methylmorpholin-N-oxid oxidiert. Bei der Oxidation kann sich ebenfalls N-Nitrosomorpholin aus dem Morpholin bilden. Die Bildung des toxischen N-Nitrosomorpholin kann reduziert werden, wenn die Oxidation bei einem pH-Wert zwischen 6,0 – 9,0 abläuft. Die geringen Mengen des N-Nitrosomorpholin, die dennoch entstehen, können durch eine UV-Bestrahlung zerstört werden. Die Einstellung des pH-Werts erfolgt, indem die Lösung über einen Kationentauscher geführt wird, der Morpholin absorbiert. Dies bewirkt zwei positive Effekte, zum einen steht der Neubildung von Nitrosaminen weniger Morpholin zur Verfügung und zum anderen wird Morpholin mit der vergleichsweise höchsten Basizität entfernt und der pH-Wert reduziert sich. Der Kationentauscher besitzt z.B. Carboxylgruppen oder Sulfonsäuregruppen (Kalt, 1997).

# 4 Kostenschätzung – Methodik nach Hand

Der zu entwickelnde Prozess soll neben der technischen Machbarkeit ebenfalls auf seine Wirtschaftlichkeit geprüft werden. Daher ist eine Kostenschätzung nach der Hand-Methodik ebenfalls Teil dieser Arbeit und die Grundlagen werden in diesem Kapitel erläutert.

Die Kostenschätzung nach Hand wurde 1958 veröffentlicht und gehört zu den sogenannten Strukturverfahren der Kostenschätzung. Dieses Verfahren kann angewendet werden, wenn alle Hauptausrüstungsgegenstände feststehen und ihre Dimensionierung abgeschlossen ist.

## 4.1 Hand-Faktoren

Beim Ansatz dieser Kostenschätzungsmethode wird der Beschaffungspreis für jede Hauptkomponente mit einem Faktor multipliziert. Die Multiplikations-Faktoren sind komponentenspezifisch und durch die Kalkulation werden die Kosten der Nebenkomponten wie Rohrleitungen, Instrumente, Elektrik etc. hinzugerechnet. Die Multiplikationsfaktoren für die einzelnen Komponentengruppen sind in Tabelle 4-1 aufgeführt (Lenz, 2015; Rieckmann, 2019a).

Komponentengruppe	Original	Update vom AACE International Cost Estimate Committee aus dem Jahr 1992
Destillationskolonnen	4,0	4,0
Druckbehälter	4,0	3,5
Wärmeüberträger	3,5	3,5
Öfen	2,0	2,5
Pumpen	4,0	4,0
Verdichter	2,5	3,0
Instrumente	4,0	3,5
Sonstige Ausrüstungen	2,5	--

Tabelle 4-1 – Auflistung der Hand-Faktoren (Peters, M. und Timmerhaus, 2004)

## 4.2 Korrekturfaktoren

Für die Hand-Methodik werden weitere Korrekturfaktoren hinzugezogen. Die o.g. Faktoren beziehen sich auf das Material C-Stahl. Die Kosten für andere Materialien werden durch den Materialanpassungs-Faktor berücksichtigt. Mit der nachstehenden Abb. 4-1 wird gezeigt, wie der Anpassungs-Faktor für das Material berechnet werden kann. Man berechnet das Kostenverhältnis zwischen den Kosten der Legierung und den aktuellen Kosten für C-Stahl. Danach wird der Wert für den Materialfaktor aus dem Diagramm auf der Y-Achse abgelesen. (Brown, 2007).

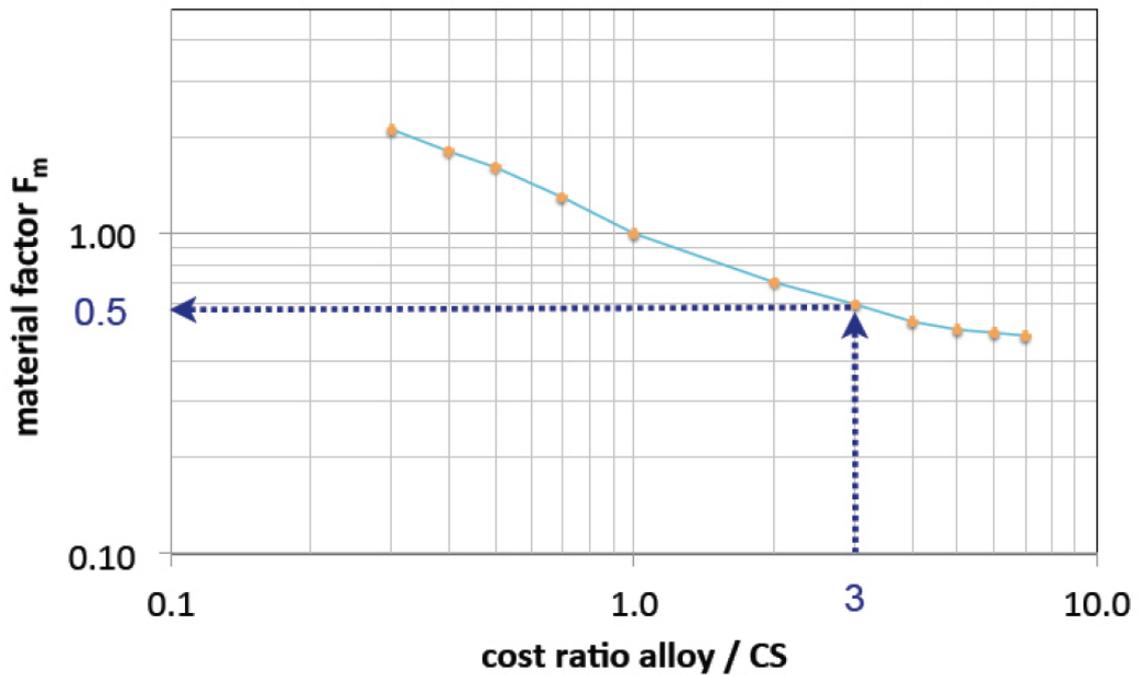


Abb. 4-1 – Material Anpassungs-Faktor (Brown, 2007)

Demnach berechnet sich der korrigierte Hand-Faktor nach:

$$Hf_n = Hf_a(F_m) \quad (\text{Gl. 4-1})$$

$F_m$  = Materialfaktor

$Hf_n$  = neuer Hand-Faktor

$Hf_a$  = alter Hand-Faktor

Alternativ kann auf die allgemein gültigen Korrekturfaktoren für das Material in Tabelle 4-2 zurückgegriffen werden (Peters, M. und Timmerhaus, 2004).

Material der Konstruktion	Korrekturfaktor
Carbonstahl	1,0
Bronze	1,05
Aluminium	1,075
Gusseisen	1,11
Edelstahl	1,28-1,5
Hastelloy Legierung	1,54
Nickell Legierung	1,71
Titan	12

Tabelle 4-2 – Liste der Korrekturfaktoren für unterschiedliche Materialien (Peters, M. und Timmerhaus, 2004)

Weiterhin müssen der Instrumenten-Faktor  $F_i$  sowie der Gebäude-Faktor  $F_b$  berücksichtigt werden. Typische Werte für diese Faktoren sind nachstehend in Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 aufgeführt (Peters, M. und Timmerhaus, 2004).

Instrumenten-Faktor	
Vor-Ort-Steuerung	1,15
Steuerung für typische chemische Prozessanlagen	1,35
Aufwendige Steuerungen	1,55

Tabelle 4-3 – Instrumenten-Faktoren (Peters, M. und Timmerhaus, 2004)

Gebäude-Faktor			
Anlagentyp	Neue Anlage / neuer Standort	Neue Anlage / bestehender Standort	Anlagenerweiterung / bestehender Standort
Feststoff	1,68	1,25	1,15
Fest/Flüssig	1,47	1,29	1,07
Flüssig	1,45	1,11	1,06

Tabelle 4-4 – Gebäude-Faktoren (Peters, M. und Timmerhaus, 2004)

Je nach dem in welchem Land die Anlage errichtet werden soll, muss ebenfalls der Länder-Faktor  $F_p$  berücksichtigt werden. Typische Faktoren für die Auswahl einiger Industrieländer sind in Tabelle 4-5 angegeben.

Länder-Faktor	
Brasilien	0,9
Kanada	1,16
Japan	1,15
China	0,97
Deutschland	1,05

Tabelle 4-5 – Länder-Faktoren (Peters, M. und Timmerhaus, 2004)

Die Gesamtkosten für einen Hauptausrüstungsgegenstand berechnen sich nach Hinzunahme der Faktoren mit Gleichung (Gl. 4-2).

$$G = F_i \cdot F_b \cdot F_p \cdot \sum [K \cdot (H_f \cdot F_m)] \quad (\text{Gl. 4-2})$$

$K$  = Komponentenkosten

$F_p$  = Länder-Faktor

$H_f$  = Hand-Faktor

$F_b$  = Gebäude-Faktor

$F_m$  = Material-Faktor

$F_i$  = Instrumenten-Faktor

### 4.3 Modifizierte Hand-Methode

Die Hand-Faktoren wurden im Jahr 1958 publiziert und im Jahr 1992 aktualisiert. Des Weiteren wurden an der Technischen Hochschule in Köln im Jahr 2016 modifizierte Handfaktoren entwickelt.

Die Modifikation und Korrektur der Hand-Faktoren erfolgte durch die Änderung der Basiszuschläge einzelner Positionen der direkten und indirekten Kosten über einen Mengenansatz (Rieckmann, 2019a):

- Versorgungsanlagen sind variable Kosten als Teil der Betriebskosten oder werden separat geschätzt.
- Engineering und Überwachung fließen separat als Mengengerüst in die Kostenschätzung mit ein (z.B. Methode nach Navarrete und Cole)
- Honorare für Beratung und sonstige Leistungen wurden gestrichen.

Daraus ergaben sich folgende modifizierte Hand-Faktoren:

Komponentengruppe	Original	Update vom AACE International Cost Estimate Committee aus dem Jahr 1992	Modifizierte Faktoren nach Anlagentyp		
			Fest/Fluid	Fluid	Fest
Destillationskolonnen	4,0	4,0	3,0	3,0	3,1
Druckbehälter	4,0	3,5	2,6	2,6	2,7
Wärmeüberträger	3,5	3,5	2,6	2,6	2,7
Öfen	2,0	2,5	1,9	1,9	1,9
Pumpen	4,0	4,0	3,0	3,0	3,1
Verdichter	2,5	3,0	2,3	2,3	2,3
Instrumente	4,0	3,5	2,6	2,6	2,7
Sonstige Ausrüstungen	2,5	--	1,9	1,9	1,9

Tabelle 4-6 – Listung der Hand-Faktoren und modifizierter Hand-Faktoren (Rieckmann, 2019a)

# 5 Prozesssynthese und Analyse

Der Prozess für das Recycling von Mischgeweben aus Baumwolle und PET soll die Baumwolle bzw. die Cellulose in wässriger Phase, mit Hilfe des selektiven Lösungsmittels N-Methylmorpholin-N-oxid, aus dem textilen Verbund lösen. Im nächsten Prozessschritt soll das PET von der flüssigen Phase getrennt werden, damit die Cellulose aus der Lösung mit dem Nassspinnverfahren zu einer Regeneratfaser verarbeitet werden kann. Das Lösungsmittel soll innerhalb des Prozesses aufbereitet und wiederverwendet werden. Mit der Beschreibung der Ausgangssituation und einer Situationsanalyse entstand eine erste Zielformulierung bzw. das erste Fließbild technischer Funktionen für die Prozessentwicklung (Abb. 5-1).

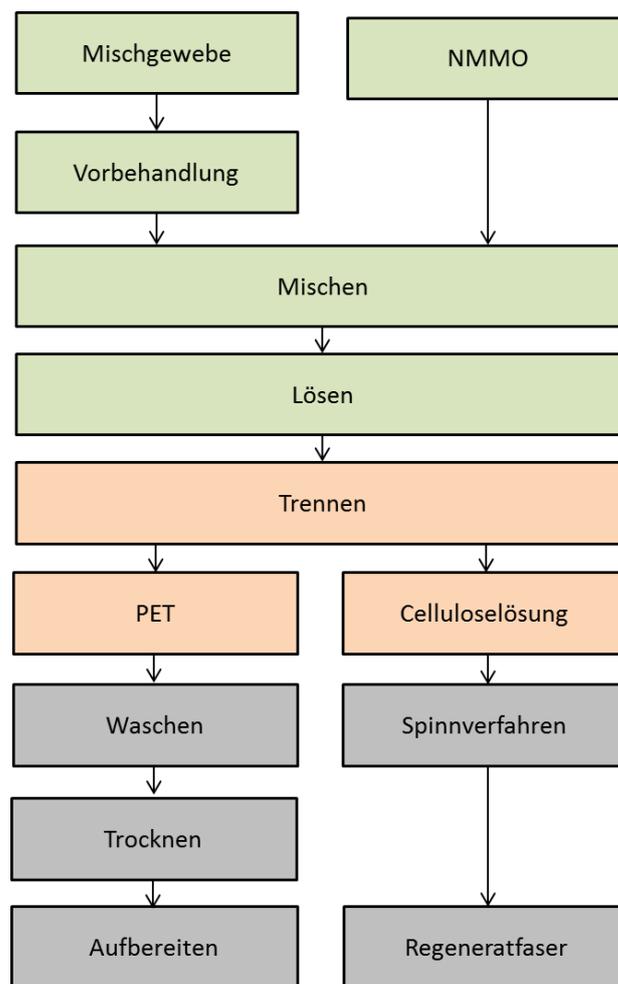


Abb. 5-1 – Grundfließbild technischer Funktionen

## 5.1 Vorbehandeln der Mischgewebe

Aus den Grundlagen der Planung in Kapitel 3.1 ist ersichtlich, dass für die Verwendung von gefärbten Textilien eine Vorbehandlung notwendig ist. Der Hauptfokus dieser Arbeit besteht darin, die Rohstoffe der Mischgewebe voneinander zu trennen. Daher wird der Schritt für die Vorbehandlung der Mischgewebe für die weitere Prozessentwicklung nicht berücksichtigt.

Der Prozess wird dahingehend limitiert, dass ausschließlich ungefärbte bzw. weiße Textilien mit jeweils 50 Gew.-% Baumwoll- und 50 Gew.-% PET-Anteil als Rohstoff verwendet werden. Der Prozess kann durch das Modul der Vorbehandlung für die Nutzung von gefärbten Mischgeweben unterschiedlicher Gütegrade in späteren Entwicklungsstadien ergänzt werden.

## 5.2 Mischen und Lösen

Eine Analyse der physikalischen Effekte beim Lösungsvorgang von Cellulose aus textilen Mischgeweben, auf Grundlage des Kapitels 3.2 hat ergeben, dass der Prozess durch die technische Funktion der Zerkleinerung für die Mischgewebe erweitert werden muss. Die Lösungsversuche am Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik der TH Köln haben gezeigt, dass sich eine möglichst vollständige Zerkleinerung der Mischgewebe bis hin zu einer Vereinzelung der Fasern positiv auf die Löslichkeit auswirkt und zu einer signifikanten Verringerung der Verweilzeit führt (Paulussen, 2019a).

Mit der Versuchsanordnung im Labor konnten Lösungen mit bis zu 3 Gew.-% Cellulose hergestellt werden (Paulussen, 2019a). In industriellen Prozessen können deutlich höhere Cellulosekonzentrationen erreicht werden. Innerhalb des Aminoxidverfahrens werden Konzentrationen bis zu 15 Gew.-% hergestellt und verarbeitet. Dabei handelt es sich allerdings um reine Cellulose aus Holzstoffen, die einen niedrigeren Polymerisationsgrad aufweisen als die Cellulose der Baumwolle (Zikeli, 1993; Pillichshammer, 2015; Zikeli, 1989). Auf Grundlage der Lösungsversuche wurde eine Zielgröße für den Zerkleinerungsprozess definiert:

### **Zielgröße Zerkleinerungsprozess:**

Zerfaserung der Mischgewebe und Zerkleinerung der Fasern auf eine Faserlänge < 5 mm

## 5.3 Trenntechnik

In herkömmlichen Aminoxidverfahren werden die Celluloselösungen aus Reinstoffen ohne PET-Fasern hergestellt. Um die PET-Fasern von der Lösung abzuscheiden, muss innerhalb des Recyclingprozesses eine Trenntechnik integriert werden. Das Trennen innerhalb des Prozesses ist besonders wichtig, denn das Ziel ist es, aus der Baumwolle der Mischgewebe Cellulosefasern herzustellen und zusätzlich das PET zurückzugewinnen. Da es sich bei dem zu behandelnden System um eine Suspension handelt, kommen dafür mechanische Trennverfahren in Betracht (Perry, 2008).

### 5.3.1 Filtration

Für das Filtrationsverfahren wird zur Modellierung und Beschreibung in der Regel von der Gültigkeit der Carman-Kozeny- Gleichung ausgegangen (Perry, 2008).

$$\frac{dV_f}{A_F dt_f} = \frac{\Delta p_f}{\eta \left[ \frac{\alpha k_k V_f}{A_F} + \beta \right]} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

Dabei bezeichnet  $V$  das Volumen,  $A$  die Filterfläche,  $\beta$  den Filtermittelwiderstand,  $\alpha$  den Kuchenwiderstand und  $\Delta p$  die Druckdifferenz des Filters. In ihrer vereinfachten Form lässt sich ein Volumenstrom  $\dot{V}$  nach (Gl. 5-2) berechnen (Stieß, 1997).

$$\dot{V} = A \cdot \frac{\Delta p}{\eta [\alpha_V \cdot L + \beta]} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

Die Viskosität  $\eta$  der zu filtrierenden Flüssigkeit hat einen entscheidenden Einfluss auf die Anforderungen an einen möglichen Filtrationsprozess. Infolge einer hohen Viskosität, der zu filtrierenden Flüssigkeit müsste eine größere Druckdifferenz vorliegen, um einen akzeptablen Volumenstrom zu realisieren. Allerdings ist bei einer großen Druckdifferenz wiederum ein höherer Kuchenwiderstand zu erwarten.

Da bekannt ist, dass die Viskosität mit der Cellulosekonzentration stark exponentiell ansteigt und die Grenzen der Trenntechnik ohne weitere Versuchsreihen nicht ausreichend genau abgeschätzt werden können, wird der Prozess so gestaltet, dass eine niedrige Viskosität und in Folge dessen niedrige Cellulosekonzentrationen vorliegen (Paulussen, 2019a; Blachot, 1997).

### 5.3.2 Zentrifugation

Für die Modellierung und Berechnung der Trennleistung einer Zentrifuge ist die Sinkgeschwindigkeit der Partikel entscheidend. Der Berechnung einer realisierbaren Sinkgeschwindigkeit, wird das Gesetz von Stokes zu Grunde gelegt (Stieß, 1997):

$$u_p = \frac{(\rho_s - \rho_f) d_p^2 \omega^2}{18 \eta} \quad r = \frac{(\rho_s - \rho_f) d_p^2}{18 \eta} g \cdot z \quad (\text{Gl. 5-3})$$

Für eine Einordnung der Trennleistung unterschiedlicher Zentrifugen wird die Schleuderzahl  $z$  herangezogen. Sie gibt das Verhältnis der Zentrifugalbeschleunigung zur Erdbeschleunigung  $g$  an und ist damit ein Maß für die Trennleistung. Die Schleuderzahl ist folgendermaßen definiert (Stieß, 1997):

$$z = r \cdot \frac{\omega^2}{g} \quad (\text{Gl. 5-4})$$

$$\text{mit } \omega = 2\pi \cdot n \quad (\text{Gl. 5-5})$$

Dabei bezeichnet  $r$  den Abstand des Partikels zur Drehachse. Die Schleuderzahl  $z$  ist proportional zur Trennleistung bzw. zur Sinkgeschwindigkeit der Partikel. Da keine kugelförmigen Partikel

sondern Fasern vorliegen, ist die Anwendbarkeit zu bezweifeln. Die Anwendung könnte unter Berücksichtigung formspezifischer Äquivalenzdurchmesser erfolgen.

Dennoch lässt sich mit dieser Gleichung der Einfluss der Viskosität, unabhängig von den zu betrachtenden Partikeln, erkennen. Gemäß (Gl. 5-6) zur Berechnung des theoretischen Trennkorndurchmessers  $d_p$ , würde eine hohe Viskosität zu einer Vergrößerung des Trennkorndurchmessers führen (Perry, 2008). In welchem Maße dies für die faserige Partikelform gilt, muss untersucht werden.

$$d_p = \frac{1}{2 \pi n} \cdot \sqrt{\frac{18 \eta}{(\rho_s - \rho_f) \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)} \quad (\text{Gl. 5-6})$$

Der Trennkorndurchmesser besagt, dass alle kleineren Teilchen nicht aus der Suspension abgetrennt sondern mit der Begleitflüssigkeit ausgetragen werden (Perry, 2008).

Da die Viskosität  $\eta$  mit steigender Cellulosekonzentration exponentiell ansteigt (Blachot, 1997) und die Fasern für eine gute Löslichkeit der Cellulose zerkleinert werden, wurde auf Grundlage der Trennversuche (vgl. Kapitel 3.3) mittels einer Zentrifuge eine Zielgröße für die Cellulosekonzentration des Prozesses festgelegt. Innerhalb des Lösungsvorgangs soll eine 1,5 Gew.-%ige Celluloselösung erhalten werden. Die Nullscherviskosität der Lösung beträgt damit etwa 1 Pa·s (Paulussen, 2019).

#### **Zielgröße Lösungsvorgang:**

Celluloselösung mit 1,5 Gew.-% Cellulose und einer Nullscherviskosität von ca. 1 Pa·s.

## **5.4 Spinntechnik**

Beim Nassspinnverfahren werden Spinnlösungen benötigt, die 12,5 – 13 Gew.-% Cellulose enthalten. Denn nur so können Filamente und Fasern regeneriert werden, dessen Eigenschaften den Anforderungen von Textilien entsprechen (Haslinger, 2016; Liu et al., 2001). Die erhaltene Lösung müsste also stark konzentriert werden.

## **5.5 Analyse**

Nun stellt sich für die weitere Prozessentwicklung folgende Frage:

- Wie kann die 1,5 %ige Lösung weiter konzentriert werden?

Für die Beantwortung der Frage bzw. der Lösung für die Problematik der niedrigen Konzentration, wurden verschiedene Ansätze identifiziert, die nachfolgend betrachtet werden:

1. Wassergehalt reduzieren
2. Lösungsmittel-Gehalt reduzieren

### Reduzierung des Wassergehalts

Die praktischste Methode für die Konzentrierung scheint die Reduzierung des Wassergehalts zu sein. Dies könnte z.B. durch Verdampfung des Wassers erfolgen. Allerdings lässt sich der Wassergehalt nur begrenzt reduzieren, da ansonsten das NMMO zu seiner Monohydratform auskristallisiert (vgl. Kapitel 2.6.1).

Bei einem Blick in das Mischungsdreieck in Abb. 5-2 für eine Lösung mit einer Zusammensetzung von 1,5 Gew.-% Cellulose, 20 Gew.-% Wasser und 78,5 Gew.-% NMMO zeigt sich, dass der Wassergehalt auf maximal 11 Gew.-% durch Verdampfung reduziert werden kann, bevor das NMMO auskristallisieren würde. Die Lösung hätte damit eine Cellulosekonzentration von etwa 6 Gew.-% Cellulose. Die Suspension wäre in diesem Fall nicht für eine Verarbeitung zu Spinnfasern geeignet (Haslinger, 2016).

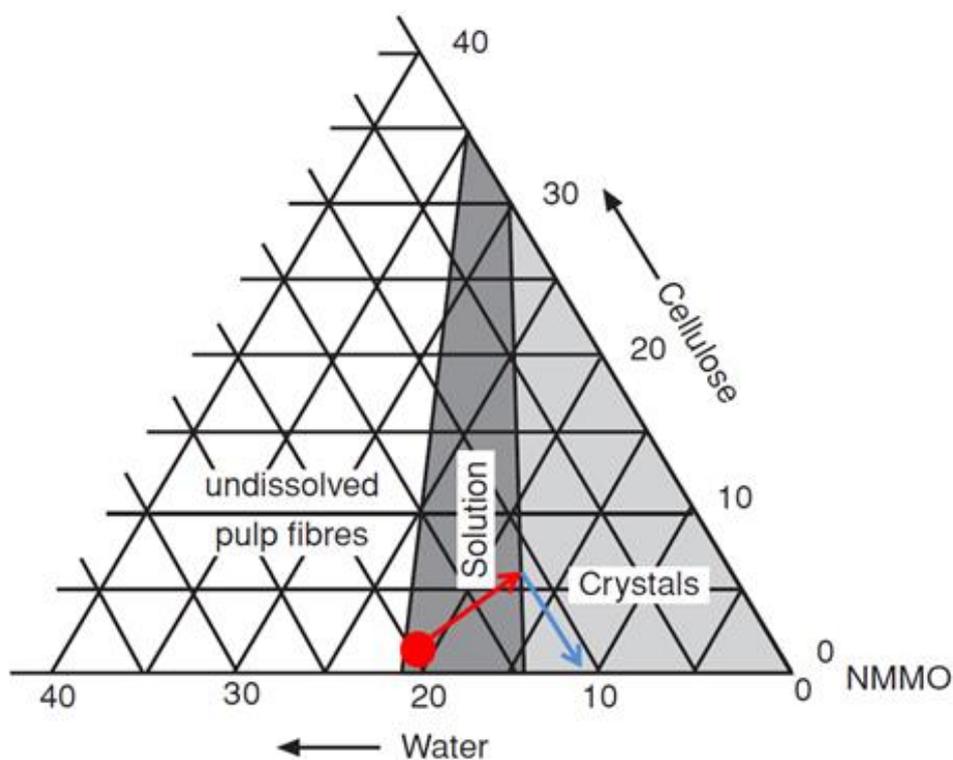


Abb. 5-2 – Ternäres Phasendiagramm für NMMO-Cellulose-Wasser

### Reduzierung des Lösungsmittels

Das NMMO besitzt im Vergleich zum Wasser einen sehr geringen Dampfdruck und entweicht überwiegend durch den Siedeverzug des Wassers. Bei einem Verdampfungsprozess enthalten die Brüden nur Spuren des NMMO. Auf etwa 1 kg Brüden fallen 100 ppm NMMO an (Kalt, 1997).

Für eine Konzentrierung der Cellulose in Bereiche, mit denen die Spinntechnik arbeiten kann, müsste dem System zusätzlich zum Wasser ca. 4 % NMMO entzogen werden. Das System könnte in einem Umlaufverdampfer im Kreis geführt und mit frischem Wasser versorgt werden, damit das NMMO nicht auskristallisiert. Allerdings müsste das System dann ca. 400-mal im Kreis geführt

werden, damit genug NMMO abgeführt werden kann. Diese Lösungsmöglichkeit ist ökonomisch nicht sinnvoll, da große Mengen Wasser verdampft werden müssten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Konzentrationsniveau der Cellulose mit den betrachteten Ansätzen nicht bzw. nicht ökonomisch sinnvoll zu realisieren ist.

Ein weiterer Ansatz wäre das Ausfällen und Abscheiden der Cellulose, um anschließend eine neue Lösung aus dem Cellulose Regenerat herzustellen. Dafür kann die Temperatur gesenkt werden oder Wasser hinzugegeben werden. Das Absenken der Temperatur würde die Prozessführung wesentlich komplexer machen als die einfache Zugabe von Wasser. Außerdem würde in diesem Fall der Polaritätsänderung keine Gefahr bestehen, dass sich ein zweiter Feststoff bildet, indem das NMMO auskristallisiert.

Für beide Fälle müssten eine zusätzliche Misch- und Trennoperation mit entsprechenden Apparaten in den Prozess integriert werden, deren Zusatzkosten sich stark auf die Ökonomie des Gesamtprozesses auswirken könnten.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Produktionskapazitäten für Anlagen des Aminoxidverfahrens bei ca. 50.000 – 100.000 t/a liegen. Dies bedeutet, dass von den gesammelten Textilien von ca. 1,1 Mio. t/a in Deutschland sehr große Anteile als Rohstoff für diesen Prozess beschafft werden müssten (Korolkow, 2015).

## 5.6 Ergebnis der Prozesssynthese

Beim aktuellen Wissensstand scheint es nicht möglich zu sein, diesen Prozess alleinstehend und wirtschaftlich zu realisieren. Der Ansatz der weiteren Prozessentwicklung bezieht sich darauf, die Recyclingtechnik in einen bestehenden Aminoxidprozess zu integrieren.

Der Recyclingprozess beginnt mit der Faservorbereitung bzw. Zerkleinerung der Mischgewebe und der Zufuhr des Lösungsmittels aus den Anlagen der Aminoxidprozesses. Enden wird der Recyclingprozess mit der Übergabe der Celluloselösung aus Mischgeweben an die Anlagen des Aminoxidprozesses für die Produktion von Cellulosefasern aus Holzstoffen und der Abführung des gebrauchten Lösungsmittels an die Aufbereitungsanlage. In Abb. 5-3 ist der Ansatz der Prozessintegration bildlich dargestellt.

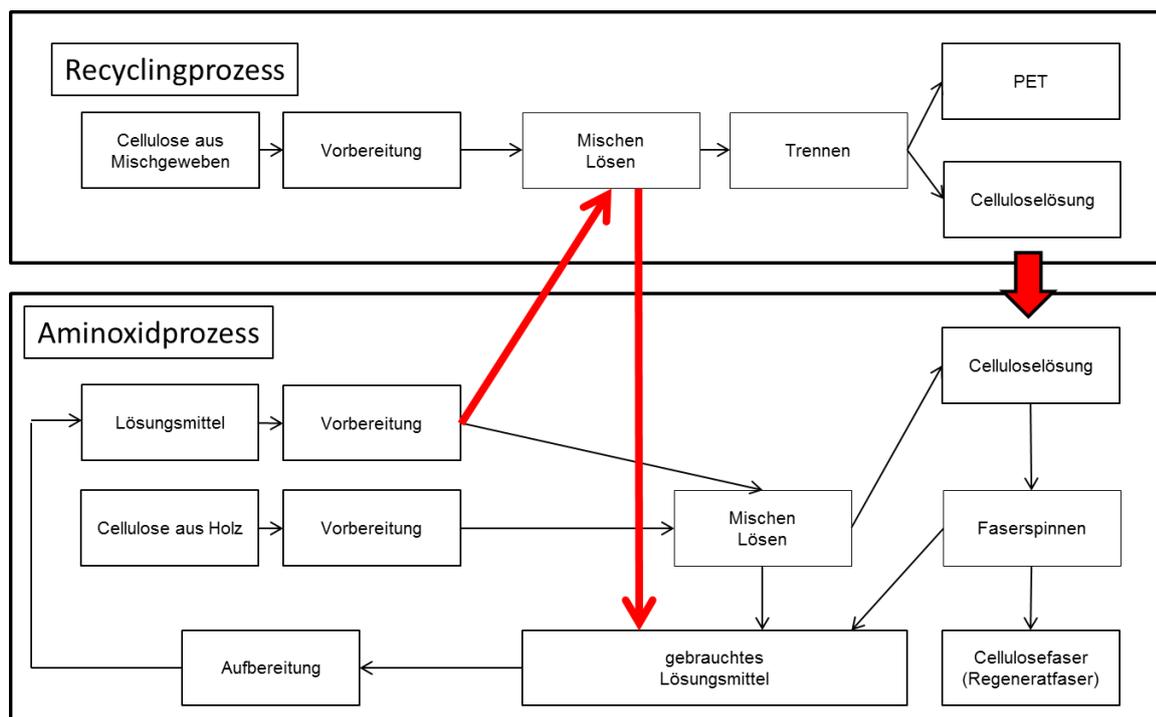


Abb. 5-3 – Darstellung der Prozessintegration zwischen dem Recyclingprozess und dem Aminoxidprozess

### 5.6.1 Anlagenstruktur

In diesem Kapitel wird die Anlagenstruktur für die weitere Entwicklung detailliert dargestellt (vgl. Abb. 5-4). Der Gesamtprozess besteht aus fünf Teilanlagen:

- Teilanlage 10 – Recyclingprozess – Vorbereitung der Mischgewebe
- Teilanlage 20 – Recyclingprozess – Lösen der Cellulose und Abtrennen des PET
- Teilanlage 30 – Aminoxidprozess – Vorbereitung des Lösungsmittels
- Teilanlage 40 – Aminoxidprozess – Herstellung der Cellulosesuspension und Spinnverfahren
- Teilanlage 50 – Aminoxidprozess – Aufbereitung des Lösungsmittels

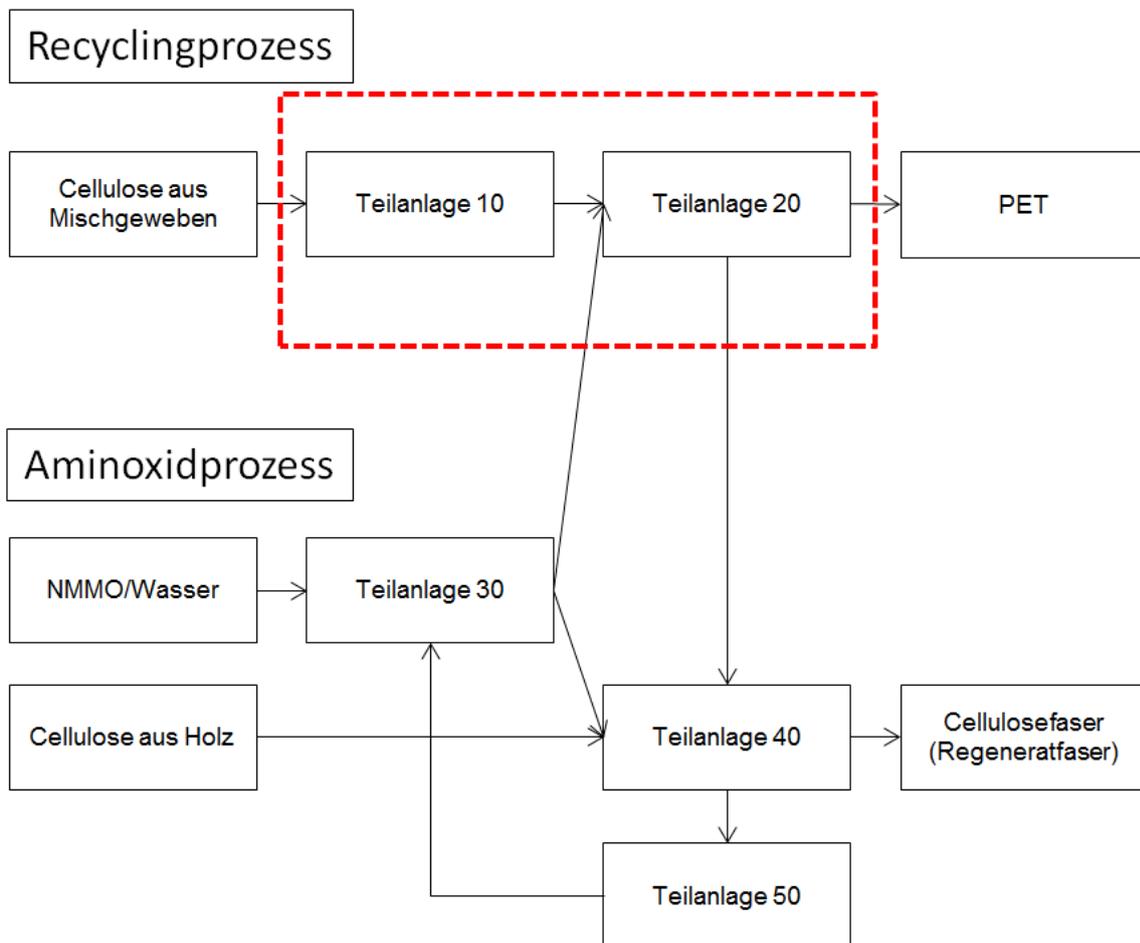


Abb. 5-4 – Anlagenstruktur für den Gesamtprozess

Für die Teilanlagen 10 und 20 wird in Kapitel 6 eine Apparateauswahl getroffen und die Verfahrensfliessbilder ausgearbeitet. In Kapitel 7 werden die Apparate dimensioniert. Auf der Grundlage der überschlägigen Dimensionierung erfolgt eine Kostenschätzung in Kapitel 8. Die Prozesse und Fließbilder der Teilanlagen 30, 40 und 50 werden in Kapitel 6 für die Vollständigkeit und Übersicht des Gesamtprozesses beigefügt.

# 6 Prozessentwicklung

---

In diesem Kapitel wird zum Zwecke einer Schätzung der Investitionsausgaben der Recyclingprozess für die Mischgewebe entwickelt, die Apparateauswahl getroffen und die Verfahrensfliessbilder aus den Grundfliessbildern abgeleitet. Die Recyclinganlage gliedert sich in zwei Teilanlagen (siehe Kapitel 5.6.1) und wird als Erweiterung für eine Produktionsanlage des Aminoxidverfahrens projektiert.

1. Teilanlage 10 – Recyclingprozess – Vorbereitung der Mischgewebe
2. Teilanlage 20 – Recyclingprozess – Lösen der Cellulose und Abtrennen des PET

Der Aminoxidanlage gehören die Teilanlagen 30, 40 und 50 an. Für diese Teilanlagen werden anhand des Stands der Technik sowie der Patentliteratur die Grundfliessbilder und Verfahrensfliessbilder erstellt und die Teilprozesse beschrieben.

Eine angemessene Produktionskapazität, bezogen auf den Rohstoff Cellulose, sollte ca. 10.000 t/a betragen. Das bedeutet 20.000 t/a Mischgewebe werden bei Annahme eines 50 Gew.-%igen Cellulose- bzw. Baumwollanteils durch diesen Prozess recycelt.

Die Produktionsanlagen in denen Cellulosefasern mittels des Aminoxidverfahrens aus Holzstoffen hergestellt werden, besitzen eine Produktionskapazität von ca. 100.000 t/a. Beim aktuellen Stand der Prozessentwicklung und der Annahme, dass die Herstellung einer 1,5 Gew.-%igen Celluloselösung technisch realisiert werden kann, würde die Recyclinganlage für Mischgewebe mit einem Baumwollanteil von 50 % ca. 10 % des Celluloserohstoffs aus Holzstoffen ersetzen. Gleichzeitig können 10.000 t/a PET zurückgewonnen werden. Für den Betrieb wird ein 3-Schichtmodell angenommen, das die Anlagen 8000 h/a im Betrieb hält.

## 6.1 Grundfliessbilder

In diesem Kapitel werden die Grundfliessbilder dargestellt und kurz erläutert. Da die einzelnen Teilanlagen an vielen Stellen miteinander gekoppelt sind, besitzt jede Teilanlage eine eigene Farbe. Die Kopplungsstellen eines Grundfliessbilds sind jeweils in der Farbe der übergebenden bzw. übernehmenden Teilanlage dargestellt.

Übersicht:

Teilanlage 10	Grün
Teilanlage 20	Orange
Teilanlage 30	Blau
Teilanlage 40	Olivgrün
Teilanlage 50	Lila

## 6.1.1 Grundfließbild der Teilanlage 10

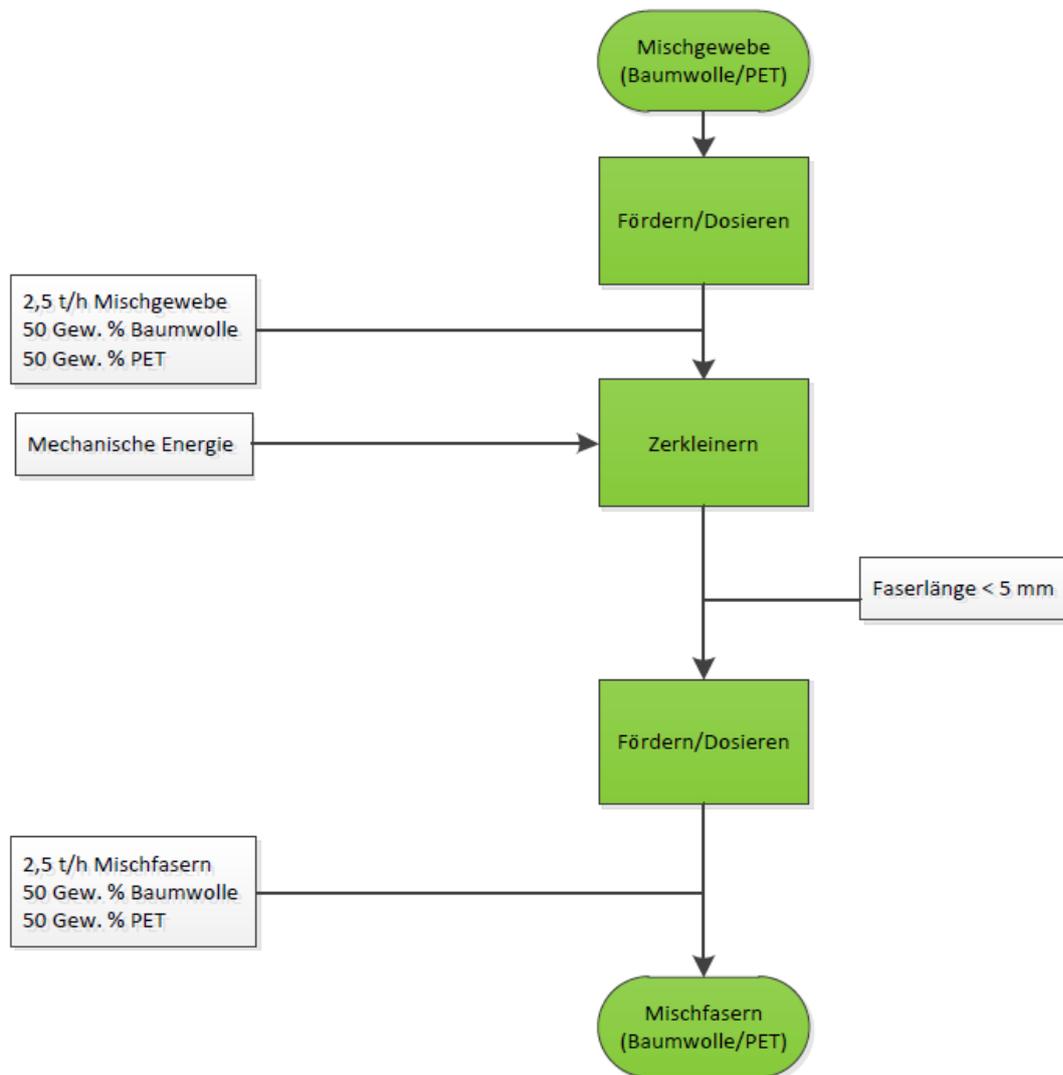


Abb. 6-1 – Grundfließbild der Teilanlage 10

Die Teilanlage 10 dient der Faservorbereitung. Die textilen Mischgewebe müssen für den Lösungsprozess zerkleinert werden. Ebenfalls ist es wichtig, die Fasern für den Lösungsprozess zu dosieren.

## 6.1.2 Grundfließbild der Teilanlage 20

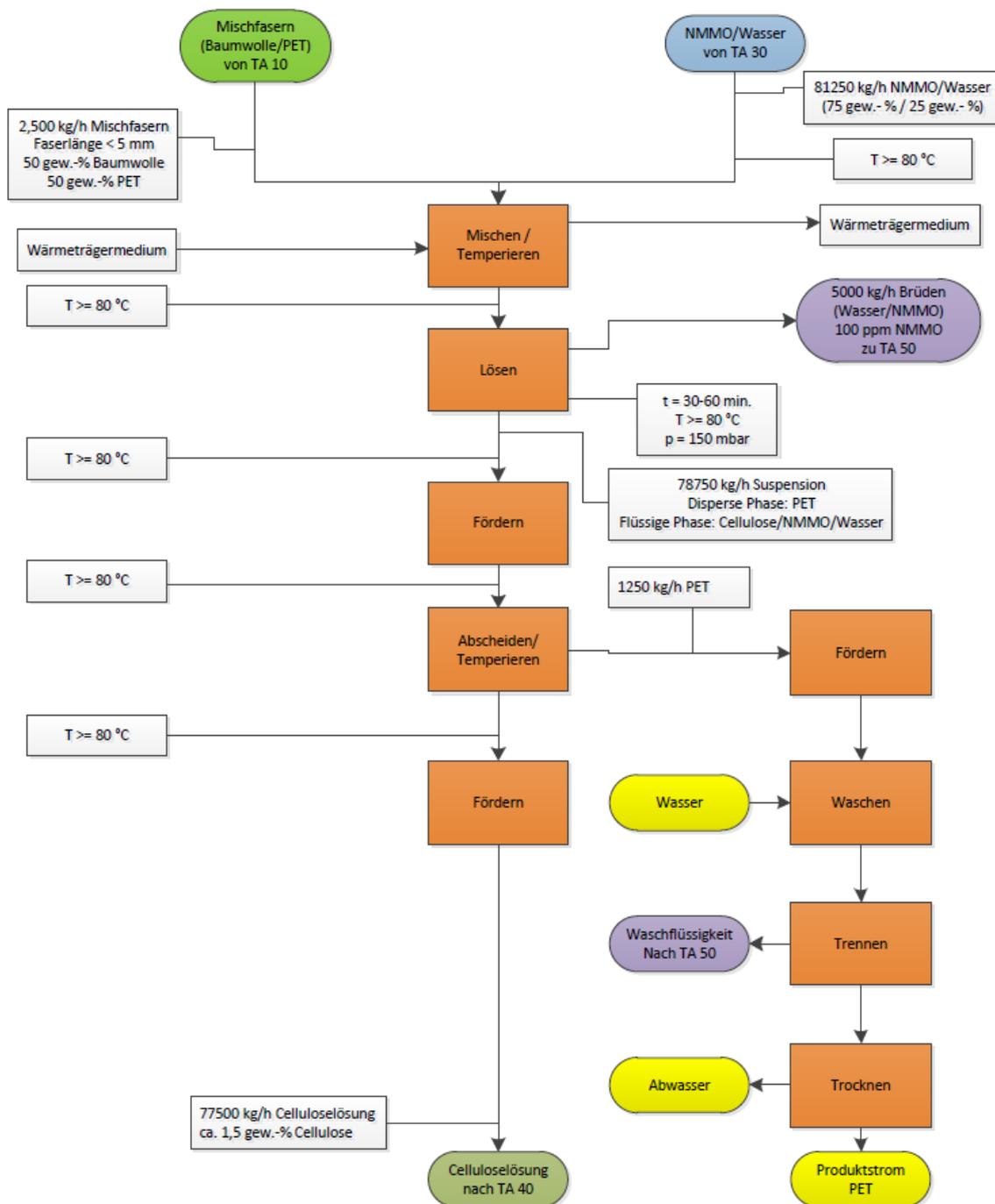


Abb. 6-2 – Grundfließbild der Teilanlage 20

In Teilanlage 20 sind die Grundoperationen für die Herstellung der Celluloselösung und Abscheidung der PET-Fasern dargestellt. Das Lösungsmittel wird aus Teilanlage 30 des Aminoxidprozesses bereitgestellt und die Celluloselösung wird an den Aminoxidprozess überführt. Die Brüden enthalten Spuren des Lösungsmittels und werden an die Teilanlage 50 für die Lösungsmittelaufbereitung überführt. Die PET-Fasern sollen am Ende als Reinstoff vorliegen und werden daher einem Waschprozess unterzogen. Die Waschflüssigkeit wird ebenfalls an die Teilanlage 50 zur Aufbereitung überführt.

### 6.1.3 Grundfließbild der Teilanlage 30

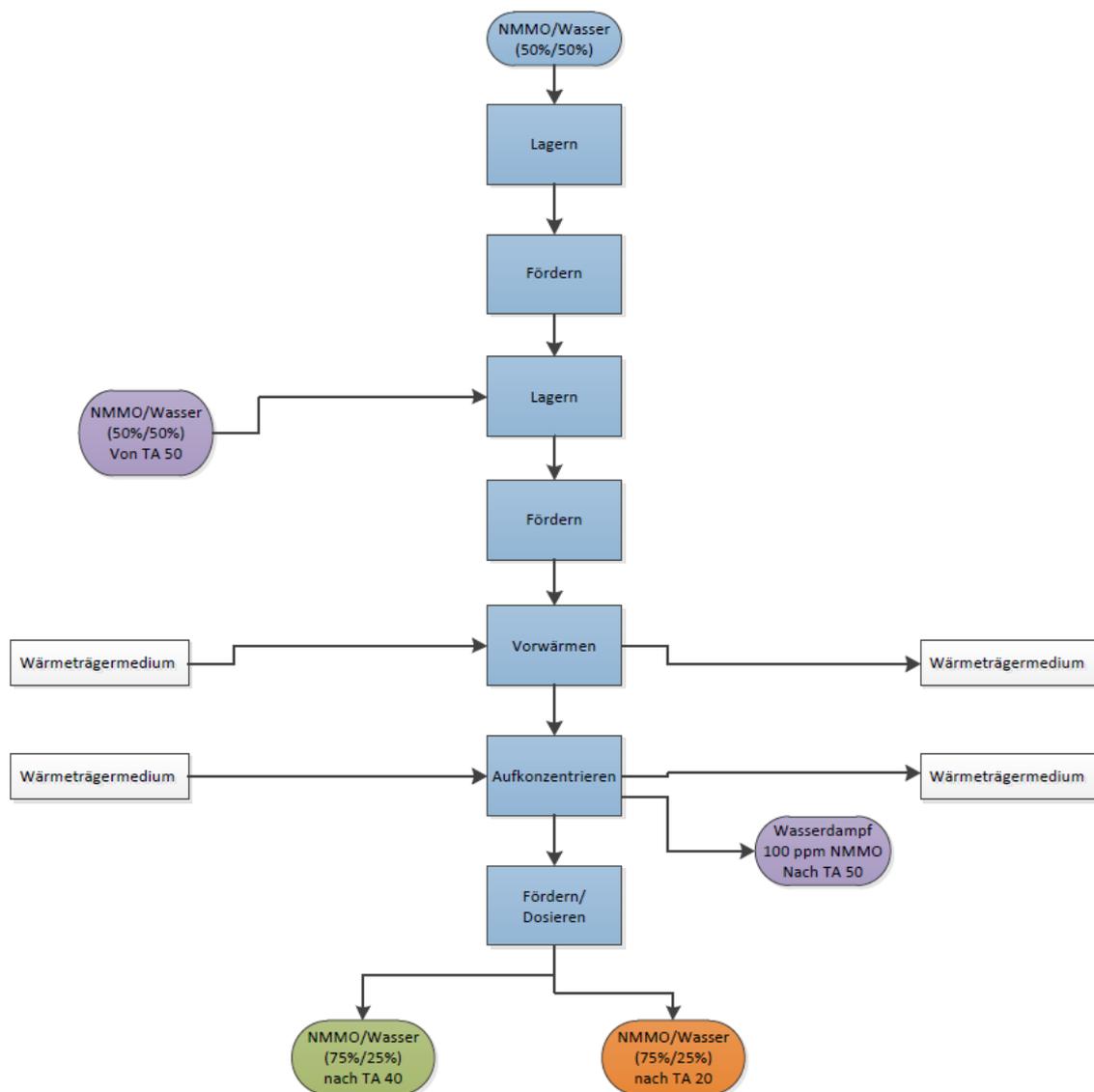


Abb. 6-3 – Grundfließbild der Teilanlage 30

In Teilanlage 30 erfolgt die Vorbereitung des Lösungsmittels. Das Lösungsmittel wird mit einem Wasseranteil von Gew.-50 % geliefert. Da die Rückgewinnungsquote bei ca. 99 % liegen soll, werden nur geringe Mengen hinzudosiert. Der Großteil des Lösungsmittels wird in einem Kreislauf geführt und über die Teilanlage 50 (Lösungsmittelaufbereitung) zugeführt. Durch die Prozesskonfiguration mit der Recyclinganlage (TA 10 und TA 20) muss die Teilanlage 30, zusätzlich zur Teilanlage 40 in der die Spinnlösung hergestellt wird, die Teilanlage 20 mit Lösungsmittel versorgen.

## 6.1.4 Grundfließbild der Teilanlage 40

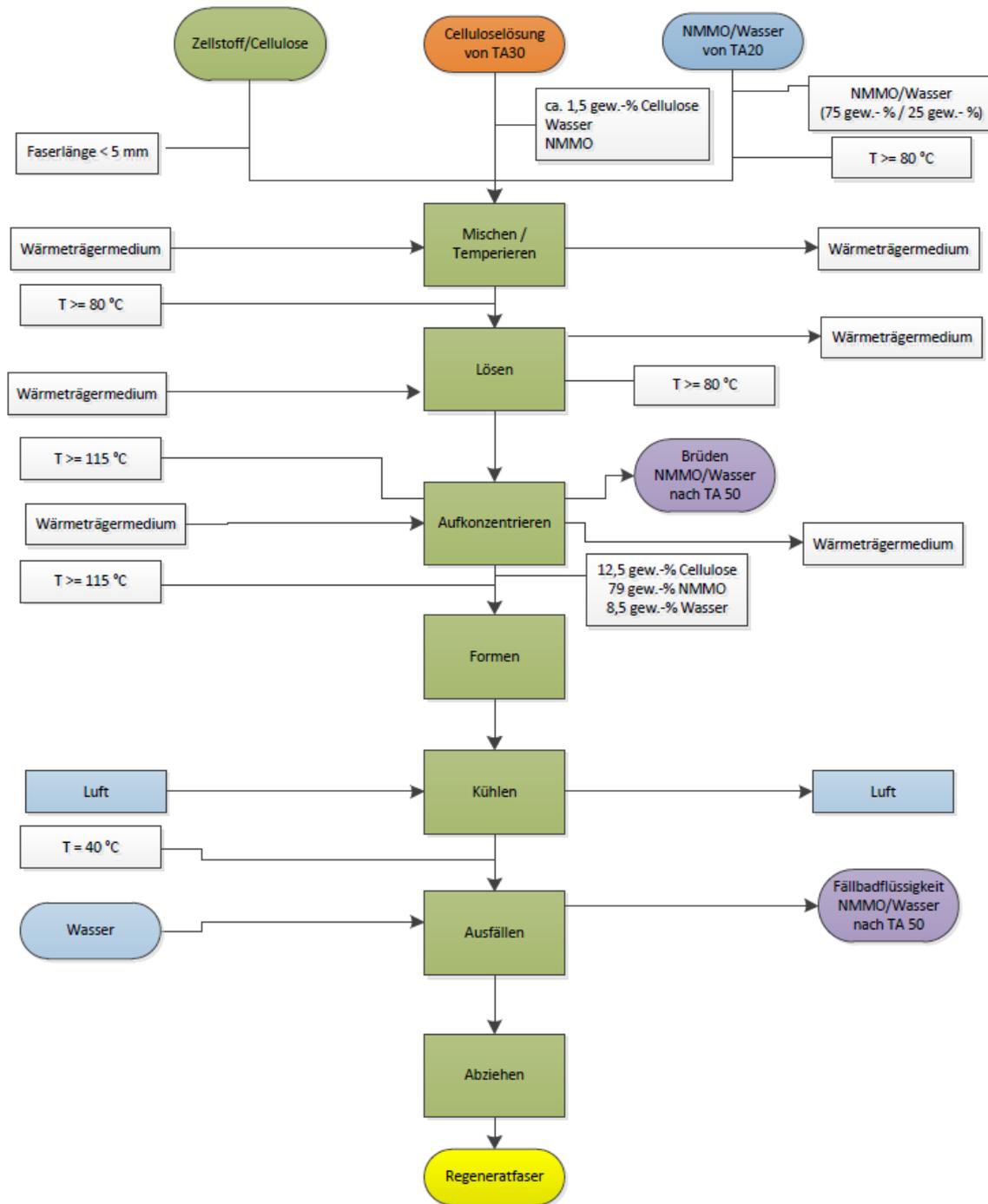


Abb. 6-4 – Grundfließbild der Teilanlage 40

In Teilanlage 40 erfolgen die Herstellung der spinnfähigen Celluloselösung sowie die Formgebung zur Regeneratfaser. Die Celluloselösung der Teilanlage 20 wird mit dem Lösungsmittel und weiterem Celluloserohstoff gemischt. Die Spinnlösung wird bis ca. 12,5 Gew.-% Cellulose konzentriert, indem der Lösung kontinuierlich Wasser entzogen wird.

## 6.1.5 Grundfließbild der Teilanlage 50

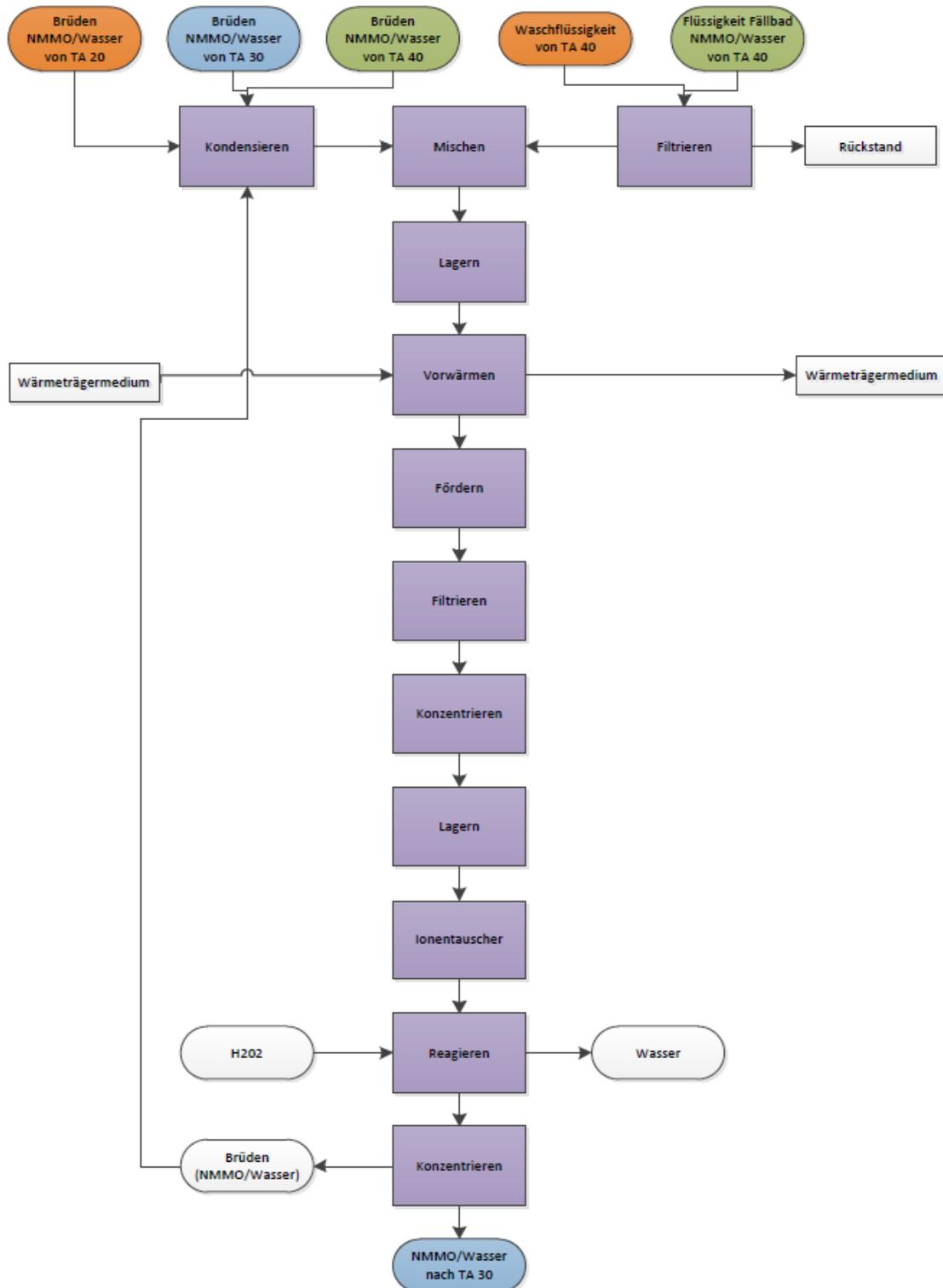


Abb. 6-5 – Grundfließbild der Teilanlage 50

Die Teilanlage 50 dient der Regeneration des Lösungsmittels. Dies gilt sowohl für die Brüden, die beim Lösungsprozess anfallen, als auch für die Flüssigkeiten aus dem Fällbad und die Waschflüssigkeiten, die ebenfalls NMMO enthalten. Das aufbereitete Lösungsmittel wird anschließend an Teilanlage 30 überführt.

## 6.2 Verfahrens und Apparateauswahl

Die Teilanlage 20 ist die Hauptanlage des Recyclingprozesses. Das Mischen und Lösen der Cellulose, sowie die Abscheidung der PET-Fasern sind für die Prozessentwicklung von wesentlicher Bedeutung. Daher wird in diesem Kapitel eine Auswahl für die Verfahren und Apparate der Teilanlage 20 getroffen. Die Auswahl beruht auf den Informationen der Patentliteratur und Handbüchern der Verfahrenstechnik.

### 6.2.1 Mischen und Lösen

Im herkömmlichen Aminoxidverfahren besteht das Ziel darin, eine möglichst hochkonzentrierte Celluloselösung herzustellen. Dementsprechend werden in diesen Verfahren Apparate verwendet, die für das Mischen von viskosen Fluiden und Pasten geeignet sind (Haslinger, 2016). Fluide mit einer Viskosität  $< 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  werden im allgemeinen als viskos klassifiziert (Perry, 2008).

Für den Recyclingprozess und die Trennung der Mischgewebe ist eine hochkonzentrierte Celluloselösung nicht sinnvoll, da die hohe Viskosität die Trennung erschwert oder unmöglich macht. Daher wird ein Mischapparat benötigt, der eine strukturviskose Lösung mit 1,5 Gew.-% Cellulose herstellen kann. Zusätzlich muss der Apparat beheizt sein und einen Abzug besitzen, damit Wasser durch Verdampfen unter Vakuum entfernt werden kann. Die Nullscherviskosität der Lösung beträgt ca.  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Rührapparate zählen zu den wichtigsten Mischausrüstungen. Sie bestehen aus den Hauptbaugruppen Rührwerk und Behälter. Rührprozesse besitzen eine große Variationsbreite für Stoffeigenschaften, Prozessparameter und Verfahrensbedingungen (Schubert, 2002). Das Mischen in Rührkesseln eignet sich für den diskontinuierlichen und kontinuierlichen Betrieb. Die Verweilzeit der Stoffe im Kessel sowie die Strömungsform durch verschiedene Rührertypen können beliebig variiert werden. Die Rührapparate eignen sich für Fluide bis zu einer Viskosität von  $750 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (Perry, 2008).

Wichtig für den Lösungsvorgang ist das Suspendieren der Fasern bzw. Partikeln. Dafür sind ausreichende Geschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten speziell im Bodenbereich notwendig. Der Feststoffvolumenanteil sollte in der sedimentierten Bodenschicht maximal zwischen  $\varphi_{s,max} = 0,5$  bis  $0,7$  liegen. Da die Faser jedoch sehr kleine Durchmesser aufweisen und der Feststoffvolumenanteil gering ist, müssten die Werte deutlich unter dieser Grenze liegen. Ein Behälter mit gewölbten Boden schafft günstige Bedingungen für das Suspendieren (Schubert, 2002). Für eine axiale Strömung, die vorteilhaft für das Suspendieren und das Aufwirbeln der Feststoffe ist, eignen sich Propellerrührer oder Schrägblattrührer (vgl. Abb. 6-6). Zusätzlich können an der Behälterwand in bodennähe kleinere Ausführungen von Propellerrührern installiert werden, um die Aufwirbelung der Feststoffe zu begünstigen (Perry, 2008).

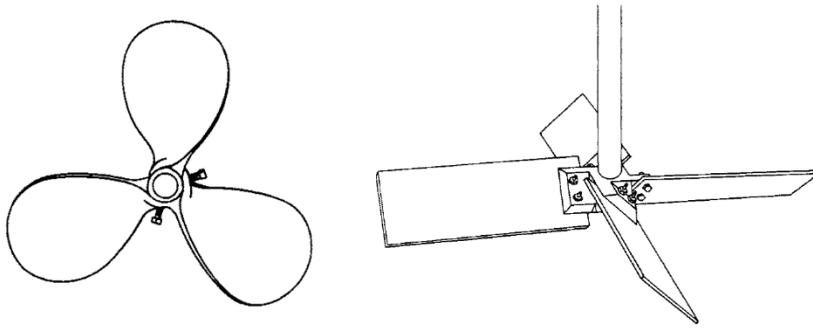


Abb. 6-6 – Skizzen eines Propellerrührers (links) und eines Schrägblattrührers (rechts) (Perry, 2008)

Da die Celluloselösung ein strukturviskoses Verhalten unter Scherung besitzt, kann der Rührer mit zwei Wellen ausgeführt werden, sodass beispielsweise ein Ankerrührer die notwendige Scherung in den Totzonen in der Nähe der Behälterwand einbringt. Für eine kontinuierliche Prozessführung sollte die Suspension über ein Tauchrohr oberhalb des Rührers entnommen werden. Eine bodennahe Entnahme ist nicht zu empfehlen, da sich Feststoffablagerungen, die ungelöste Cellulose enthalten bilden könnten (Perry, 2008). Die Beheizung kann durch einen Heizmantel oder wenn es sich beim Rührer nicht um einen Ankerrührer handelt, durch eine Heizspule im inneren des Behälters erfolgen (vgl. Abb. 6-7).

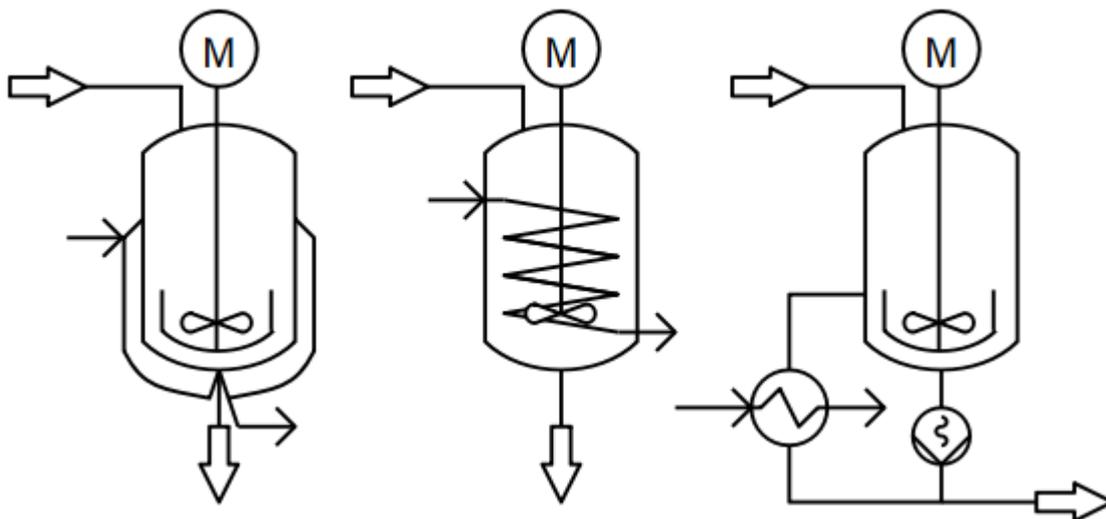


Abb. 6-7 – Skizzen einer Mantelheizung (links) und einer Heizspirale (mitte) und externe Heizung (rechts) für einen Rührkessel

Im ersten Fall ist die verfügbare Fläche für die Wärmeübertragung durch die Fläche des Behältermantels definiert. Diese Art der Wärmeübertragung ist aus energetischen Gründen selten wirtschaftlich. Im aktuellen Prozess müssen große Mengen Wasser verdampft werden. Die Beheizung über eine Rohrschlange wird ebenfalls aufgrund der hohen Viskosität und strukturviskosität des Mediums ausgeschlossen. Daher wird für den Prozess eine externe Beheizung als Konfiguration gewählt. Dies erlaubt eine beliebige Auslegung der Wärmeübertragungsfläche und die Temperaturgradienten können besser ausgenutzt werden (Brunner, 2015). Für die Patentliteratur, die sich mit der Herstellung von Celluloselösungen befasst, lässt sich zusammenfassend feststellen, dass verschiedene Mischapparate genutzt werden können. Dazu zählen vertikale Mischsysteme wie Rührkessel und speziell Doppelwellenrührkessel, Filmtruder oder Extruder (Haslinger, 2016; Pillichshammer, 2015; Zikeli,

1995). In den Patenten, die sich mit Baumwolltextilien als Rohstoffquelle für Cellulose befassen, werden in der Regel vertikale Doppelrührwellenapparate betrachtet (Haslinger, 2016). Daher wird für den Misch- und Lösungsprozess ein Doppelwellenrührkessel ausgewählt.

### 6.2.1.1 Leistungsbedarf des Rührwerks

Zur Abschätzung der Rührwerksleistung wird die Reynoldszahl überschlägig ermittelt. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Daten von Blachot et al. (1998). Dabei ist zu beachten, dass der Celluloserohstoff für den die Stoffwerte gelten, ein niedrigeres Molekulargewicht als die Cellulose der Baumwolle besitzt und die realen Werte abweichen können.

Für die Reynoldszahl eines Rührwerks gilt:

$$Re_{Rührer} = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\eta} \quad (\text{Gl. 6-1}) \quad (\text{Christen, 2010})$$

$\rho$ = Dichte des Mediums	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$n$ = Drehzahl	[s <sup>-1</sup> ]
$d$ = Rührerdurchmesser	[m]
$\eta$ = dynamische Viskosität des Mediums	[Pa·s]

Für  $Re < 10$  ist die Strömung schleichend. Für  $Re \approx 10.000$  herrschen starke Turbulenzen. Da die Lösung eine Polymerlösung mit charakteristischen strukturviskosen Verhalten ist, ändert sich die Viskosität stark in den Bereichen der Scherung. Daher ist die Reynoldszahl bzw. die dynamische Viskosität im Raum des Rührkessels nicht gleichmäßig.

Wegen der Strukturviskosität wird ein Doppelwellenrührwerk mit einem Propellerrührer und einem Ankerrührer angenommen. Die Beheizung des Apparats erfolgt über einen externen Wärmeüberträger.

### Berechnung der Reynoldszahl eines Vergleichsmediums unter Annahmen

Annahmen Propellerrührer:

- Volumen Rührkessel  $\approx 40 \text{ m}^3$  (DIN 28136-1)
- Durchmesser Rührkessel 3,2 m (DIN 28136-1)
- Dimensionsloser Rührerdurchmesser  $\frac{d_{Rührer}}{d_{Kessel}} = 0,3$
- Durchmesser Rührer  $\approx 1 \text{ m}$  (Christen, 2010)
- Drehzahl  $n = 15 \text{ s}^{-1}$  (Blachot, 1997)
- $\eta = 0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (Blachot, 1997)

$$Re_{Propellerrührer} = \frac{1,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 15 \text{ s}^{-1} \cdot 1^2 \text{ m}^2}{0,5 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 33,3$$

Annahmen Ankerrührer:

- Volumen Rührkessel  $\approx 40 \text{ m}^3$  (DIN 28136-1)
- Durchmesser Rührkessel 3,2 m (DIN 28136-1)
- Dimensionsloser Rührerdurchmesser  $\frac{d_{\text{Rührer}}}{d_{\text{Kessel}}} = 0,98$
- Durchmesser Rührer  $\approx 3 \text{ m}$  (Christen, 2010)
- Drehzahl  $n = 15 \text{ s}^{-1}$  (Blachot, 1997)
- $\eta = 0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (Blachot, 1997)

$$Re_{\text{Ankerrührer}} = \frac{1,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 15 \text{ s}^{-1} * 3^2 \text{ m}^2}{0,5 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 299,7 \approx 300$$

Berechnung der Leistungsaufnahme des Rührwerks für ein Vergleichsmedium

$$P = Ne \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (\text{Gl. 6-2}) \quad (\text{Christen, 2010})$$

P = Rührerleistung	[W]
Ne = Newtonzahl	[-]
$\rho$ = Dichte des Mediums	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
n = Drehzahl	$[\text{s}^{-1}]$
d = Rührerdurchmesser	[m]

Die Newtonzahl wird aus dem Diagramm (vgl. Abb. 6-8) ermittelt (Christen, 2010).

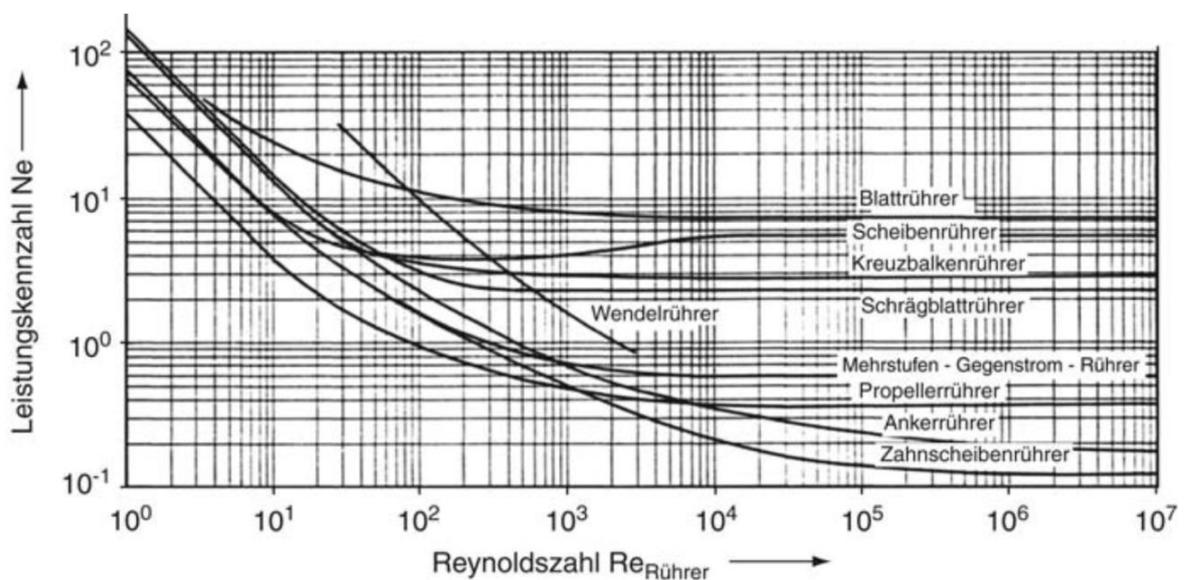


Abb. 6-8 – Diagramm zur Bestimmung der Leistungskennzahl  $Ne$  eines Rührers als Funktion der Reynoldszahl  $Re$  (Christen, 2010)

Propellerrührer:

$$P_{\text{Propellerrührer}} = 1,5 * 1,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^{-3}} * (15 \text{ s}^{-1})^3 * (1 \text{ m})^5 = 5,62 \text{ kW}$$

Ankerrührer

$$P_{\text{Ankerrührer}} = 1,3 * 1,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^{-3}} * (15 \text{ s}^{-1})^3 * (3 \text{ m})^5 = 5,25 \text{ kW}$$

Leistung Rührwerk

$$P_{\text{Rührwerk}} = P_{\text{Propellerrührer}} + P_{\text{Ankerrührer}} = 5,62 \text{ kW} + 5,25 \text{ kW} = 10,87 \text{ kW}$$

spezifischer Leistungseintrag

$$\frac{P}{V} = \frac{10,87 \cdot 10^3 \text{ W}}{40 \text{ m}^3} = 0,27 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

Der ermittelte spezifische Leistungseintrag entspricht den typischen Werten für Homogenisierungsaufgaben bei mittlerer bis hoher Viskosität (Kursaw, 2016).

Der Motor des Rührwerks sollte bei Annahme eines Wirkungsgrads von 90 % eine elektrische Leistung von ca. 12 kW erbringen.

### 6.2.1.2 Schätzung der Wärmeübertragungsfläche

Um den externen Wärmüberträger, der über eine Pumpe mit dem Rührkessel gekoppelt ist, überschlägig zu dimensionieren, wird die benötigte Wärmeübertragungsfläche berechnet.

Es müssen ca. 5 t/h Wasser verdampft werden. Es wird angenommen, dass der Rührkessel ein adiabates System darstellt. Des Weiteren wird angenommen, dass ausschließlich Wasser verdampft, da der Dampfdruck des NMMO im Vergleich zum Wasser sehr niedrig ist (Paulussen, 2019a; Kalt, 1997). Die Verdampfungsenthalpie des Wassers bei den vorgegebenen Prozessbedingungen beträgt 2310 kJ/kg (VDI-Wärmeatlas, 2013).

Damit beträgt der spezifische Energiebedarf Q beträgt ca. 4,6 GJ/t.

Der Leistungsbedarf beträgt damit ca. 3200 kW.

Annahmen:

- Wärmedurchgangskoeffizient (Fall: Flüssigkeit – Flüssigkeit)
- $k = 285 \text{ W/m}^2/\text{K}$  (VDI-Wärmeatlas, 2013).
- mittlere logarithmische Temperaturdifferenz
- $\Delta T_{\log,m} = 20 \text{ K}$

$$A = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{\log,m} * k} = \frac{3,2 * 10^6 \text{ W}}{285 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * 20 \text{ K}} = 560 \text{ m}^2$$

## 6.2.2 Trenntechnik

Für die Auswahl einer geeigneten Trenntechnik wurde eine Umfrage am Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik der Technischen Hochschule Köln durchgeführt. Den Teilnehmern wurden Daten (vgl. Tabelle 6-1) für den Prozess und die Trennoperation sowie mögliche Trennverfahren und Trennapparate vorgestellt. Anschließend hat jeder Teilnehmer eine Bewertungsmatrix ausgefüllt, mit der die Verfahren bzw. Apparate unter der Berücksichtigung bestimmter Parameter bewertet wurden.

### 6.2.2.1 Prozessdaten für die Trennoperation

Prozess	Abtrennung suspendierter Feststoffe von der Begleitflüssigkeit.
<b>Beschreibung</b>	Die Suspension besteht aus PET-Partikeln in faseriger Form, die in einer Flüssigkeit aus gelöster Cellulose, NMMO und Wasser verteilt sind. Bei der Lösung handelt es sich um eine strukturviskose Flüssigkeit, bei der die dynamische Viskosität mit steigendem Schergefälle abnimmt.
<b>Ziele</b>	Die PET-Partikel sollen von der Flüssigkeit abgeschieden werden, um eine reine Flüssigkeit ohne PET-Partikel zu erhalten.  Priorität 1: Flüssigkeit ohne PET-Partikel  Priorität 2: PET-Partikel mit geringen Mengen von Cellulose, NMMO und Wasser  Der Prozess soll kontinuierlich ablaufen.
<b>Stoffdaten</b>	Dichte der PET-Fasern: $1,39 \frac{g}{cm^3}$ Partikeldurchmesser der PET-Fasern: $14 \mu m$  Dichte der Flüssigkeit (Cellulose/NMMO/Wasser): $1,11 \frac{g}{cm^3}$  Viskosität der Flüssigkeit: $1000 mPa s$ bei einer Cellulosekonzentration von ca. 1,5 Gew.-%.
<b>Feed-Informationen</b>	Menge: ca. 80 t/h  Zusammensetzung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,5 Gew.-% PET</li> <li>• 1,5 Gew.-% Cellulose in wässriger Lösung</li> <li>• 79 Gew.-% NMMO in wässriger Lösung</li> <li>• 18 Gew.-% Wasser</li> </ul> Der Anteil der gelösten Cellulose ist ein Mindestwert. Im Idealfall sollte dieser, je nach Betreibbarkeit des Trennapparates, gesteigert werden. Dadurch würde die Viskosität der Lösung stark ansteigen.  Weitere Prozesseigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatur: 80 °C</li> <li>• Feststoffkonzentration: 1,5 Gew.-% PET bzw. 1,2 Vol.-%</li> </ul>

Tabelle 6-1 – Datenblatt für die Bewertung des Trennprozesses

### 6.2.2.2 Trennverfahren für fest-flüssige Gemische

Für die Trennung fest-flüssiger Gemische gibt es folgende mechanische Trennverfahren (Perry, 2008):

- Sedimentieren
- Filtrieren
- Abpressen
- Zentrifugieren
- Trennen mit Hilfe von Hydrozyklonen

#### **Sedimentieren**

Die Sedimentationsapparate werden wegen der geringen Sinkgeschwindigkeit der Fasern nicht berücksichtigt.

#### **Filtrieren**

Die treibende Kraft bei der Filtration ist die Druckdifferenz. Sie kann durch Unterdruck oder Überdruck erzeugt werden. Bei der Filtration unterscheidet man grundsätzlich zwischen Oberflächenfiltration und Tiefenfiltration. Für deren Beschreibung gibt es vier idealisierte Modellvorstellungen (Schubert, 2002).

- Kuchenfiltration
- Siebfiltration bzw. Verstopfungsfiltration
- Tiefenfiltration
- Querstromfiltration

Die Kuchenfiltration ist immer dann erforderlich, wenn in einer Flüssigkeit größere Mengen an Feststoffen dispergiert sind und der Feststoff möglichst vollständig von der Flüssigkeit abgetrennt werden soll. Für größere Produktströme ist es naheliegend Apparate für die Kuchenfiltration zu nehmen. Mit diesen Apparaten kann ein stationärer Fließprozess realisiert werden. Durch die bewegten Filterflächen können hohe Durchsätze bei gleichbleibender Qualität verarbeitet werden. Die üblichen Teilschritte wie: Filtrieren, Waschen und Entfeuchten erfolgen unmittelbar aufeinander (Schubert, 2002).

#### **Bandfilter**

Die Suspension wird auf ein Band gegeben, das den Filterkuchen kontinuierlich über die einzelnen Filtrationsstufen transportiert. Gewöhnlich wird das Filtrat durch ein Vakuum abgesaugt. Der Filter gleicht einem Transportband. Das Filtertuch kann vom Transportband abgenommen und gereinigt oder während des Umlaufs ausgewaschen werden. Zur Erhöhung der Trennwirkung kann ein mechanischer Pressvorgang integriert werden. In Abb. 6-9 ist eine Skizze für einen Bandfilter zu sehen.

In der Papier- und Zellstoffindustrie werden Bandfilter (Sack GmbH, Düsseldorf) zur Entwässerung des Faserbreies verwendet. Im Allgemeinen eignen sich Bandfilter für gut filtrierende Suspensionen mit größeren Feststoffpartikeln (Luckert, 2004).

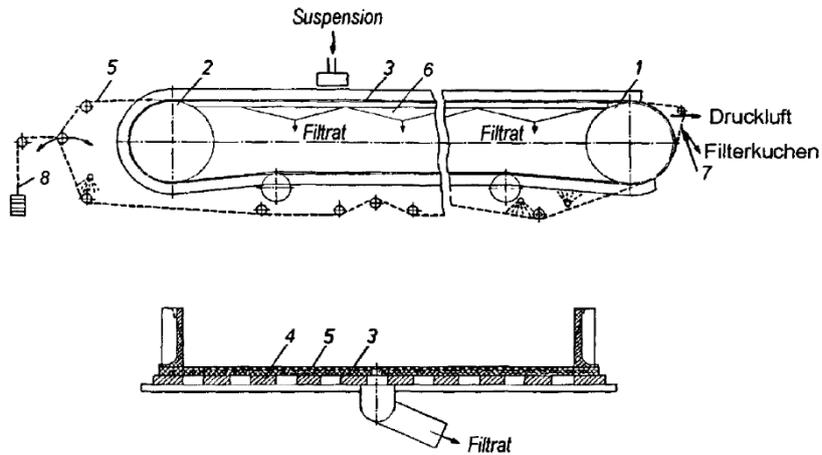


Abb. 6-9 – Skizze eines Bandfilters (Schubert, 2002)

### Trommelfilter

Der Trommelfilter ermöglicht einen kontinuierlichen Durchsatz an Filterkuchen und Filtrat. Die Trommelfilter werden hydrostatisch mit Vakuum oder Druck betrieben (Perry, 2008).

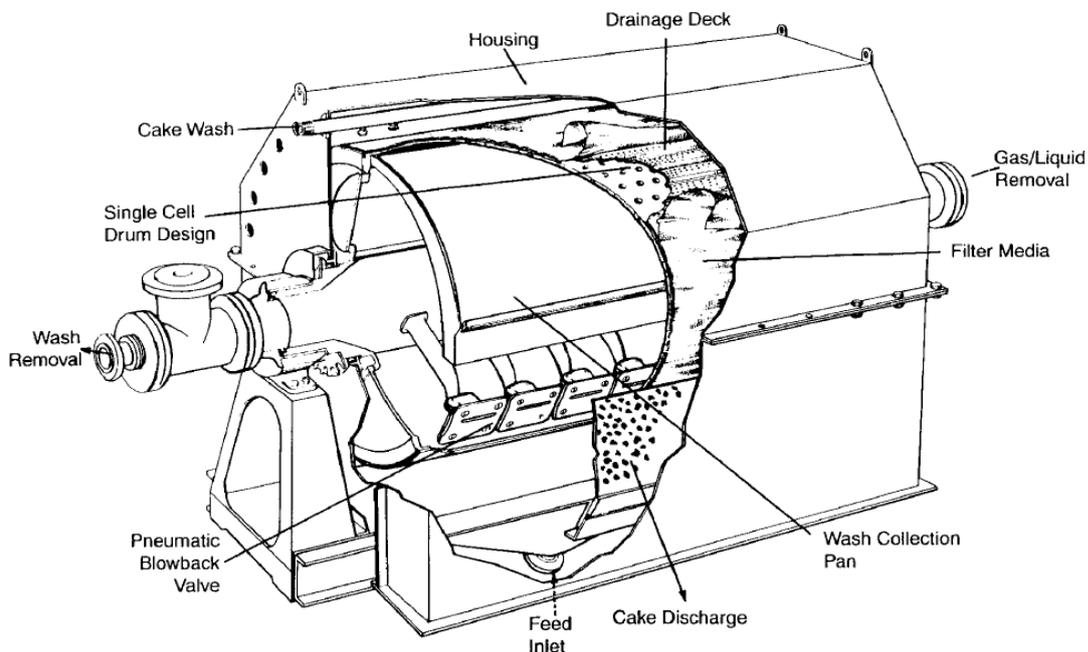


Abb. 6-10 – Skizze eines vakuumbetriebenen Trommelfilters (Perry, 2008)

Trommelfilter dienen meist der Filtration von grobkörnigen oder faserigen Gemischen. Man kann sie von innen nach außen oder umgekehrt beschicken. Beim innenbeschickten Filter fließt die Flüssigkeit über eine Ventilrinne auf die Innenseite des Siebmantels. Der durch die Schwerkraft abgetrennte Feststoff wandert bei der Drehung der Trommel nach oben, wo er sich ablöst und

z.B. mit einer Schnecke herausgefördert werden kann. Um eine vorzeitige Ablösung zu verhindern, werden in die Trommel Fangleisten eingebaut (Schubert, 2002).

Ein von außen beschickter Filter wird meist zur Reinigung von Rück- und Abwässern der Papier- und Zellstoffindustrie verwendet. Die Siebtrommel taucht fast vollständig in die Flüssigkeit ein. Während der Feststoff an dem Siebmantel zurückbleibt und bei faserigen Rückständen einen guten abnehmbaren Kuchen bildet, fließt das fast faserfreie Filtrat im untersten Teil der Trommel ab. Bei einem Trommeldurchmesser von 2 m kann je nach Umlaufgeschwindigkeit und Trommelbreite ein Durchsatz von 500-5000 l/min erreicht werden (Hersteller: Waco-Filter, Kraus-Maffei, München, Voith, Heidenheim) (Luckert, 2004).

### **Abpressen von Flüssigkeiten**

Beim Abpressen wird die Suspension in ein druckfestes Gehäuse gefüllt, dessen Wände aus Geweben oder perforierten Platten für die Flüssigkeit durchlässig sind, während der Feststoff zurückgehalten wird. Der abzupressende Feststoff muss leicht deformierbar sein und beim Verdichten flüssigkeitsdurchlässig bleiben. Natürliche Faserstoffe, wie z.B. Torf und Cellulose, werden wirtschaftlich in Pressen entwässert. Das Verfahren hat sich ebenfalls beim Abpressen von synthetischem Kautschuk bewährt.

Entsprechend dem Verhalten und den Resultaten beim Abpressen kann man drei Gruppen von Stoffen unterscheiden:

- a) hochelastische, poröse Stoffe, besonders Agglomerate aus weichen Primärteilchen mit starken interpartikulären Bindungen, z.B. synthetischer Kautschuk
- b) natürliche und synthetische faserige Produkte mit verhältnismäßig großen Flüssigkeitsanteilen, z.B. Früchte und Cellulose
- c) Schüttungen, deren Teilchen lockere und elastische Schlämme bilden, z.B. chemische Produkte und Abwasserschlämme.

Sehr gute Ergebnisse erreicht man bei Stoffen der Gruppe b (Luckert, 2004)

Apparate für ein kontinuierliches Abpressen einer Flüssigkeit sind die Siebbandpresse sowie die Schneckenpresse.

### **Siebbandpresse**

Das Pressgut wird meist auf ein Band aus monofilen, gezwirnten Metall-, Kunststoff-, oder Mischgeweben aufgegeben. Mit dem Siebband läuft ein durch Walzen angetriebenes Pressband, so dass das Pressgut zwischen zwei Bändern ausgepresst wird (vgl. Abb. 6-11). Die Maschenweite der Bänder ist meist größer als die Partikelgröße des Pressguts, damit die Öffnungen der Bänder nicht verstopft werden. Der Pressdruck der Presswalzen ist regelbar. In der Regel nimmt der Druck mit abnehmender Feuchtigkeit zu, da das Pressgut im Laufe des Flüssigkeitsentzuges dichter wird (Schubert, 2002).

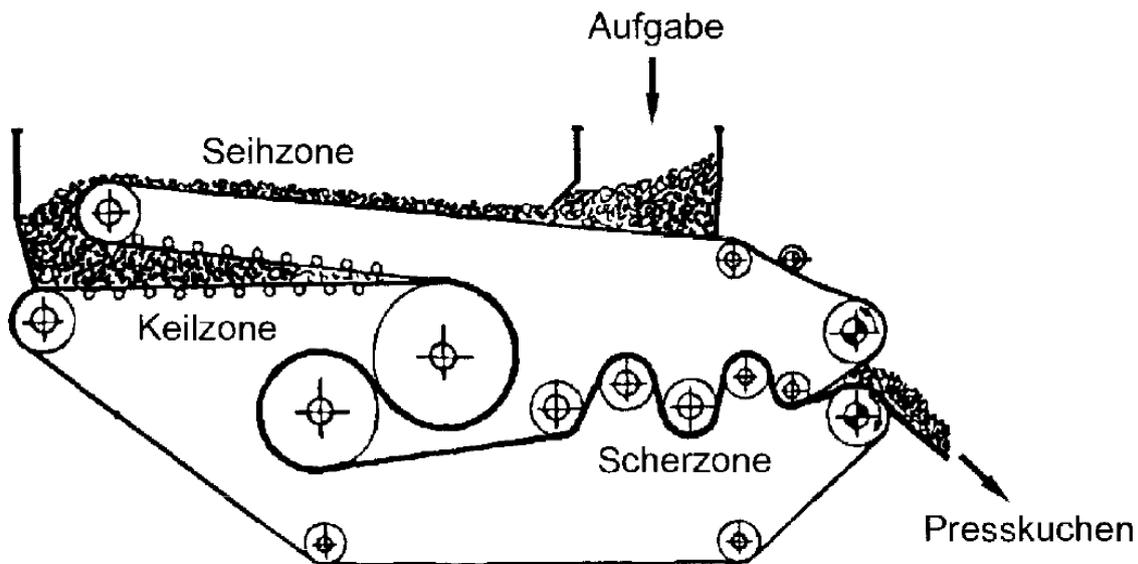


Abb. 6-11 – Skizze einer Siebbandpresse (Schubert, 2002)

Für die Entwässerung von Faserstoffen mit großen Flüssigkeitsmengen, wie sie bei der Papier- und Zellstoffindustrie vorkommen, wurde eine relativ einfache Presse entwickelt. Zwei konische Pressscheiben mit Lochplatten drehen sich mit 1 bis 6  $\text{min}^{-1}$  gleichsinnig und bilden durch entsprechende Neigung einen konischen Spalt, in den die Suspension hinein fließt. Die Scheiben ziehen den Feststoff ein und pressen die Flüssigkeit aus.

Beim Wasserentzug von Kochlaugen bei ca. 60 °C ist ein Durchsatz von beispielsweise 130 t/Tag möglich. Dabei werden Feststoffkonzentrationen bis zu 50 % erreicht (Luckert, 2004).

### Schneckenpresse

Eine weitere Entwicklungslinie der Pressen stellen die Schneckenpressen dar. Schneckenpressen können als Siebschneckenpressen, Vollmantelschneckenpressen oder Seiherschneckenpresse (vgl. Abb. 6-12) ausgeführt sein. Bei der Seiherschnecke wird die Mantelfläche anstelle von Lochsieben oder perforierten Wänden mit einem sogenannten Stabseiher belegt, der dem Wesen nach ein überlappendes Spaltsieb bildet. Die Schneckenpressen können ein- oder zweiwellig aufgebaut sein (Luckert, 2004).

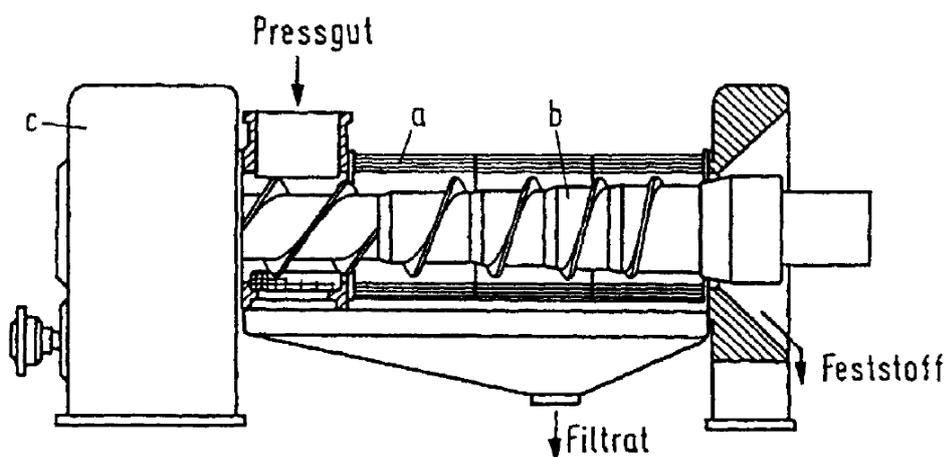


Abb. 6-12 – Skizze einer Schneckenpresse mit a) Seiher; b) Schnecke; c) Antrieb (Schubert, 2002)

## Zentrifugieren

Die Wirkung der Zentrifugen beruht auf dem Auftreten der Zentrifugalbeschleunigung und der damit verbundenen Massenkräfte, die eine Trennung der Gemischbestandteile nach ihrer Masse zur Folge haben. Ist die Zentrifugentrommel bzw. der Rotor als Vollwand ausgeführt, so kann die Flüssigphase nicht nach außen entweichen. Bei Flüssigkeitsgemischen tritt dann eine Schichtung in radialer Richtung ein (Separation) und bei Suspensionen eine Relativbewegung der Feststoffe radial nach außen (Sedimentation). Die Schleudertrommel kann als feinmaschiges Sieb oder Filter ausgelegt sein. In diesem Fall tritt die Flüssigkeit nach außen, während die Feststoffe zurückgehalten werden (Perry, 2008; Schubert, 2002).

## Dekantierzentrifugen

Ein Dekanter ist eine kontinuierlich arbeitende Zentrifuge zur Fest-Flüssig-Trennung. Mit dem Dekanter kann man klären, trennen, konzentrieren und klassieren. Der Dekanter hat eine Trommel, die mit hoher Drehzahl rotiert und über ein Einlaufrohr kontinuierlich eine Suspension eingeleitet wird. Der Feststoff sedimentiert infolge der Zentrifugalkraft. Die Flüssigkeit wird am Ende der zylindrischen Trommel abgezogen. In der Trommel ist eine Förderschnecke gelagert, die sich etwas schneller als die Trommel dreht, wodurch eine Differenzdrehzahl zur Trommel entsteht. Dadurch kann die Schnecke den sedimentierten Feststoff zu den Austrittsöffnungen transportieren, wo er ausgefördert wird (Schubert, 2002). In Abb. 6-13 ist eine Dekantierzentrifuge schematisch dargestellt.

Die Dekanter können mit Drehzahlen bis zu  $8.000 \text{ min}^{-1}$  betrieben werden. Dabei liegt die Schleudertziffer  $z$  bei über 4000. Heutzutage werden die Dekanter für die Abtrennung extrem schwer sedimentierbarer Feststoffe durch Beschleunigung von bis zu  $10000 \times g$  eingesetzt (Luckert, 2004).

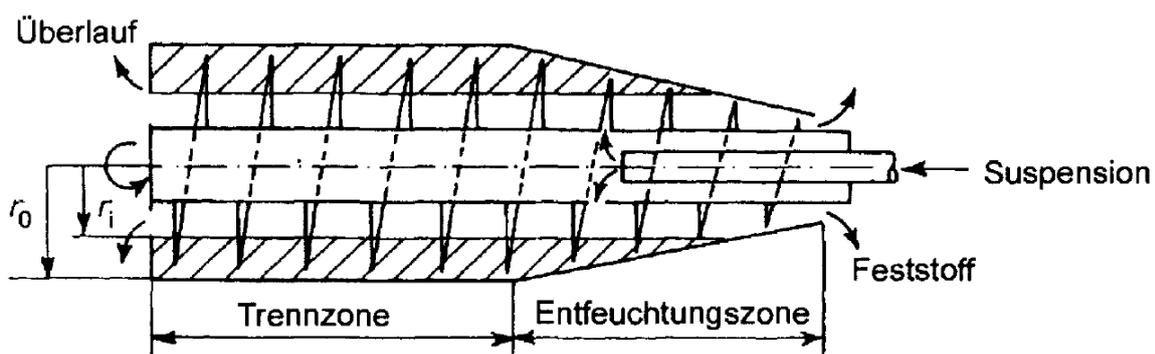


Abb. 6-13 – Schematische Darstellung einer Dekantierzentrifuge (Schubert, 2002)

## Separatoren

Die zahlenmäßig am häufigsten verwendeten Zentrifugentypen sind die Separatoren. Sie werden insbesondere in der Lebensmittelindustrie für die Entrahmung von Milch eingesetzt. Die Separatoren besitzen einen inneren Rotordurchmesser von 140 bis 800 mm. Es sind Drehzahlen zwischen  $3000$  und  $12000 \text{ min}^{-1}$  möglich (Luckert, 2004).

Einsatzziele:

- Aufarbeitung von stark kompaktierenden Feststoffen
- Vollständige Gewinnung des Feststoffs
- Feinstklärung von Suspensionen mit geringen Feststoffmengen

Die klassischste Bauweise ist der Tellerseparator als Zweiphasenseparator (vgl. Abb. 6-14). Es gibt ebenfalls Ausführungen als Dreiphasenseparatoren (Schubert, 2002).

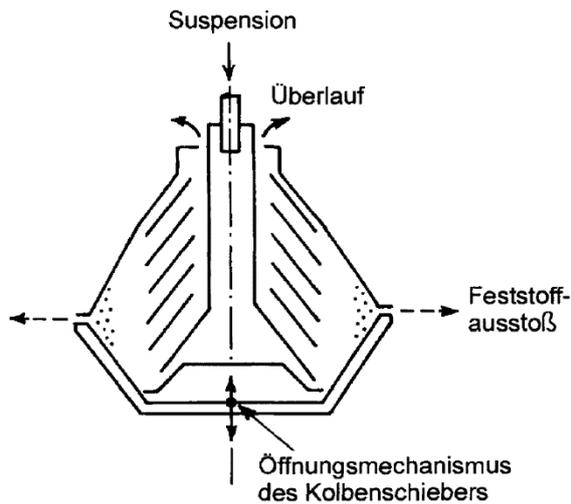


Abb. 6-14 – Prinzipskizze eines Zweiphasenseparators (Schubert, 2002)

Bei einer Drehzahl von  $4400 \text{ min}^{-1}$  wird eine maximale Zentrifugalbeschleunigung von  $7500 \text{ g}$  (bei  $160 \text{ m/s}$  Umfangsgeschwindigkeit) erreicht. Im Bereich der mittleren Tellerdurchmesser beträgt die Beschleunigung  $4900 \text{ g}$ , so dass sich eine äquivalente Klärfläche von  $270.000 \text{ m}^2$  ergibt. Der kontinuierliche Betrieb ist möglich, wenn Feststoffaustragungsrichtungen, wie z.B. Düsen oder Förderschnecken, integriert sind. Hauptanwendungsfälle sind die Regenerierung gebrauchter Öle, Lösungsmittel, die Aufbereitung von Milch, tierische Fette und Bienenwachs (Luckert, 2004).

### Trennen mit Hilfe eines Hydrozyklon

Da ein Hydrozyklon für die hohe Viskosität der Suspension ungeeignet ist, wird dieser nicht berücksichtigt.

## Bewertungsparameter

Die Parameter der Bewertungsmatrix sind in Tabelle 6-2 aufgelistet und kurz erläutert.

Parameter	Erläuterung
<b>Komplexität Design</b>	Anzahl der der auszulegenden Komponenten und Informationsvielfalt im Stand der Technik
<b>Vorhersagbarkeit</b>	Qualitative oder quantitative Aussage über den Zustand des Systems
<b>Technische Reife</b>	Entwicklungsstand der Systeme
<b>Energiebedarf</b>	Anfallende Energiekosten für den Betrieb
<b>Investitionsausgaben</b>	Anschaffungskosten
<b>Betreibbarkeit</b>	Sichere und bestimmungsgemäße Betreibbarkeit, Regelung und Überwachung
<b>Wartung und Instandhaltung</b>	Kosten für Wartung und Instandhaltung
<b>Temperierbarkeit</b>	Abschätzung des Aufwands für die Einstellung einer konstanten Temperatur

Tabelle 6-2 – Beschreibung der Bewertungsparameter

Für die Bewertung der Machbarkeit wurde jedem Apparat für jeden Parameter ein Wert zugeordnet (Skala: (negativ) 1,2,3,4,5 (positiv). Aus den Bewertungen der Teilnehmer wurden die Mittelwerte gebildet und eine Auswahl für einen Trennapparat getroffen. Das Ergebnis ist in Tabelle 6-3 dargestellt.

## Bewertungsmatrix

Parameter	Bewertung der Trennapparate für fest-flüssiger-Stoffgemische								
	Gewichtung	Bandfilter	Trommelfilter	Siebbandpresse	Schneckenpresse	Dekantierzentrifuge	Separator	Std abw	Mess- unsicherheit
Komplexität Design	0,05	3,3	3,6	3,6	2,9	3,5	2,9	0,3	0,2
Vorhersagbarkeit	0,05	3,0	3,4	3,3	2,1	3,4	3,6	0,5	0,3
Technische Reife	0,10	3,9	4,0	3,9	3,9	4,5	4,5	0,3	0,2
Energiebedarf	0,15	3,3	2,8	3,8	2,9	3,0	2,6	0,4	0,3
Investitionsausgaben	0,20	3,4	3,3	3,5	2,5	2,6	1,9	0,6	0,4
Betreibbarkeit	0,15	2,6	3,5	3,0	2,8	3,6	3,8	0,4	0,3
Wartung und Instandhaltung	0,05	3,0	3,0	2,8	2,5	3,6	3,3	0,4	0,2
Temperierbarkeit	0,25	1,9	2,9	1,3	4,0	4,6	4,1	1,2	0,8
Bewertung, gewichtet	1,0	2,9	3,2	2,9	3,1	3,7	3,3		
t-Faktor (8, 90%)	1,9								
Messunsicherheit +/-	0,3								

Tabelle 6-3 – Ergebnis der Bewertungsumfrage

Als Ergebnis der durchgeführten Umfrage wurde die Dekantierzentrifuge am besten bewertet. Der Separator und der Trommelfilter scheinen mögliche Alternativen darzustellen, allerdings sind zwischen der Dekantierzentrifuge und dem Separator deutliche Unterschiede bei den zu erwartenden Investitionsausgaben und in der Komplexität des Designs bezüglich des Engineerings zu erkennen. Beim Trommelfilter war die Temperierbarkeit der ausschlaggebende Grund dafür, dass er insgesamt schlechter bewertet wurde.

In den Versuchen zur Abscheidung der PET-Fasern in einer Laborzentrifuge der TH Köln wurde der Prozess für Schleuderziffern von 2000-4000 untersucht. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass deutlich größere Zentrifugalkräfte notwendig sind (Paulussen, 2019b). Bei der Betrachtung technischer Daten und Leistungsmerkmale typischer Sedimentationszentrifugen ist zu erkennen, dass eine typische Dekantierzentrifuge die Anforderungen einer hohen Zentrifugalbeschleunigung

beim benötigten Durchsatz der Flüssigkeit bzw. der Suspension von  $1,2 \text{ m}^3/\text{min}$  nicht erfüllt. Die Separatoren hingegen erfüllen diese Anforderungen (Perry, 2008). Sie sind nach der Dekantierzentrifuge am besten bewertet und werden daher für die Prozessentwicklung und Kostenschätzung als Apparat ausgewählt.

### **6.2.2.3 Aufbereitung der PET-Fasern**

Die PET-Fasern müssen nach Trennung von der Celluloselösung gewaschen werden, da diese mit dem Lösungsmittel und eventuell mit den Resten ungelöster Cellulose kontaminiert sind. Der Waschprozess kann im ersten Schritt mit NaOH (ca. 0,1 n, 60 °C) und im zweiten Schritt mit Umkehrosmosewasser (RO, 60 °C) erfolgen. Dafür wird ein Schneckenapparat (FIFO-Prinzip, Gegenstrom) in den Prozess integriert. Die Trennung der PET-Fasern vom Waschmedium erfolgt anschließend durch „Abschleudern“. Im letzten Aufbereitungsschritt können die PET-Fasern thermisch getrocknet und durch einen Extruder granuliert werden.

## 6.3 Verfahrensfliessbilder

Nachfolgend werden die Verfahrensfliessbilder für die einzelnen Teilanlagen des Recyclingprozess sowie des Amnioxidprozess dargestellt und beschrieben. Die Darstellung der Fließschemata erfolgt nach (DIN EN ISO 10628).

### 6.3.1 Teilanlage 10

In Abb. 6-15 ist das Verfahrensfliessbild für Teilanlage 10 dargestellt. Für die Anlieferung der ausschließlich weißen Mischgewebe mit jeweils 50 Gew.-% Baumwolle und PET wird angenommen, dass diese in Ballen geliefert und auf einer entsprechenden Fläche gelagert werden. Über Gabelstapler werden die Ballen auf die Zuführbänder A1001 aufgegeben und zu den Ballenöffnern A1002 gefördert. Nachdem die Ballen geöffnet wurden, erfolgt die Dosierung auf Bandwagen A1003 für die Faseröffner A1004. Mittels der Bandwaage A1005, werden die erhaltenen Mischfasern mit einem Durchsatz von 2,5 t/h und einer Faserlänge < 5mm dosiert und an die Teilanlage 20 überführt.

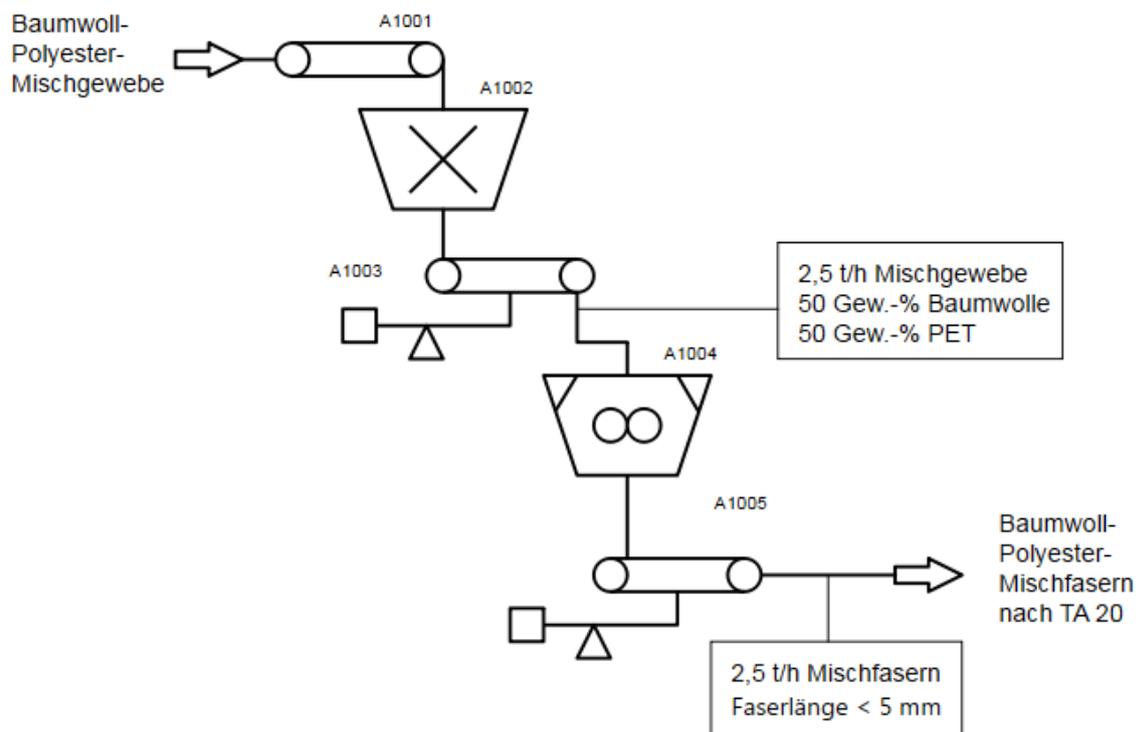


Abb. 6-15 - Verfahrensfliessbild für Teilanlage 10

Nr.	Symbol	Bezeichnung
1001	A	Zuführband
1002	A	Ballenöffner
1003	A	Bandwaage
1004	A	Faseröffner
1005	A	Bandwaage

Tabelle 6-4 – Apparateliste für Teilanlage 10

### 6.3.2 Teilanlage 20

Der Prozess der Teilanlage 20 (vgl. Abb. 6-16) beginnt mit der Zugabe der Mischgewebe und dem Lösungsmittel aus der Teilanlage 10 und Teilanlage 30 (Aminoxidprozess). Für 2,5 t/h Mischgewebe werden 81,25 t/h Lösungsmittel bereitgestellt. Das Lösungsmittel enthält 25 Gew.-% Wasser. Im Rührkessel (R2001) werden die Mischgewebe mit dem Lösungsmittel gemischt. Die Mischoperation läuft bei einer Temperatur von 80 °C und einem Druck von 150 mbar ab. Damit die Cellulose in Lösung übergeht ist eine Reduzierung des Wassergehalts notwendig. Dafür müssen ca. 5 t/h Wasser verdampft werden um den Wassergehalt auf unter 18 Gew.-% zu senken. Die Wärmeübertragung erfolgt in einem externen Wärmeüberträger (W2004). Die Pumpe (P2002 A/B) fördert die Lösung durch den Wärmeüberträger. Über eine Pumpe (P2005 A/B) und ein Tauchrohr wird dem Reaktor die Suspension, in der die PET-Fasern als disperse Phase vorliegen, kontinuierlich entnommen und dem Separator (S2007) zugeführt. Der Separator scheidet die PET-Fasern von der Celluloselösung ab. Eine nachgeschaltete Pumpe (P2008 A/B) fördert die erhaltene Celluloselösung mit 77,5 t/h nach Teilanlage 40. In Teilanlage 40 wird die Celluloselösung aus den Mischgeweben mit der Celluloselösung aus Holzstoffen gemischt nach dem Aminoxidverfahren weiterverarbeitet.

Das PET wird über eine Förderschnecke (A2010) in einen Waschbehälter (B2013) geleitet. Mit der Wäsche sollen Spuren des NMMO und der Cellulose vom PET entfernt werden. Das Waschmedium wird über eine Pumpe (P2011 A/B) zugeführt und durch einen Trommelfilter (F2014) von den PET Fasern getrennt. Anschließend wird das PET in einem Zentrifugaltrockner (T2017) getrocknet. Die Waschflüssigkeit wird über die Pumpe (P2015 A/B) in Teilanlage 50 überführt. Die Brüden werden über den Verdichter (V2018) abgezogen und gleichzeitig das Vakuum erzeugt.

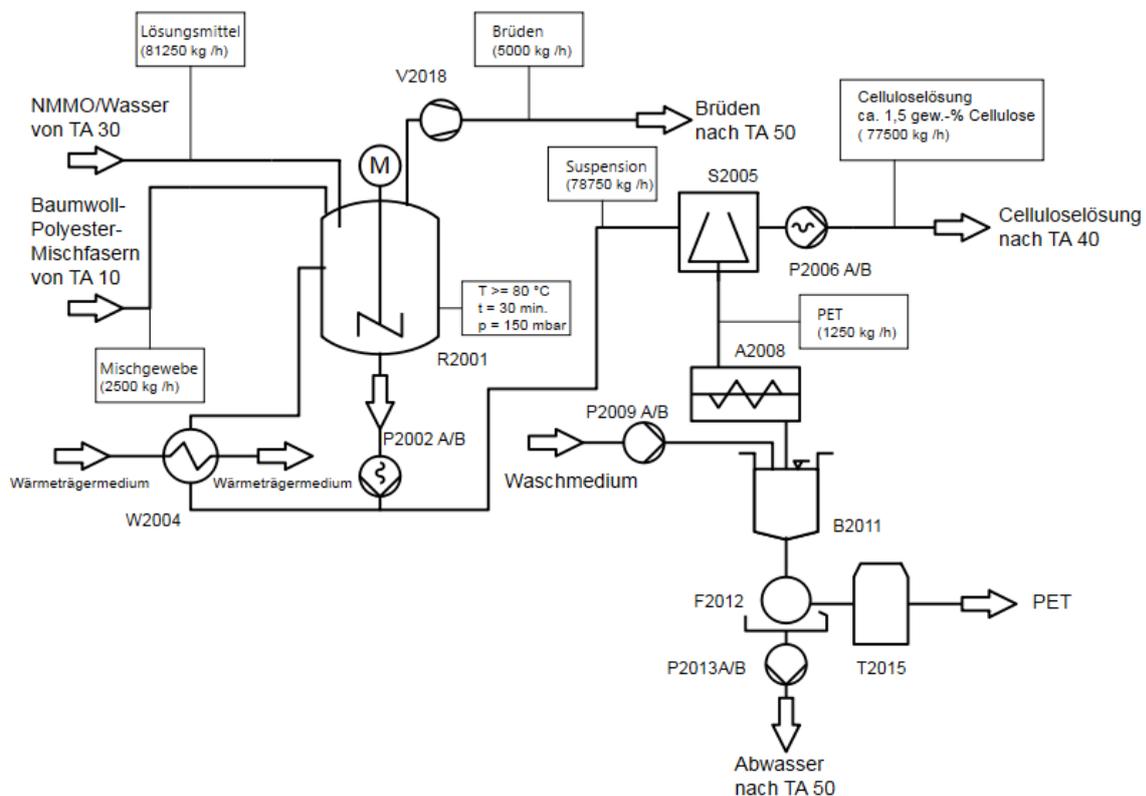


Abb. 6-16 – Verfahrensfliessbild für Teilanlage 20

Nr.	Symbol	Bezeichnung
2001	R	Rührkessel
2002	P	Exzentrerschneckenpumpe
2003	M	Motor
2004	W	Wärmeüberträger
2005	S	Zentrifuge
2006	P	Exzentrerschneckenpumpe
2007	M	Motor
2008	A	Förderschnecke
2009	P	Pumpe
2010	M	Motor
2011	B	offener Behälter
2012	F	Trommelfilter
2013	P	Pumpe
2014	M	Motor
2015	T	Trockner
2016	V	Verdichter

Tabelle 6-5 – Apparateliste für Teilanlage 20

### 6.3.3 Teilanlage 30

In Teilanlage 30 (vgl. Abb. 6-17) erfolgt die Vorbereitung der wässrigen NMMO-Lösung. Da das Lösungsmittel zu ca. 99 % zurückgewonnen werden kann, muss kontinuierlich NMMO zugeführt werden. Das Lösungsmittel wird als 50 %ige wässrige Lösung geliefert und im Behälter B3001 gelagert. Über die Pumpe P3002 wird das frische Lösungsmittel in den Behälter B3004 gefördert. Der Behälter B3004 dient als Pufferbehälter und wird ebenfalls mit dem Lösungsmittel aus der Aufbereitungsanlage (TA 50) gespeist. Durch die Pumpe P3005 wird der benötigte Lösungsmittelstrom durch den Wärmeüberträger W3007 gefördert und auf über 70 °C bei einem Druck von 3 bar vorgewärmt. Die Pumpe P3008 fördert bzw. dosiert das Lösungsmittel in den Verdampfer A3010. Im Verdampfer wird die wässrige Lösung bei über 80 °C und einem Druck von 150 mbar auf 75 % NMMO konzentriert. Durch das Verdampfen des Wassers werden Spuren des Lösungsmittels (100 ppm) entzogen. Die Brüden werden nach Teilanlage 50 für die Aufbereitung des Lösungsmittels überführt. Über die Pumpe P3011 wird Teilanlage 20 für die Lösung der Cellulose aus Mischgeweben gespeist. Die Pumpe P3013 speist den Hauptprozess mit Lösungsmittel.

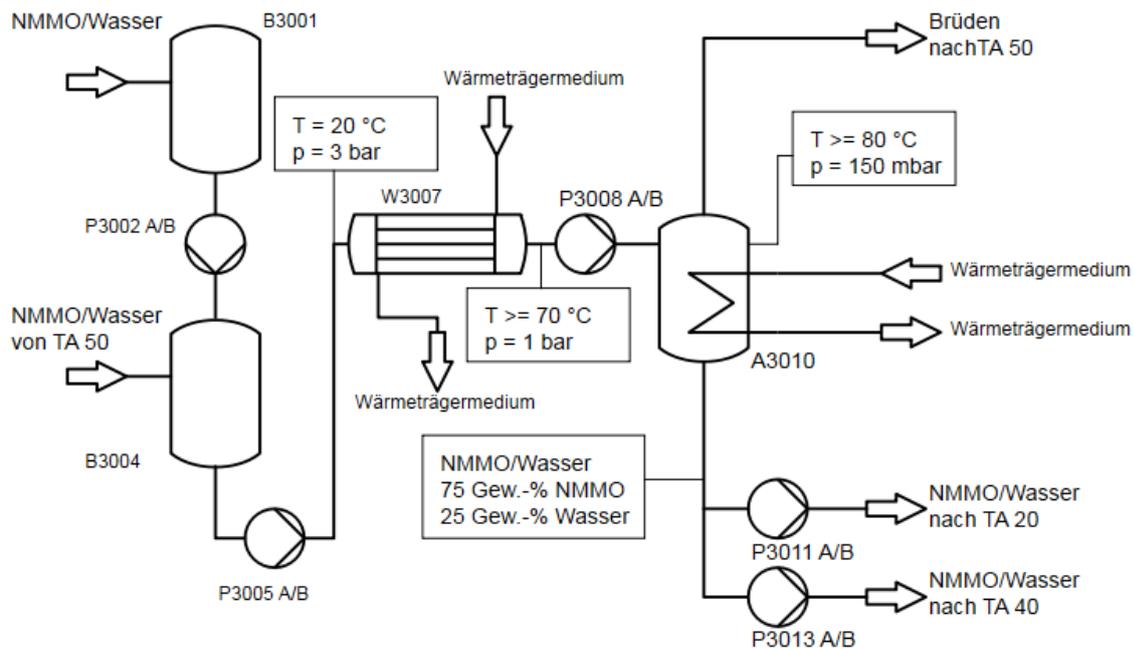


Abb. 6-17 - Verfahrensfließbild für Teilanlage 30

Anzahl	Nr.	Symbol	Bezeichnung
1	3001	B	Lagerbehälter
1	3002	P	Pumpe
1	3003	M	Motor
1	3004	B	Pufferbehälter
1	3005	P	Pumpe
1	3006	M	Motor
1	3007	W	Wärmeüberträger
1	3008	P	Pumpe
	3009	M	Motor
1	3010	A	Verdampfer
1	3011	P	Pumpe
	3012	M	Motor
1	2013	P	Pumpe
1	2014	M	Motor

Tabelle 6-6 – Apparateliste für Teilanlage 30

### 6.3.4 Teilanlage 40

In Teilanlage 40 (vgl. Abb. 6-18) wird die Celluslösung aus Teilanlage 30 zunächst mit dem Lösungsmittel aus Teilanlage 20 in einem statischen Mischer (A4001) gemischt. Anschließend wird die Lösung durch die Pumpe (P4002 A/B) in einen vertikalen Knetzer (A4004) gefördert. Der Knetzer homogenisiert die Mischung und ist beheizt, dadurch wird ein Teil des Wassers kontinuierlich abgezogen damit die Cellulose in die Lösung übergeht. Über die Pumpe (P4005 A/B) wird die Suspension in einen Filmtruder (A4007) überführt. Im Filmtruder wird der Wassergehalt weiter gesenkt und die Suspension homogenisiert, damit eine Spinnfähige Lösung mit ca. 12 -15 Gew.-%

Cellulose entsteht. Die Pumpe (P4008 A/B) überführt die Spinnmasse in den Extruder (A4010). Der Extruder presst die Spinnlösung durch eine Düse, wodurch die Spinnlösung zu Fasern geformt wird. Im Fällbad (B4011) wird die Cellulose ausgefällt und das Lösungsmittel ausgewaschen. Die Pumpe (P4012 A/B) fördert die Flüssigkeit aus dem Fällbad zur Lösungsmittelaufbereitung (Teilanlage 50).

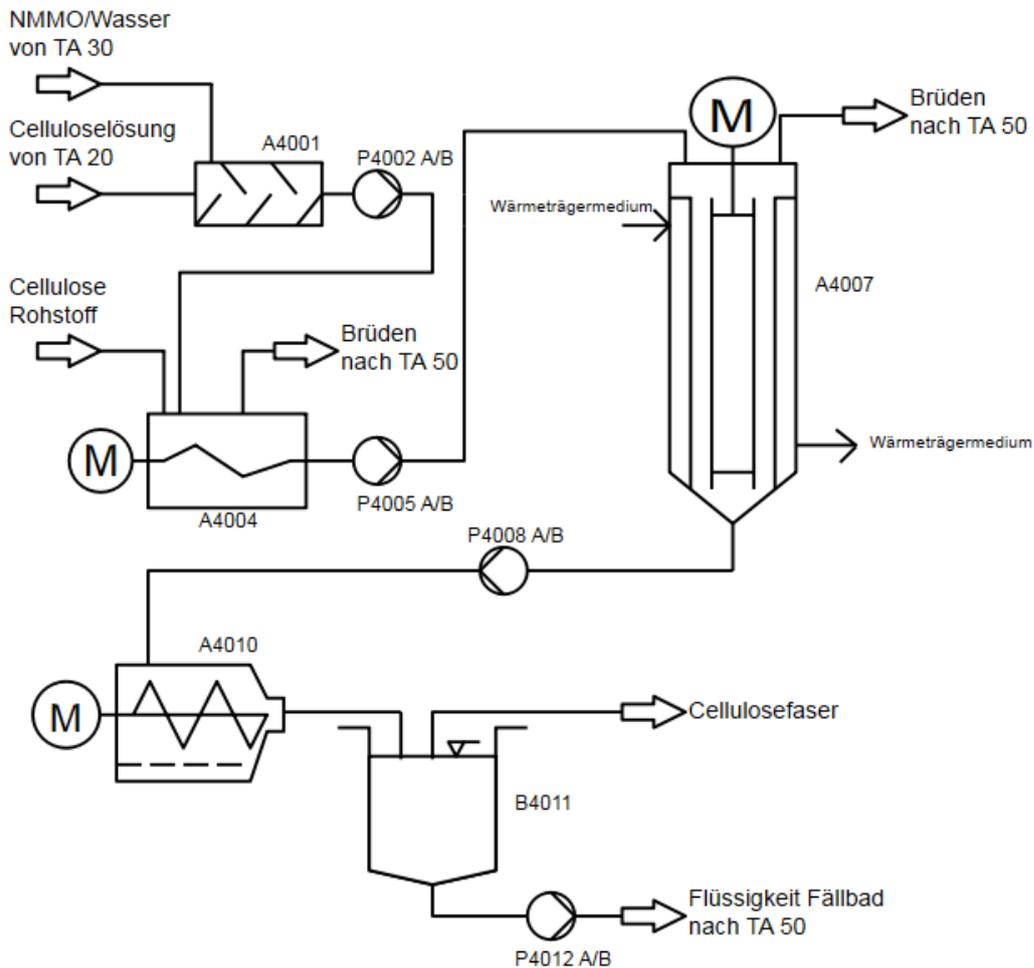


Abb. 6-18- - Verfahrensfliessbild für Teilanlage 40

Anzahl	Nr.	Symbol	Bezeichnung
1	4001	A	Mischer (statisch)
1	4002	P	Pumpe
1	4003	M	Motor
1	4004	A	Knetmischer
1	4005	P	Pumpe
1	4006	M	Motor
1	4007	A	Dünnschichtverdampfer
1	4008	P	Pumpe
1	4009	M	Motor
1	4010	A	Extruder mit Spindüse
1	4011	B	offener Behälter als Fällbad
1	4012	P	Pumpe
1	4013	M	Motor

Tabelle 6-7 – Apparatliste für Teilanlage 40

### 6.3.5 Teilanlage 50

Die Teilanlage 50 ist in Abb. 6-19 dargestellt und für die Aufbereitung des Lösungsmittels zuständig. Die Flüssigkeit aus dem Fällbad der Teilanlage 40 wird zunächst über die Pumpe (P5001 A/B) über einen Filter (F5003) geleitet, um Verunreinigungen und Abbauprodukte des Aminoxidverfahrens zu entfernen. Anschließend wird die Flüssigkeit mit den Brüdenkondensaten zusammengeführt. Die Brüden der Teilanlagen 30 und 40 werden durch den Wärmeüberträger (W5007) kondensiert und mittels der Pumpe (P5008) über einen statischen Mischer (A5006) mit der Fällbadflüssigkeit gemischt. Die Mischung wird in einen Behälter (B5010) überführt. Mit der Pumpe (P5011 A/B) und den Wärmeüberträger (W5013) wird die Flüssigkeit vorgewärmt. Im Anschluss wird die Flüssigkeit einem weiteren Filtrationsschritt unterzogen (P5014 A/B; F5016). Danach erfolgt die erste Konzentrierung über eine Umkehrosmoseanlage (Membranmodul A5021). Der notwendige Druck wird über die Pumpen (P5017 A/B) und (P5019 A/B) erzeugt. Die konzentrierte Flüssigkeit wird im Behälter (B5022) gesammelt. Danach wird die konzentrierte Flüssigkeit mittels einer Pumpe (P5023 A/B) durch Ionenaustauschersäulen (A5025) geleitet, um weitere unerwünschte Stoffe abzuscheiden. Neben NMMO enthält die Flüssigkeit N-Methylmorpholin, welches im Reaktor (C5026) unter Zugabe von Wasserstoffperoxid, wieder zu NMMO oxidiert wird. Im Verdampfer (A5027) wird die NMMO-Lösung für die weitere Lösungsmittelvorbereitung in Teilanlage 30 vorkonzentriert.

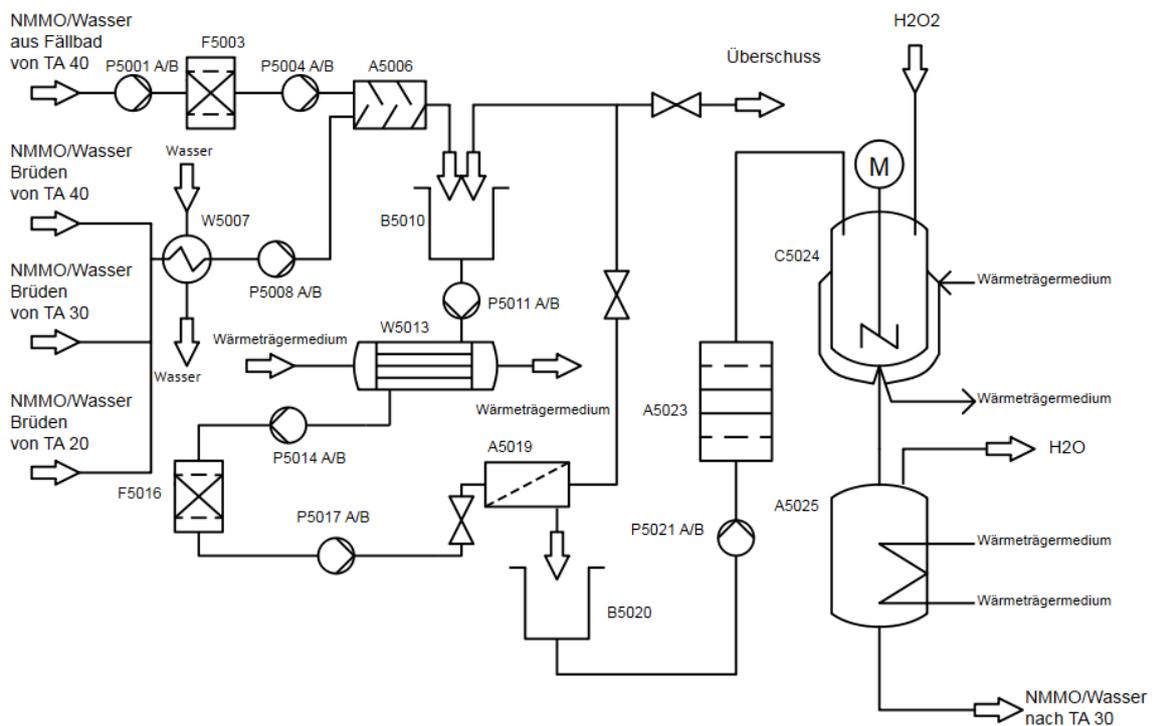


Abb. 6-19 – Verfahrensfließbild für Teilanlage 50

Anzahl	Nr.	Symbol	Bezeichnung
1	5001	P	Pumpe
1	5002	M	Motor
1	5003	F	Filter

1	5004	P	Pumpe
1	5005	M	Motor
1	5006	A	Mischer (statisch)
1	5007	W	Wärmeüberträger
1	5008	P	Pumpe
1	5009	M	Motor
1	5010	B	Behälter
1	5011	P	Pumpe
1	5012	M	Motor
1	5013	W	Wärmeüberträger
1	5014	P	Pumpe
1	5015	M	Motor
1	5016	F	Filter
1	5017	P	Pumpe
1	5018	M	Motor
1	5019	A	Membranmodul
1	5020	B	Behälter
1	5021	P	Pumpe
1	5022	M	Motor
1	5023	A	Ionenaustauscher
1	5024	C	Reaktor
1	5025	A	Verdampfer

# 7 Dimensionierung der Hauptausrüstungsgegenstände

---

Für die Kostenschätzung der Teilanlagen 10 und 20 bzw. den Recyclingprozess müssen die Hauptausrüstungsgegenstände dimensioniert werden. Die Dimensionierung wurde überschlägig mit den benötigten Kapazitäten und den dazugehörigen heuristischen Regeln und Normen durchgeführt (Perry, 2008; Christen, 2010; Lenz, 2015; DIN 28136-1). Teilweise wurden Annahmen getroffen die entsprechend gekennzeichnet sind.

Die Teilanlage 10 ist auf der Grundlage von Herstellerangaben abgeleitet und dimensioniert worden (Trützschler, 2017; DongYang AoLong Vlies Ausrüstung).

## 7.1 Teilanlage 10 – Vorbereitung der Mischgewebe

### A1001 – Förderband Mischgewebe

- Anzahl 3
- Annahme Anlieferung von Mischgewebe als Ballen
- Annahme Aufgabe der Ballen mittels Gabelstapler oder Greifer
- Förderkapazität 1000 kg/h
- Werkstoff CS (Trockenbereich)
- Abmessungen (Breite x Länge) 1200x5000

#### **Motor**

- Motortyp Explosionsschutz
- Spannung 400 V
- Leistung 2 kW
- Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

### A1002 – Ballenöffner

- Anzahl 3
- Kapazität 1000 kg/h
- Werkstoff CS (Trockenbereich)

#### **Motor**

- Motortyp Explosionsschutz
- Spannung 400 V
- Leistung 9 kW
- Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

### **A1003 – Bandwaage**

- Anzahl 3
- Kapazität 1000 kg/h
- Werkstoff CS (Trockenbereich)
- Abmessungen (Breite x Länge) 1200x5000

#### **Motor**

- Motortyp Explosionsschutz
- Spannung 400 V
- Leistung 2 kW
- Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

### **A1004 – Faseröffner**

- Anzahl 3
- Kapazität 1000 kg/h
- Werkstoff CS (Trockenbereich)

#### **Motor**

- Motortyp Explosionsschutz
- Spannung 400 V
- Leistung 11 kW
- Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

### **A1005 – Bandwaage**

- Anzahl 3
- Kapazität 1000 kg/h
- Werkstoff CS (Trockenbereich)
- Abmessungen (Breite x Länge) 1200x5000

#### **Motor**

- Motortyp Explosionsschutz
- Spannung 400 V
- Leistung 2 kW
- Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

## 7.2 Teilanlage 20 – Lösen der Cellulose und Abtrennen des PET

### A2001 –Rührkessel

- Annahme: vollständige Durchmischung, isotrop
- Betriebsweise: kontinuierlich
- Werkstoff AISI 316
- Betriebsdruck  $p_{abs} = 150$  mbar
- Rührertyp: Propellerrührer
- mittlere Verweilzeit: 1800 s
- Volumenstrom (Feed):  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$
- Rührkesselvolumen:  $40 \text{ m}^3$
- spez. Leistungseintrag ca.  $0,3 \text{ kW}/\text{m}^3$

#### Motor - Rührwerk

- Motortyp Explosionsschutz
- Spannung 400 V
- Leistung 12 kW (vgl. Kapitel 6.2.1.1)

### P2002 –Pumpe zur Förderung von Suspensionen

- Medium: Suspension (Celluloselösung/PET-Fasern)
- Pumpentyp: Exzentrerschneckenpumpe
- Volumenstrom  $75 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $80 \text{ °C}$
- Annahme Förderhöhe 20 m
- Werkstoff AISI 316
- Explosionsschutz
- Wirkungsgrad 65%

### M2003 –Motor für Pumpe P2002 zur Förderung von Suspensionen

- Motortyp Explosionsschutz
- Leistung 4,5 kW
- Drehzahl  $3600 \text{ min}^{-1}$  bei 50 Hz

### W2004 –Wärmeüberträger

- Annahme: mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_{log,m} = 20 \text{ K}$
- Annahme: Wärmedurchgangskoeffizient  $k = 285 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$
- zu übertragender Wärmestrom  $Q = 3200 \text{ kW}$
- wärmeübertragende Fläche  $560 \text{ m}^2$
- Heißdampf rohrrseitig
- Produkt mantelseitig
- Bauform: Rohrbündelwärmeüberträger
- Werkstoff AISI 316

### **P2005 –Pumpe zur Förderung von Suspensionen**

- Medium: Suspension (Celluloselösung/PET-Fasern)
- Pumpentyp: Exzentrerschneckenpumpe
- Volumenstrom 75 m<sup>3</sup>/h bei 80 °C
- Annahme Förderhöhe 20 m
- Werkstoff AISI 316
- Explosionsschutz
- Wirkungsgrad 65%

### **M2006 –Motor für Pumpe P2005 zur Förderung von Suspensionen**

- Motortyp Explosionsschutz
- Leistung 4,5 kW
- Drehzahl 3600 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

### **S2007 –Separator**

- Anzahl 2
- Volumenstrom 0,6 m<sup>3</sup>/min bei 80 °C
- Durchmesser 40 cm
- Drehzahl 6250 1/min (Perry, 2008)
- Zentrifugalbeschleunigung ca. 9000 g (Perry, 2008)
- temperierbar
- Werkstoff AISI 316
- typische Motorleistung 40 kW (Perry, 2008)

### **P2008 –Pumpe zur Förderung von Suspensionen**

- Anzahl 2 für je einen Separator
- Medium: Celluloselösung
- Pumpentyp: Exzentrerschneckenpumpe
- Volumenstrom 37,5 m<sup>3</sup>/h bei 80 °C
- Annahme Förderhöhe 20 m
- Werkstoff AISI 316
- Explosionsschutz
- Wirkungsgrad 65%

### **M2009 –Motoren für die Pumpen P2008**

- Motortyp Explosionsschutz
- Leistung 4,5 kW
- Drehzahl 3600 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

#### **A2010 –Förderschnecke für PET-Fasern**

- Massenstrom 1250 kg/h
- Annahme Schüttvolumen: PET-Granulat 850 kg/m<sup>3</sup>
- Volumenstrom 0,0004 m<sup>3</sup>/s
- Schneckendurchmesser 0,15 m
- Werkstoff AISI 316

#### **P2011 –Pumpe zur Förderung von Wasser**

- Medium: Wasser
- Pumpentyp: Zentrifugalpumpe
- Annahme: Volumenstrom 2 m<sup>3</sup>/h
- Annahme Förderhöhe 20 m
- Werkstoff AISI 316
- Explosionsschutz
- Wirkungsgrad 65%

#### **M2012 –Motor für die Pumpe P2011**

- Motortyp Explosionsschutz
- Leistung 4,5 kW
- Drehzahl 3600 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz

#### **B2013 –Behälter offen**

- Annahme Volumen 1 m<sup>3</sup>
- Werkstoff AISI 316

#### **F2014 –Trommelfilter**

- Annahme Filterfläche 1 m<sup>2</sup>
- Werkstoff AISI 316

#### **A2015 –Pumpe zur Förderung von Flüssigkeit aus Behälter B2010**

- Medium: Wasser mit NMMO und Cellulose
- Pumpentyp: Freistrompumpe
- Volumenstrom 2 m<sup>3</sup>/h bei 80 °C
- Annahme Förderhöhe 20 m
- Werkstoff AISI 316
- Explosionsschutz
- Wirkungsgrad 65%

### **M2016 –Motor für die Pumpe P2015**

- Motortyp Explosionsschutz
- Leistung 4,5 kW
- Drehzahl  $3600 \text{ min}^{-1}$  bei 50 Hz

### **T2017 –Trockner**

- Annahme Zentrifugaltrockner
- Material AISI 316

### **V2018 –Verdichter**

- Schraubenverdichter
- Volumenstrom  $6 \text{ m}^3/\text{h}$
- Material AISI 316
- Wirkungsgrad 0,75

#### **Motor**

- Motortyp Explosionsschutz
- Leistung 10 kW
- Drehzahl  $3600 \text{ min}^{-1}$  bei 50 Hz

# 8 Kostenschätzung der Recyclinganlage

---

Für eine Kostenschätzung der Recyclinganlage wurden die Kosten der Hauptausrüstungsgegenstände im Anhang B zusammengefasst. Die Kosten wurden auf Grundlage der Equipmentliste in Anhang A ermittelt.

Als Kostenquelle wurden die Internetquelle matche.com, das aktuelle Preisbuch der DACE (DACE, 2019) und Herstellerangaben (DongYang AoLong Vlies Ausrüstung; Trützschler, 2017)) verwendet. Falls für einen Apparat mehrere Preise herangezogen wurden, ist der Mittelwert in die Berechnungen eingeflossen. Für Apparate, deren Preis aufgrund abweichender Größendimensionen nicht beziffert war, wurde der Preis mittels des Kapazitätsverfahrens unter der Auswahl eines Degressionskoeffizienten bestimmt.

## 8.1 Kostenschätzung nach der modifizierten Hand-Methodik

Die Kostenschätzung erfolgt in dieser frühen Projektphase für die Teilanlagen 10 und Teilanlagen 20 separat nach der modifizierten Hand-Methode.

### 8.1.1 Teilanlage 10

Kosten für sonstige Ausrüstung				190.000 €
Zuschlag	Faktor	1,90	+	<u>170.000 €</u>
<b>Gesamtkosten</b>				<b>360.000 €</b>

### 8.1.2 Teilanlage 20

Kosten für Wärmeüberträger				200.000 €
Zuschlag	Faktor	2,60	+	<u>320.000 €</u>
<b>Zwischensumme I</b>				<b>520.000 €</b>
Kosten für Druckbehälter				225.000 €
Zuschlag	Faktor	2,60	+	<u>360.000 €</u>
<b>Zwischensumme II</b>				<b>1.110.000 €</b>

Kosten für Pumpen				70.000 €
Zuschlag	Faktor	3,00	+	<u>140.000 €</u>
<b>Zwischensumme III</b>				<b>1.320.000 €</b>
Kosten für Verdichter				5.000 €
Zuschlag	Faktor	2,30	+	<u>7.000 €</u>
<b>Zwischensumme IV</b>				<b>1.330.000 €</b>
Kosten für sonstige Ausrüstung				270.000 €
Zuschlag	Faktor	1,90	+	<u>240.000 €</u>
<b>Zwischensumme V</b>				<b>1.840.000 €</b>
<b>Gesamtkosten</b>				<b><u>1.840.000 €</u></b>

## 8.2 Kostenschätzung unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren

In diesem Kapitel wird die Kostenschätzung unter Berücksichtigung des Instrumentenfaktors  $F_i$  und des Gebädefaktors  $F_b$  sowie Anwendung der Gesamtkostengleichung nach Hand (Gl. 4-2) vorgenommen. Für die Korrekturfaktoren wurden folgende Werte aus Kapitel 4.2 gewählt:

- $F_i = 1,55$  Annahme einer aufwendigen Prozessleittechnik
- $F_b = 1,07$  Gebädefaktor Fest/Flüssig und bestehender Standort
- $F_p = 1,0$  Länderfaktor Deutschland

### 8.2.1 Teilanlage 10

<b>Gesamtkosten</b>				<b>360.000 €</b>
Korrektur	Faktor	1,66	+	<u>240.000 €</u>
<b>Gesamtkosten mit Korrekturfaktoren</b>				<b><u>600.000 €</u></b>

## 8.2.2 Teilanlage 20

<b>Gesamtkosten</b>			<b>1.840.000 €</b>
Korrektur	Faktor	1,66	+ 1.215.000 €
<b>Gesamtkosten mit Korrekturfaktoren</b>			<b>3.055.000 €</b>

## 8.2.3 Schätzung der Ingenieursstunden

Die Abschätzung der benötigten Ingenieursstunden erfolgt nach (Navarrete und Cole, 2001). Bei dem Berechnungsverfahren werden die Hauptausrüstungsgegenstände in Gruppen zusammengefasst, für die eine bestimmte Anzahl an Ingenieursstunden festgelegt wird. Für die Berechnung der Stunden wird auf eine Excel-Datei, der die Berechnungsmethoden nach Navarrete und Cole zu Grunde liegen, zurückgegriffen (Rieckmann, 2019a). Der Ausschnitt für die Ermittlung der Stunden ist in Tabelle 8-1 dargestellt.

Komplexität	Anzahl	Kürzel	Bezeichnung	Arbeitszeit / h								
				ProzessEng	ProzessEng total	M&C	M&C total	Design	Design total	E&V	E&V total	Summe total
1	0	W	Prozessofen	750	0	670	0	2.770	0	440	0	0
2	0	K	Reaktor, Bodenkolonne	390	0	440	0	1.710	0	240	0	0
3	2	B	Packungskolonne, Druckbehälter	270	540	190	380	960	1.920	140	280	3.120
4	5	B	Druckbehälter klein, Mühlen	160	800	110	550	550	2.750	80	400	4.500
5	2	W	Wärmeübertrager, Trockner	120	240	70	140	350	700	60	120	1.200
6	4	A	Rührer, Zentrifuge	60	240	40	160	240	960	40	160	1.520
7	10	P	Pumpen, E-Motor	20	200	50	500	140	1.400	20	200	2.300
8	0	A	statischer Mischer	10	0	10	0	30	0	10	0	0
Summe	23				2.020		1.730		7.730		1.160	12.640
										spez. Zeit h		550

Tabelle 8-1 – Mengengerüst der abgeschätzten Ingenieursstunden (Navarrete und Cole, 2001)

Nach Abschätzung der benötigten Stundenanzahl, werden die Stunden auf die Fachgewerke des Anlagenbaus aufgeteilt und unter Angabe der Stundensätze die Kosten für das Engineering ermittelt.

Kategorie	Anteil	Basiswert	angepasster Wert	Stundensatz / €	Kosten / €
<b>ProzEng - Prozess-Engineering</b>		<b>2.020</b>	<b>601</b>	<b>100</b>	<b>60.130</b>
<b>M&amp;C - Projektmanagement und Controlling</b>		<b>1.730</b>	<b>2.452</b>	<b>120</b>	<b>294.273</b>
Projektmanagement bezgl. Engineering	0,45	779	1.104		132.423
Schätzungen / Estimation	0,15	260	368		44.141
Kostenkontrolle / Cost Control	0,25	433	613		73.568
Terminierung / Scheduling	0,15	260	368		44.141
<b>Design - Konstruktion, Detailed Engineering</b>		<b>7.730</b>	<b>7.791</b>	<b>60</b>	<b>467.437</b>
	<b>Feststoffe</b>	<b>Fluide</b>			
Bau / Konstruktion / Bauingenieure	0,20	0,15	1.160	1.644	98.615
Elektrik	0,16	0,13	1.005	1.424	85.467
Instrumentierung	0,12	0,13	1.005	1.282	76.920
Verrohrung	0,18	0,35	2.706	920	55.225
Gebäude Equipment / Heizung/Lüftung/Klima / I	0,20	0,10	773	986	59.169
Verwaltung, Dokumentation, ...	0,14	0,14	1.082	1.534	92.041
<b>E&amp;V - Einkauf und Versand</b>		<b>1.160</b>	<b>1.644</b>	<b>60</b>	<b>98.658</b>
Beschaffung	0,65	754	1.069		64.128
Terminüberwachung	0,35	406	576		34.530
<b>Summe Kosten Engineering / €</b>		<b>12.640</b>	<b>12.489</b>	<b>74</b>	<b>920.499</b>
Kosten der Apparate und Maschinen / Equipment / €					<b>3.655.000</b>
Anteil Engineering / %					<b>25</b>
Anteil Engineering Zuschlagskalkulation nach Peters / Timmerhaus / West / %					<b>33</b>
Kosten Engineering Zuschlagskalkulation nach Peters / Timmerhaus / West / €					<b>1.206.150</b>
Vergleich Engineering Mengengerüst / Zuschlagskalkulation / %					<b>76</b>

Tabelle 8-2 – Kostenberechnung der abgeschätzten Ingenieursstunden (Navarrete und Cole, 2001)

Für die Kostenschätzung werden die Engineeringkosten als Zuschlag nach Peters et al. 2004 in die Kalkulation aufgenommen.

Die Engineeringkosten nach Navarrete et al. 2001 belaufen sich auf ca. 920.000 € und entsprechen ca. 25 % der Investitionsausgaben für die Apparate und Maschinen.

Die Engineeringkosten nach Peters et al. 2004 für die Zuschlagskalkulation belaufen sich auf ca. 1.205.000 €. Dies entspricht etwa einem Anteil von 33 % der Investitionsausgaben für die Apparate und Maschinen.

#### Investitionsausgaben Class 4 Kostenschätzung

-30 %	3.500.000 €
-	<b>5.000.000 €</b>
+50 %	7.500.000 €

### 8.3 Kostenstrukturen

Die Kostenschätzung erfolgte auf Grundlage der vorläufigen Verfahrensfließbilder und Equipmentlisten. In dieser frühen Projektphase ist es sinnvoll, die Kostenstruktur für die weitere Analyse und Entwicklung zu visualisieren. Dafür wird zunächst die Anzahl der Apparate und Maschinen einer Komponentengruppe, bezogen auf die Gesamtanzahl ermittelt. Anschließend wird der prozentuale Kostenanteil einer Komponentengruppe in Bezug zu den Gesamtkosten gesetzt.

Komponentengruppe	Anzahl	Anteil in [%] bezogen auf die Gesamtanzahl
Druckbehälter	2	6,7
Kolonnen		
Pumpen	6	20,0
Wärmeüberträger	1	3,3
Verdichter	1	3,3
Sonstige Ausrüstungsgegenstände	20	66,7

Tabelle 8-3 – Prozentualer Anteil der Komponentengruppen bezogen auf die Gesamtanzahl der Komponenten

Komponentengruppe	Anteil in [%] bezogen auf die Gesamtanzahl
Druckbehälter	26,6
Kolonnen	
Pumpen	9,5
Wärmeüberträger	23,6
Verdichter	0,5
Sonstige Ausrüstungsgegenstände	39,8

Tabelle 8-4 – Prozentualer Anteil der Kosten einer Komponentengruppe Bezogen auf die Gesamtkosten

Die Kosten der geschätzten Recyclinganlage, besitzt die in Abb. 8-1 aufgeführte Kostenstruktur

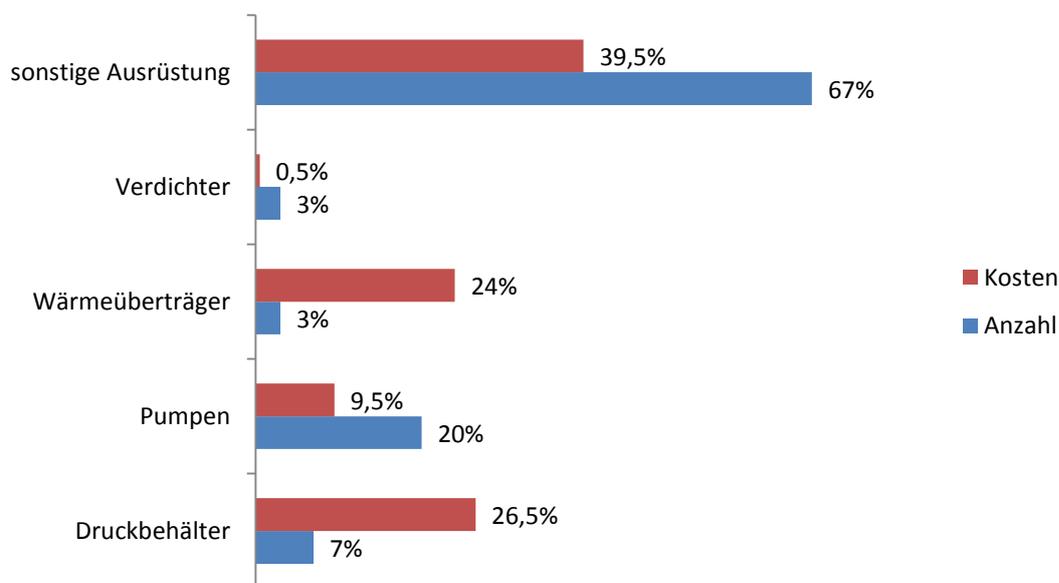


Abb. 8-1 – Kostenstruktur der Recyclinganlage

Die Kostenstruktur ist eher untypisch und entspricht nicht den Kostenstrukturen allgemeiner Chemieanlagen. Dies ist daran erkennbar, dass die Komponentengruppe für sonstige Ausrüstung einen großen Anteil an den Gesamtkosten hat. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Kosten für Druckbehälter und Wärmeüberträger, bezogen auf die Anzahl dieser Komponenten im Vergleich zur Gesamtanzahl aller Komponenten relativ hoch ist.

## 8.4 Schätzung der Herstellungskosten

In diesem Kapitel erfolgt die Schätzung der Produktionskosten der Teilanlagen 10 und 20. Um diese Kosten einordnen zu können, muss beachtet werden, dass dieser Prozess im Sinne des Recyclings für textile Mischgewebe noch nicht abgeschlossen ist, da am Ausgang der Teilanlage 20 lediglich getrennte Stoffströme für die Cellulose und das PET vorliegen. Für die Ermittlung der Konvertierungskosten eines ganzheitlichen Recyclings müssen die Kosten der weiteren Verarbeitungsschritte für die Stoffströme sowie die Vorbereitung des Lösungsmittels und die Aufbereitung berücksichtigt werden.

Die Schätzung der Herstellungskosten erfolgt für die festgelegte Produktionskapazität von 20.000 t/a (je 10.000 t/a für PET und Cellulose) bei 8000 h Betriebsstunden pro Jahr. Ebenfalls liegt dieser Schätzung die Massenbilanz des entwickelten Prozess zu Grunde.

### 8.4.1 Variable Kosten

Die variablen Kosten werden aus dem elektrischen und thermischen Energiebedarf sowie den Instandhaltungskosten ermittelt.

#### Stromkosten

Der elektrische Energiebedarf der Apparate auf Grundlage der festgelegten Dimensionierung beläuft sich auf ca. 210 kWh (vgl. Kapitel 7). Der Strompreis für Industrieabnehmer beträgt in Deutschland ca. 0,06 €/kWh (BDEW, 2019).

**elektrischer Energiebedarf** **210 kWh**

<b>spezifischer elektrischer Energiebedarf</b>				
Faktor	Produktionskapazität	2,5	t/h	<b>84 kWh/t</b>

**elektrischer Energiebedarf pro Jahr**

Faktor	Betriebsstunden	8.000	h/a	<b>1.680.000 kWh/a</b>
--------	-----------------	-------	-----	------------------------

**Energiekosten pro Jahr**

Faktor	Kostenfaktor	0,06	€/kWh	<b>100.000 €/a</b>
--------	--------------	------	-------	--------------------

<b>spezifische elektrische Energiekosten</b>				
Faktor	Produktionskapazität	20.000	t/a	<b>5 €/t</b>

## Dampfkosten

Für die Verdampfung des Wassers beim Lösungsprozess werden ca. 11,55 GJ/h Energie benötigt. Es wird angenommen, dass als Wärmeträger Dampf bei einem Druck von 2 bar und 121°C verwendet wird (Rieckmann, 2019).

Die notwendige Dampfmenge wird über die spezifische Wärmekapazität des Wassers bestimmt.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_{p,w} \cdot \Delta T \cdot \eta} = \frac{11,55 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{4,254 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 20 \text{ K} \cdot 0,85} = 159711 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 160 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

mit:

$\dot{Q} = 11,55 \text{ GJ}$  (vgl. Kapitel 6.2.1.2)

$c_{p,w} = 4254 \text{ J/kg/K}$  (VDI-Wärmeatlas, 2013)

$\Delta T = 20 \text{ K}$  (Annahme)

$\eta = 0,85$  (Wirkungsgrad Wärmeübertragung) (Dolder, 2019)

Es werden ca. 160 t/h Dampf benötigt. Der Richtpreis für den Dampf liegt bei ca. 30 €/t (Rieckmann, 2019).

<b>Energiebedarf (Dampf)</b>	<b>11,55 GJ/h</b>
------------------------------	-------------------

### Energiebedarf pro Jahr

Faktor	Betriebsstunden	8.000 h/a		<b>92.000 GJ/a</b>
--------	-----------------	-----------	--	--------------------

<b>spezifischer Energiebedarf</b>				
Faktor	Produktionskapazität	20.000 t/a		<b>4,6 GJ/t</b>

### Dampfbedarf

**160 t/h**

### Dampfbedarf pro Jahr

Faktor	Betriebsstunden	8.000 h/a		<b>1.280.000 t/a</b>
--------	-----------------	-----------	--	----------------------

### Dampfkosten pro Jahr

Faktor	Kostenfaktor	30 €/t		<b>38.400.000 €/a</b>
--------	--------------	--------	--	-----------------------

<b>Spezifische Dampfkosten</b>				
Faktor	Produktionskapazität	20.000 t/a		<b>1920 €/t</b>

## Wartung und Instandhaltung

Für die Schätzung der Wartungs- und Instandhaltungskosten, werden Kosten in Höhe von 6 % der fixen Investitionsausgaben veranschlagt (Rieckmann, 2019a).

**Investitionsausgaben** 5.000.000 €

### Wartung- und Instandhaltungskosten pro Jahr

Faktor 0,06 300.000 €/a

<b>Wartung- und Instandhaltungskosten pro Tonne Produkt</b>
---

Faktor	Produktionskapazität	20.000 t/a	15 €/t
--------	----------------------	------------	--------

## 8.4.2 Fixe Kosten

Für die fixen Kosten werden Abschreibungskosten, Personalkosten, Versicherungskosten und Steuern kalkuliert.

### Abschreibung

Für die Berechnung der Abschreibung, werden Kosten in Höhe von 10 % der Investitionsausgaben veranschlagt. Der Abschreibungszeitraum beträgt somit 10 Jahre (Rieckmann, 2019a).

**Investitionsausgaben** 5.000.000 €

### Abschreibungskosten pro Jahr

Faktor 0,06 500.000 €/a

<b>Abschreibungskosten pro Tonne Produkt</b>
--

Faktor	Produktionskapazität	20.000 t/a	25 €/t
--------	----------------------	------------	--------

## Personalkosten

Der Stundensatz für Arbeitnehmer in der Industrie beträgt in Deutschland ca. 40 €/h (Schröder, 2019)

### Geschätztes Personal pro Schicht

Teilanlage 10			Anzahl Arbeitnehmer
Rohstoffaufgabe			2
Anlagenbediener			1
Teilanlage 20			
Komponente	Anzahl	Faktor	
Trockner	1	0,5	0,5
Zentrifuge	2	0,25	0,5
Filter	1	0,25	0,25
Reaktor (Rührkessel, kontinuierlich)	1	0,5	0,5
Schichtleiter			1
<b>Gesamtanzahl Arbeitnehmer</b>			<b>6</b>

<b>Anzahl Arbeitnehmer</b>				<b>6</b>	-
<b>Personalkosten pro Stunde</b>					
Faktor	Stundensatz	40	€/h	<b>240</b>	<b>€/h</b>
<b>Personalkosten pro Jahr</b>					
Faktor	Betriebsstunden	8.000	h/a	<b>1.920.000</b>	<b>€/a</b>
<b>Personalkosten pro Tonne Produkt</b>					
Faktor	Produktionskapazität	20.000	t/a	<b>96</b>	<b>€/t</b>

## Versicherungskosten

Für die Kalkulation der Versicherungskosten, werden Kosten in Höhe von 1 % der fixen Investitionsausgaben veranschlagt (Rieckmann, 2019a).

<b>Investitionsausgaben</b>				<b>5.000.000</b>	<b>€</b>
<b>Versicherungskosten pro Jahr</b>					
Faktor	0,01			<b>50.000</b>	<b>€/a</b>
<b>Versicherungskosten pro Tonne Produkt</b>					
Faktor	Produktionskapazität	20.000	t/a	<b>2,5</b>	<b>€/t</b>

## Steuern

Für die Kalkulation der Steuern, werden Kosten in Höhe von 2 % der fixen Investitionsausgaben veranschlagt (Rieckmann, 2019a).

**Investitionsausgaben** 5.000.000 €

### Steuern pro Jahr

Faktor 0,02 100.000 €/a

<b>Steuern pro Tonne Produkt</b>
Faktor Produktionskapazität 20.000 t/a 5 €/t

## Summe der geschätzten Herstellungskosten

Die geschätzten Herstellungskosten belaufen sich auf ca. 2.080 €/t Produkt.

Bei der Trennung 1 t textiler Mischgewebe, würden auf Grundlage des entwickelten Prozesses und der berücksichtigten Kostenträger, Herstellungskosten in Höhe von etwa 2.080 € entstehen. Das aufbereitete PET-Granulat kann je nach Qualität einen Erlös von ca. 800 €/t auf dem Rohstoffmarkt erzielen.

# 9 Projektierung einer Technikumsanlage

Der Großteil der Produktionskosten entsteht durch die Prozesse der Teilanlage 20. Die Kosten für die thermische Energie, die beim Lösungsprozess benötigt wird, machen ca. 92 % der Produktionskosten aus. Diese Kosten entstehen im eingezeichneten roten Bilanzraum der Teilanlage 20 durch den Lösungsprozess (vgl. Abb. 9-1). Da die Trennleistung der Zentrifuge stark von dem Anteil gelöster Cellulose und der Viskosität der Lösung abhängig ist, muss der blaue Bilanzraum in Abhängigkeit vom roten Bilanzraum mit betrachtet werden.

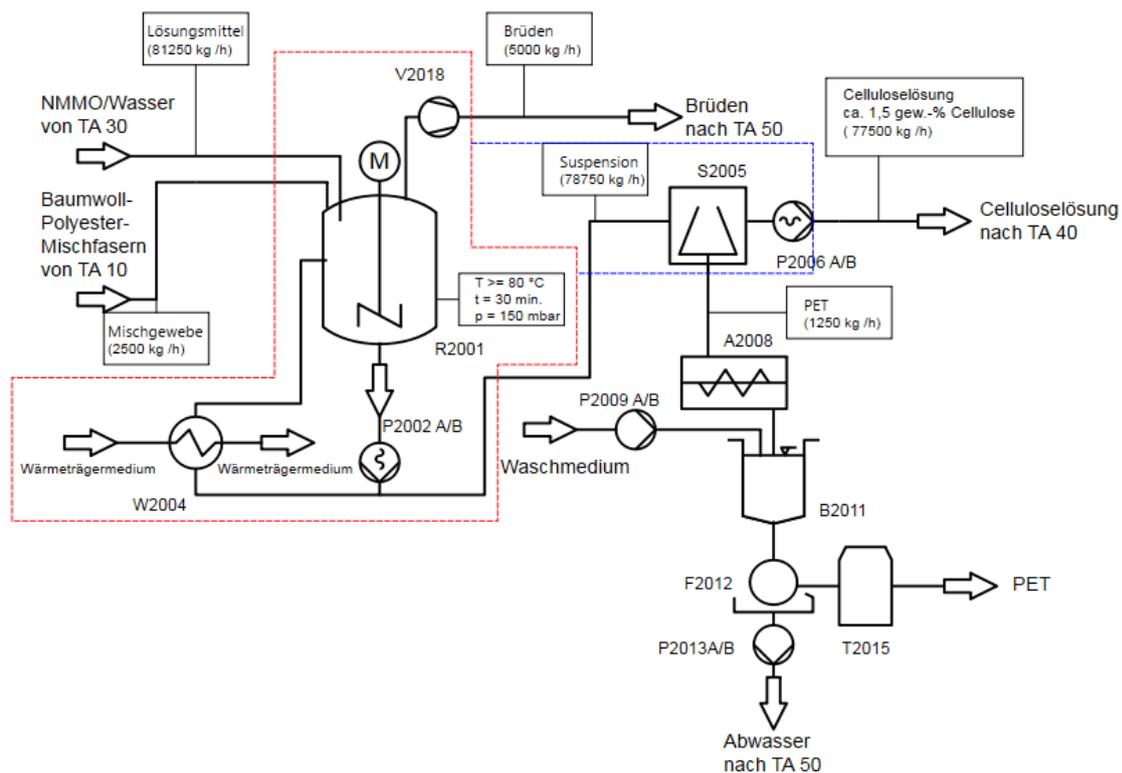


Abb. 9-1 – Verfahrensfliessbild der Teilanlage 20 mit eingezeichnetem Bilanzraum.

Daher ist es sinnvoll, für diese Teile des Prozesses eine Technikumsanlage zu entwickeln, damit der Prozess zunächst an dieser Stelle optimiert werden kann. Die Technikumsanlage könnte modular gestaltet und gebaut werden, damit diese mit der Weiterentwicklung des Recyclingprozesses in späteren Projektstadien um die weiteren Prozesse ergänzt werden kann.

## 9.1 Verfahrensfliessbild der Technikumsanlage

In Abb. 9-2 ist ein mögliches Verfahrensfliessbild für die Entwicklung einer Technikumsanlage dargestellt. Es beinhaltet die Grundoperationen:

- Zerkleinern
- Mischen und Lösen
- Trennen
- Wärmeübertragung

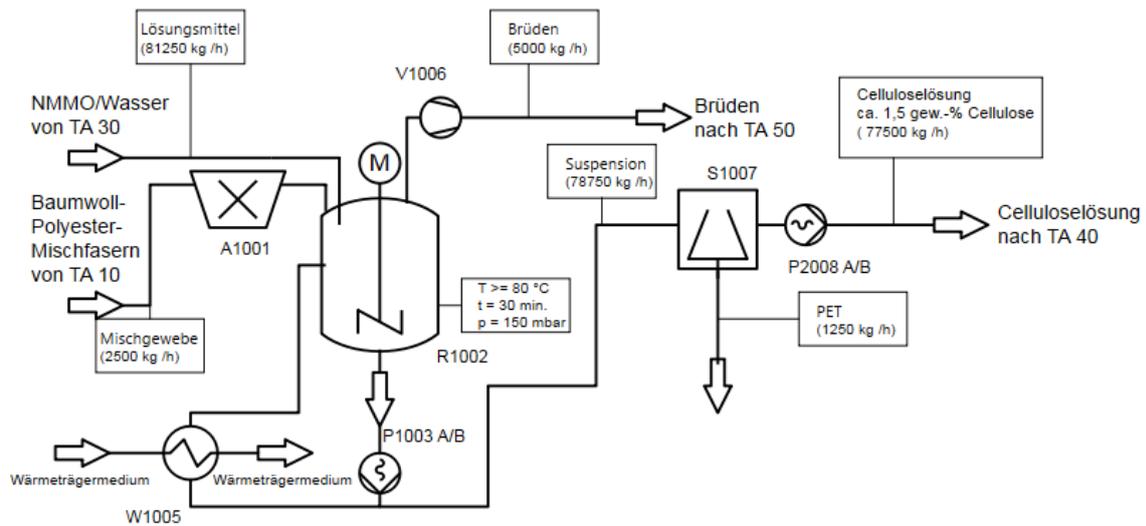


Abb. 9-2 – Verfahrensfießbild der Technikumsanlage abgeleitet aus Teilanlage 20

Mit dieser Technikumsanlage könnte der Prozess zunächst an den wichtigsten Stellen optimiert werden. Die Ziele der Optimierung sind:

- eine möglichst geringe Zerkleinerung der Fasern bei vollständiger Löslichkeit der Cellulose
- eine Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs für den Lösungsprozess durch Erhöhung der Cellulosekonzentration und/oder durch Lösen bei höherem Wassergehalt
- Untersuchung der maximalen Trennbarkeit in einer technischen Zentrifuge für unterschiedliche Systemzusammensetzungen der zu behandelnden Suspension

Die Anlage sollte für eine Kapazität von 1 kg/h Mischgewebe ausgelegt werden. Für diese Kapazität sollte die Technikumsanlage einen akzeptablen Maßstab der Produktionsanlage darstellen.

Nr.	Symbol	Bezeichnung
1001	A	Zerkleinerungsmühle
1002	R	Rührkessel
1003	P	Exzentrerschneckenpumpe
1004	M	Motor
1005	W	Wärmeüberträger
1006	V	Verdichter
1007	S	Zentrifuge
1008	P	Exzentrerschneckenpumpe
1009	M	Motor

# 10 Schlussfolgerung

---

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen Prozess zu entwickeln, um textile Mischgewebe aus Baumwolle und PET zu recyceln. Diese Arbeit liefert mit ihren Entwicklungen wichtige Erkenntnisse und gleichzeitig Herausforderungen, die es für ein ganzheitliches Textilrecycling zu bewältigen gilt. In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse und Herausforderungen für die Weiterentwicklung des Vorhabens zusammengefasst.

## **Bewertung der Prozesssynthese**

Aus den Grundlagen der Prozessentwicklung und deren Analyse wurde aufgezeigt, dass weiterer Forschungsaufwand notwendig ist, um Textilien unterschiedlicher Gütegrade und Farbstoffe chemisch zu recyceln. Der ausgelegte Prozess musste dahingehend limitiert werden, dass ausschließlich ungefärbte bzw. weiße Textilien mit jeweils 50 Gew.-% Baumwoll- und 50 Gew.-% PET-Anteil als Rohstoff dienen. Es wurden Vorschläge erarbeitet, wie der Prozess für diese Problematik in späteren Entwicklungsstadien erweitert werden kann. Die konstante Viskosität durch eine definierte Zusammensetzung des Rohstoffinputs ist besonders wichtig, da die Viskosität einer Celluloselösung exponentiell mit der Konzentration ansteigt.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass der selektive Lösungsprozess sowie die Abtrennung der PET-Fasern in großem Maße vom Zerkleinerungsgrad der Fasern abhängen. Auf Grundlage der Patentliteratur und den Erkenntnissen aus (Paulussen, 2019b) bezüglich des Lösungsvorgangs wurde für die Prozessentwicklung die Zielgröße für die Faserlänge auf 5 mm festgelegt. Der optimale Zerkleinerungsgrad der Fasern müsste im Zusammenhang mit Lösungs- und anschließenden Trennversuchen mittels einer Technikumsanlage und einer kontinuierlichen Betriebsweise genauer untersucht werden.

Für die Konzentration der Cellulose in der Lösung wurde die Zielgröße 1,5 Gew.-% formuliert, da bei dieser Konzentration eine gute Abtrennung der PET-Fasern in den Trennversuchen aus (Paulussen, 2019b) zu beobachten war. Die Untersuchung der Trennbarkeit in technischen Zentrifugen, mit größerer Trennleistung als die betrachtete Laborzentrifuge, würde neue Erkenntnisse liefern. Die Bestimmung der theoretischen Trennleistung nach Stokes für eine technische Zentrifuge und das betrachtete System ist nicht ratsam, da die Partikeln eine faserige Form aufweisen. Daher ist davon auszugehen, dass nur durch weitere Versuche genaue Erkenntnisse gewonnen werden können. Wenn die Trennbarkeit auch bei höher konzentrierten Celluloselösungen gegeben ist, würde sich der spezifische Energiebedarf reduzieren.

Die Machbarkeitsstudie hat ebenfalls gezeigt, dass ein Prozess für das chemische Recycling von textilen Mischgeweben, beim aktuellen Wissensstand alleinstehend nicht zu realisieren ist. Denn die Herstellung einer spinnfähigen Lösung unter Berücksichtigung der Abtrennung für die PET-Fasern ist wegen der hohen Viskosität nicht zu realisieren. Zusätzlich ist es fraglich, ob die Rohstoffmengen für eine Produktionskapazität von 100.000 t/a zu beschaffen sind.

Daher wurde als Ansatz die Integration des Recyclingprozess in einen industriell praktizierten Aminoxidprozess, in dem Cellulosefasern hergestellt werden, gewählt.

## **Bewertung der Prozessentwicklung**

Die Integration beginnt mit der Zufuhr des Lösungsmittels aus der Aminoxidanlage und endet mit der Übergabe der Celluloselösung an den Faserspinnprozess der Aminoxidanlage. Die Herstellung einer Cellulosefaser, die zu 100 % aus textilen Mischgeweben besteht, ist nach Erkenntnis der durchgeführten Machbarkeitsstudie wirtschaftlich nicht zu realisieren. Daher weicht der entwickelte Prozess von der Zielvorstellung, die zu Beginn dieser Arbeit formuliert wurde, in dieser Hinsicht ab. Durch Integration des Recyclingprozesses in den Aminoxidprozess wurde dennoch aufgezeigt, wie eine Cellulosefaser als Hybridfaser zwischen der Cellulose aus dem Recyclingprozess und aus dem Aminoxidprozess entstehen kann. Die Koppelung der Teilanlagen und die Mischbarkeit der Celluloselösung mit frischem Lösungsmittel und der Cellulose muss dahingehend weiter untersucht werden, ob dies ohne weitere Vorkehrungen möglich ist. Zusätzlich ist zu prüfen, ob das verbrauchte Lösungsmittel gleichermaßen in den Aufbereitungsanlagen des Aminoxidprozesses regeneriert werden kann.

Die Verfahren und Apparate des Prozesses wurden durch Recherche der Patent- und Fachliteratur sowie einer Umfrage am Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik ausgewählt. Die Prozesssimulation mit Chemcad stellte leider keine Alternative dar. Da für die Feststoffe aufgrund der faserigen Form keine Partikelgrößenverteilung vorlag. Darüber hinaus war das Lösungsmittel NMMO nicht als Stoffkomponente in Chemcad hinterlegt. Dies könnte darin begründet sein, dass die Datenbasis für NMMO in den Stoffdatenbanken unzureichend ist. Die Abschätzung der Stoffdaten mittels der Gruppenbeitragsmethode führte leider nicht zum Erfolg.

Daher wurde die Dimensionierung überschlägig mit den benötigten Kapazitäten und dazugehörigen heuristischen Regeln und Normen durchgeführt. Teilweise mussten Annahmen getroffen werden, weshalb von einer Beeinträchtigung der Genauigkeit bei der Dimensionierung auszugehen ist.

Die Auslegung des Rührkessels sowie der Zentrifuge stellte keine größeren Probleme dar, da der Prozess an dieser Stelle durch die Recherchen der Patent- und Fachliteratur und den Untersuchungen aus (Paulussen, 2019b) relativ gut erfasst wurde. Beispielsweise liegt die spezifische Leistung des Rührwerks in typischen Bereichen für solche Misch- bzw. Homogenisierungsprozesse.

Das gewonnene PET eignet sich in diesem Zustand womöglich nur für die Verarbeitung zu einem Regranulat niedriger Produktqualität. Diese These gilt es jedoch zu prüfen. Anschließend müssten an dieser Stelle des Prozesses die Entwicklungen ebenfalls vorangetrieben werden, damit aus dem PET wieder Fasern für die Textilindustrie entstehen können.

## **Bewertung der Kostenschätzung**

Die vorausgegangene Kostenschätzung der Recyclinganlage wurde mit der modifizierten Hand-Methode, in einer frühen Phase des Projekts zum Recycling textiler Mischgewebe durchgeführt. Es muss mit einer geringen Genauigkeit der Kostenschätzung gerechnet werden, da für die Dimensionierung der Apparate zum Teil diverse Annahmen getroffen werden mussten und die Anzahl der Apparate relativ gering war. Da nur für die Teilanlagen 10 und 20 eine Kostenschätzung durchgeführt wurde und davon auszugehen ist, dass keine Vergleichsanlage existiert, kann kein Richtpreis herangezogen werden. Es ist lediglich ein Vergleich mit den aktuellen Investitionssummen der Lenzing AG für den Bau einer neuen Aminoxidanlage. Die fixe Investitionssumme soll 400 Mio. € betragen für eine Produktionskapazität von 100.000 t/a.

Die Investitionsausgaben für die geschätzte Anlage belaufen sich auf 5 Mio. € bei einer auf die Cellulose bezogenen Produktionskapazität von 10.000 t/a. Aus den Verfahrensfliessbildern und Apparatelisten der weiteren Teilanlagen, die in der Kostenschätzung nicht berücksichtigt wurden lässt sich erkennen, wie komplex diese Anlagenteile sind. Um die geschätzten Investitionsausgaben in der Gesamtkostenstruktur einordnen zu können, müsste eine Kostenschätzung für das entwickelte Gesamtsystem erfolgen.

Bei den Produktionskosten fällt auf, dass die spezifischen Energiekosten durch den Lösungsprozess sehr hoch sind. Die Energieintegration wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet. Jedoch allein durch Analyse der einzelnen Verfahrensfliessbilder und des Gesamtprozess ist erkennbar, dass an vielen Stellen ein Wärmebedarf existiert. Gleichzeitig könnte die thermische Energie durch einen Brüdenverdichter innerhalb des Lösungsprozess zurückgewonnen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Brüden ca. 100 ppm NMMO enthalten, welches sich bei zu großen Temperaturen zersetzt.

Die Energieintegration muss bei späteren Entwicklungsstadien berücksichtigt werden. Unabhängig davon ist es von Vorteil, den spezifischen Energiebedarf des Lösungsprozesses zu analysieren und wenn möglich, durch eine andere Prozessführung zu reduzieren. Durch den Bau und Betrieb einer Technikumsanlage könnte dieser Kostenfaktor bestätigt oder korrigiert werden. Wenn sich der gelöste Celluloseanteil steigern lässt, würde sich der spezifische Energiebedarf reduzieren. Gleiches gilt für den Fall das die Cellulose durch Variation der Prozessparameter wie z.B. die Temperatur bei einem höheren Wassergehalt in Lösung übergeht, sodass weniger Wasser verdampft werden müsste.

Für eine genaue Schätzung der Herstellungskosten muss die Gesamtsituation bewertet werden. Die Kosten für die Aufbereitung des Lösungsmittels beispielsweise sind in den geschätzten Herstellungskosten nicht enthalten.

Für ein ganzheitliches Textilrecycling stellt die Vorbehandlung zur Entfernung der Additive und Farbstoffe ebenfalls einen relevanten Kostenträger dar. Darüber hinaus ist nicht davon auszugehen, dass das Mischungsverhältnis von 50 Gew.-% Baumwoll- bzw. Celluloseanteil konstant und repräsentativ ist. Schwankungen des Rohstoffmarktes in der Zusammensetzung sind zu erwarten. Für einen entwickelten betriebsfähigen Prozess müsste die Viskosität der Lösung durch ein regelungstechnisches Konzept möglichst konstant gehalten werden.

### **Technikumsanlage**

Zusammen mit dem entwickelten Prozess und den Erkenntnissen aus (Paulussen, 2019b) wurde eine Grundlage für die Projektierung und den Bau einer Technikumsanlage geschaffen. Mit der Technikumsanlage könnten folgende Fragen beantwortet werden:

- Lässt sich der spezifische Energiebedarf des Lösungsvorgangs reduzieren?
- Wie hoch darf die Konzentration der Cellulose maximal sein?
- Wie sieht der optimale Zerkleinerungsgrad aus?

Diese Fragen gilt es zunächst für die Weiterentwicklung des Recyclings textiler Mischgewebe zu beantworten.

# 11 Literaturverzeichnis

---

- BDEW (2019): Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. - Strompreisanalyse Juli 2019. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/media/documents/190723\\_BDEW-Strompreisanalyse\\_Juli-2019.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/190723_BDEW-Strompreisanalyse_Juli-2019.pdf).
- Björquist, S. (2017): Separation for regeneration. Dissertation. The Swedish School of Textiles University of Borås, Borås.
- Blachot, J. (1997): Rheological behavior of cellulose/monohydrate of n-methylmorpholine n-oxide solutions. Part 1: Liquid state. In: *Rheol Acta* (37), S. 107–114.
- Blass, E. (1997): Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse. Methoden, Zielsuche, Lösungssuche, Lösungsauswahl. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Chemische Technik / Verfahrenstechnik).
- Bode, A. (2007): Textilchemie - Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI). Hg. v. Fonds der Chemischen Industrie im Verband der. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/fonds/presse-und-infos/publikationen/detailpage-86.jsp?fsID=30793>.
- Bollmus, S. (2000): Biologische und technologische Eigenschaften von Buchenholz nach einer Modifizierung mit 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyleneurea (DMDHEU). Dissertation. Georg August Universität Göttingen, Göttingen.
- Brinks, G. (2016): Method for regenerating cellulose fibers from cellulose-containing textile. Angemeldet durch Stichting Saxion te Enschede am 01.02.2016. Veröffentlichungsnr: NL2016190B1.
- Brown, T. (2007): Engineering economics and economic design for process engineers. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Brunner, F. (2015): Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen. Zürich.
- Chavan, R. (2003): Developement and processing of lyocell. Indian Institute of Textile Technology. Bhiwani (Fibre & Textile Research, 29).
- Christen, D. (2010): Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Cibik, T. (2003): Untersuchungen am System NMMO/H<sub>2</sub>O/Cellulose. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Prozesswissenschaften.
- DACE (2019): DACE price booklet. Cost information for estimation and comparison. Edition 32.
- DIN 28136-1, 2005: DIN 28136-1.
- DIN EN ISO 10628, 2001: DIN EN ISO 10628.
- DIN EN ISO 16373-1, 2015: DIN EN ISO 16373-1.

- Dolder, M (2019): Wärmerückgewinnung. Online verfügbar unter <http://www.bosy-online.de/Raumluftechnik/Waermerueckgewinnung-WRG.htm>.
- DongYang AoLong Vlies Ausrüstung: DongYang AoLong Vlies Ausrüstung Co., Ltd. Online verfügbar unter <http://german.nonwovenfabricmakingmachine.com/aboutus.html>.
- Elander, M. (Hg.) (2016): Critical aspects in design for fiber-to-fiber recycling of textiles. IVL Swedish Environmental Research Institute. Stockholm: MISTRA.
- Firgo, H. (1995): PROCESS FOR THE PRODUCTION OF A CELLULOSE MODULED BODY. Angemeldet durch Lenzing AG am 06.06.1995. Anmeldenr: 483565. Veröffentlichungsnr: US 5601767.
- GESTIS-Stoffdatenbank (2019): GESTIS-Stoffdatenbank. Online verfügbar unter [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/029090.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/029090.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0), zuletzt geprüft am 15.07.2019.
- Gordon, S. (Hg.) (2007): Cotton. Science and technology. Textile Institute (Manchester, England). Cambridge: Woodhead (Woodhead Publishing in textiles), zuletzt geprüft am 08.03.2019.
- Gries, T. (2015): Textile Fertigungsverfahren. Eine Einführung. 2., überarb. u. erw. Aufl. München: Hanser.
- Hanemann, O. (2013): Verfahren zum Vorbehandeln von rückgewonnenen Baumwollfasern zur Verwendung bei der Herstellung von Formkörpern aus regenerierter Cellulose. Angemeldet durch Lenzing AG am 26.11.2013. Anmeldenr: A 905/2013. Veröffentlichungsnr: AT 515152 A1.
- Haslinger, S. (2016): SEPARATION AND UPCYCLING OF CELLULOSE-CONTAINING BLENDED WASTE. Angemeldet durch Aalto University Foundation SR am 20.12.2016. Veröffentlichungsnr: WO 2018/115584 A1.
- Haule, L. V. (2014): Investigation into the removal of an easy-care crosslinking agent from cotton and the subsequent regeneration of lyocell-type fibres. In: *Cellulose* (21), S. 2147–2156.
- Haule, L. V. (2016): Preparation and physical properties of regenerated cellulose fibres from cotton waste garments. In: *Journal of Cleaner Production* 112, S. 4445–4451.
- Haule, L. V. (2012): Surface and bulk chemical analysis of the durability of an easy care finish on cotton. In: *Cellulose* 19 (3), S. 1023–1030.
- Heinze (2005): Solvents applied in the field of cellulose chemistry: a mini review. Online verfügbar unter [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282005000200005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282005000200005&script=sci_arttext).
- Kalt, W. (1995): Process for the production of cellulose moulded bodies. Angemeldet durch Lenzing am 01.02.1995. Anmeldenr: 454320. Veröffentlichungsnr: US 5628941A.
- Kalt, W. (1997): PROCESS FOR PREPARATION OF AN AQUEOUS SOLUTION OF N-METHYMORPHOLIN-N-OXIDE. Angemeldet durch Lenzing AG am 01.07.1997. Anmeldenr: 97929010.3. Veröffentlichungsnr: EP 0874927.
- Korolkow, J. (2015): bvse - Studie "Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland". Hg. v. bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. RWTH Aachen Institut für Aufbereitung und Recycling. Online verfügbar unter

<https://www.bvse.de/recycling/recycling-publikationen/weitere-leitfaeden-und-broschueren/1265-studie-textil.html>.

Kursaw, A. (2016): Misch- und Rührtechnik. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter [https://w3.siemens.com/mcms/engineering-consulting/Documents/Flyer\\_de/Misch\\_Ruehrtechnik.pdf](https://w3.siemens.com/mcms/engineering-consulting/Documents/Flyer_de/Misch_Ruehrtechnik.pdf).

Lenz, K. (2015): Musteranlage zur Schätzung der fixen Investition in frühen Projektphasen. Masterarbeit. Technische Hochschule Köln, Köln. Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik.

Liu, R. (2001): An Analysis of Lyocell Fiber Formation as a Melt-spinning Process. In: *Cellulose* 8 (1), S. 13–21.

Luckert, K. (2004): Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung. Essen: Vulkan-Verl.

McIntyre, J. E. (Hg.) (2005): Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin. Woodhead Publishing Limited. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited.

Müller, S. (2004): Möglichkeiten der Verwendung von flüssigem Ammoniak bei der Herstellung und Aktivierung von Chemiezellstoff. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Textil- und Faserchemie.

Navard, P. (Hg.) (2012): The European polysaccharide network of excellence (EPNOE). Research initiatives and results. Wien, New York: Springer.

Navarrete, P. (2001): Planning, Estimating, and Control of Chemical Construction Projects, Second Edition. 2nd ed. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC (Cost Engineering Ser).

Nellemann, C. (2009): The environmental food crisis. The environment's role in averting future food crises a UNEP rapid response assessment. Arendal Norway: UNEP.

Palme, A. (2017): Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics. In: *Text Cloth Sustain* (1), S. 53.

Paulussen, R. (2019a): Trennung von Mischgeweben aus Baumwolle und PET. Projektstudienarbeit. Technische Hochschule Köln, Köln. Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik.

Paulussen, R. (2019b): Recycling von Mischgeweben aus Baumwolle und PET - Experimente zur Ermittlung relevanter Prozessparameter und Prozessentwicklung. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Köln, Köln. Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik.

Perry, R. (2008): Perry's chemical engineers' handbook. 8th ed. New York: McGraw-Hill.

Peters (2004): Strukturuntersuchungen an Cellulose und Cellulosederivaten aus ionischen Lösemitteln. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg.

Peters, M. (2004): Plant design and economics for chemical engineers 5. Aufl. McGraw-Hill (McGraw-Hill chemical engineering series).

Peterson, A. (2015): Towards Recycling of Textile Fibers Separation and Characterization of Textile Fibers and Blends. Masterthesis. Calmers University of Technology, Götheburg.

Pillichshammer, J. (2015): HIGH-CONCENTRATION MIXER FOR PRODUCING A CELLULOSE SUSPENSION HAVING A HIGH CELLULOSE CONCENTRATION. Angemeldet durch Lenzing AG am 30.10.2015.

Pinkert, A. (2010): Reflections on the Solubility of Cellulose. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 49 (22), S. 11121–11130.

Rauch, W. (2017): Weltproduktion von Fasern. Industrievereinigung Chemiefaser e.V. Online verfügbar unter [http://213.83.8.8/live/index.php?page\\_id=43](http://213.83.8.8/live/index.php?page_id=43), zuletzt geprüft am 15.06.2019.

Rieckmann, T. (2013): VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR DEKONTAMINATION VON KUNSTSTOFFFLAKES - European Patent Office - EP 1861455 B2 am 12.06.2013. Veröffentlichungsnr: EP 2784110 B1.

Rieckmann, T. (2019a): Skript Kostenmanagement SS2019. Skript. Technische Hochschule Köln, Köln. Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik.

Rieckmann, T. (2019b): Skript: Wärmeübertrager 2019.

Rosenau, T. (Hg.) (2019): Cellulose science and technology. Chemistry, analysis, and applications. Hoboken, NJ: Wiley.

Sandin, G. (2018): Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. In: *Journal of Cleaner Production* 184, S. 353–365.

Sayed, A. (2019): A critical review of manufacturing processes used in regenerated cellulosic fibres. Viscose, cellulose acetate, cuprammonium, LiCl/DMAc, ionic liquids, and NMMO based lyocell. In: *Cellulose* 29 (4), S. 675.

Schneider, P. (2019a): Entwicklung eines Prozesses zum Recycling von Textilien mit hohen Anteilen an Polyethylen-terephthalat. Projektstudienarbeit. Technische Hochschule Köln, Köln. Institut für Anlagen- und Verfahrenstechnik.

Schneider, P. (2019b): Lyocell-Fasern aus der Cellulose von Textilabfällen. Projektstudienarbeit. Technische Hochschule Köln, Köln. Institut für Anlagen- und Verfahrenstechnik.

Schröder, C. (2019): Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich (43), S. 42–44. Online verfügbar unter [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2016/296545/IW-Trends\\_2016-03-03\\_industrielle\\_Arbeitskosten.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2016/296545/IW-Trends_2016-03-03_industrielle_Arbeitskosten.pdf), zuletzt geprüft am 05.09.2019.

Schubert, H. (2002): Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik. Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Zerteilen, Agglomerieren, Trennen, Mischen, Schüttgut. Weinheim: Wiley-VCH.

Sixta, H. (2006): Handbook of pulp. Weinheim, Chichester: Wiley-VCH; John Wiley distributor].

Stieß, M. (1997): Mechanische Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).

Sun, N. (2010): DISSOLUTION AND PROCESSING OF CELLULOSIC MATERIALS WITH IONIC LIQUIDS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. Dissertation. The University of Alabama, Tuscalossa.

Trützscher (2017): Trützscher GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.truetzschler-nonwovens.de/produkte/faservorbereitung/detaillierte-informationen/ballenoeffnung/>, zuletzt aktualisiert am 10.01.2017, zuletzt geprüft am 30.08.2019.

UBA (2013): Einsatz von Nanomaterialien in Textilien, zuletzt geprüft am 12.11.2018.

United Nations (2017): United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision, custom data acquired via website. Hg. v. United Nations. United Nations. Online verfügbar unter <https://population.un.org/wpp/DataQuery/>, zuletzt geprüft am 07.03.2019.

VDI-Wärmeatlas (2013): VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch), zuletzt geprüft am 03.09.2019.

Walker (2013): PROCESS FOR EXTRACTING POLYESTER FROM AN ARTICLE. Veröffentlichungsnr: WO 2014/045062 A1.

West, S. (1995): IMPROVED POLY ETHYLENE TEREPHTHALATE DECONTAMINATION - European Patent Office - EP 0641366 B1 am 08.03.1995.

Woodings, C. (Hg.) (2001): Regenerated cellulose fibres. Textile Institute. Boca Raton, Cambridge, England: CRC Press; Woodhead (Woodhead Publishing series in textiles, 18), zuletzt geprüft am 17.06.2019.

Zikeli, S. (1989): Verfahren zur Herstellung von Lösungen von Cellulose sowie Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens - European Patent Office -. Angemeldet durch Lenzing AG am 07.08.1989. Anmeldenr: 89890209.3. Veröffentlichungsnr: EP 0356419 A2.

Zikeli, S. (1993): PROCESS FOR MANUFACTURING CELLULOSE MOULDED BODIES AND A DEVICE FOR CARRYING IT OUT. Angemeldet durch Lenzing AG am 17.03.1993. Veröffentlichungsnr: WO 93/19230.

Zikeli, S. (1995): Cellulose Suspension Production Process. Angemeldet durch Lenzing AG am 23.05.1995. Veröffentlichungsnr: WO 96/33221.

# Anhang

---

Dieser Arbeit sind die nachfolgenden Dokumente angehängt:

- Anhang A – Equipment-Liste der Teilanlage 10 und Teilanlage 20
- Anhang B – Equipment-Liste der Teilanlage 10 und Teilanlage 20 mit Preisberechnung

Anzahl	Nr.	Symbol	Bezeichnung	Technische Daten I	Technische Daten II	Werkstoff	V [m <sup>3</sup> ]	d [m]	F [m <sup>3</sup> /h]	T [°C]	p [bar]
3	1001	A	Förderband	1000 kg/h	2 kWh	CS					
3	1002	A	Ballenöffner	1000 kg/h	9 kWh	CS					
3	1003	A	Bandwaage	1000 kg/h	2 kWh	CS					
3	1004	A	Faseröffner	1000 kg/h	11 kWh	CS					
3	1003	A	Bandwaage	1000 kg/h	2 kWh	CS					
1	2001	R	Rührkessel	Mantel	Doppelwellenrührwerk	AISI 316	40	3,2	72	80	0,15
1	2002	P	Pumpe	Exzenterschnecke	n = 65 %	AISI 316					
1	2003	M	Motor	Explosionsgeschützt	3600 RPM	AISI 316					
1	2004	W	Wärmeüberträger	A = 500 m <sup>2</sup>		AISI 316					
2	2005	P	Pumpe	Exzenterschnecke	n = 65 %	AISI 316					
2	2006	M	Motor	Explosionsgeschützt	3600 RPM	AISI 316					
2	2007	S	Separator	temperierbar	6250 RPM	AISI 316		0,4	36	80	
1	2008	P	Pumpe	Exzenterschnecke	n = 65 %	AISI 316					
1	2009	M	Motor	Explosionsgeschützt	3600 RPM	AISI 316					
1	2010	A	Förderschnecke	1250 kg/h		AISI 316		0,15	1,5		
1	2011	P	Pumpe	Exzenterschnecke	n = 65 %	AISI 316					
1	2012	M	Motor	Explosionsgeschützt	3600 RPM	AISI 316					
1	2013	B	Behälter	offen		AISI 316	1	1			
1	2014	F	Trommelfilter	A = 1 m <sup>2</sup>		AISI 316					
1	2015	P	Pumpe	Exzenterschnecke	n = 65 %	AISI 316					
1	2016	M	Motor	Explosionsgeschützt	3600 RPM	AISI 316					
1	2017	T	Trockner	A = 1 m <sup>2</sup>		AISI 316					
1	2018	V	Verdichter	10 kW	3000 RPM	AISI 316			60		

Anhang A: Equipment-Liste der Teilanlage 10 und Teilanlage 20 mit überschlägiger Dimensionierung

Preisermittlung					Matches	Dace	Hersteller	Kapazitätsverfahren Degressionskoeffizient	Kosten/Stk.	Kalkulationskosten
Anzahl	Nr.	Symbol	Bezeichnung	Werkstoff	[€]	[€]	[€]		[€]	
3	1001	A	Förderband	CS			5.500	8.500	8.500	25.500
3	1002	A	Ballenöffner	CS			10.000	15.000	15.000	45.000
3	1003	A	Bandwaage	CS			7.500	11.000	11.000	33.000
3	1004	A	Faseröffner	CS			12.000	18.000	18.000	54.000
3	1003	A	Bandwaage	CS			7.500	11.000	11.000	33.000
1	2001	R	Rührkessel	AISI 316	210.000	186.000		225.000	225.000	225.000
1	2002	P	Pumpe	AISI 316	7.700	9.500	9.000	10.500	10.500	10.500
1	2003	M	Motor	AISI 316			1.500		1.500	1.500
1	2004	W	Wärmeüberträger	AISI 316		203.000			203.000	203.000
2	2005	P	Pumpe	AISI 316	7.700	9.500	9.000	10.500	10.500	21.000
2	2006	M	Motor	AISI 316			1.500		1.500	3.000
2	2007	S	Separator	AISI 316	55.000				55.000	110.000
1	2008	P	Pumpe	AISI 316	7.700	9.500	9.000	10.500	10.500	10.500
1	2009	M	Motor	AISI 316			1.500		1.500	1.500
1	2010	A	Förderschnecke	AISI 316	3.500				3.200	3.200
1	2011	P	Pumpe	AISI 316	7.700	9.500	9.000	10.500	10.500	10.500
1	2012	M	Motor	AISI 316			1.500		1.500	1.500
1	2013	B	Behälter	AISI 316	18.200	18.000			16.500	16.500
1	2014	F	Trommelfilter	AISI 316	138.800	124.000			120.000	120.000
1	2015	P	Pumpe	AISI 316	7.700	9.500	9.000	10.500	10.500	10.500
1	2016	M	Motor	AISI 316			1.500		1.500	1.500
1	2017	T	Trockner	AISI 316	22.000				22.000	22.000
1	2018	V	Verdichter	AISI 316	5000	4500			4750	4750
<b>Grundkosten [€]</b>										<b>966.950</b>

Anhang B: Equipment-Liste der Teilanlage 10 und Teilanlage 20 mit Grundpreisermittlung

# Erklärung

---

Philipp, Schneider

Ich, Philipp Schneider, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit ohne fremde Hilfe und ausschließlich unter Angabe der verwendeten Literatur und Software angefertigt habe.

*P. Schneider*

---

Köln, 14.01.2020



## KURZBESCHREIBUNG

---

Durch das permanente Wachstum der Weltbevölkerung wird der Bedarf von Textilien stetig steigen. Die Produktvielfalt sowie der Konsum der Textilien werden immer größer. Die aktuellen Recyclingtechniken ermöglichen es nicht, den Rohstoffkreislauf für Textilien zu schließen. Dies liegt auch darin begründet, dass derzeit große Mengen der Textilien aus Mischgeweben zwischen Baumwolle und PET bestehen. Die Trennung dieser Komponenten ist jedoch eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung eines geschlossenen Rohstoffkreislaufs und stellt gleichzeitig eine große Herausforderung für das Recycling dar. Durch chemische Recyclingverfahren können die Rohstoffe getrennt, aufbereitet und in die Textilproduktion zurückgeführt werden. In dieser Arbeit wird aufgezeigt, wie ein chemischer Recyclingprozess, der einen geschlossenen Rohstoffkreislauf erlaubt, technisch realisiert werden kann. Der Prozess erzeugt eine PET-Fraktion und eine Celluloselösung, die in weiteren Verarbeitungsschritten zu einer Regeneratfaser versponnen wird. In dieser frühen Projektphase werden in dieser Arbeit ebenfalls die Investitionsausgaben und die Herstellungskosten für das Verfahren abgeschätzt.

---

STICHWORTE: Recycling, Mischgewebe, Baumwolle, PET, NMMO

---