

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**ITA Institut für Textiltechnik of RWTH Aachen University**

**Innovationsraum: BioTexFuture – CircWool – Recycling-  
Technologie für Wollabfälle zur Reintegration in einen zirkulären  
textilen Kreislauf**

**Verantwortliche Autoren: Juliane Wipperfürth**

**Förderkennzeichen: 031B1482C**

**„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen: 031B1482C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin“**

# 1 Kurzbericht

Im Rahmen des Projekts CircWool, gefördert durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Innovationsraum BioTexFuture, wurde die Entwicklung eines kreislauffähigen Recyclingprozesses für Wollabfälle verfolgt. Ziel war es, Verfahren zu etablieren, mit denen sich aus textilen Reststoffen – insbesondere nicht weiter verarbeitbarer Wolle – das Protein Keratin zurückgewinnen und zu neuen, biobasierten Textilfasern verarbeiten lässt. Damit trägt CircWool zur Stärkung nachhaltiger Materialkreisläufe in der Textilindustrie bei und adressiert zentrale Ziele der nationalen Bioökonomiestrategie.

Wolle ist ein hochwertiger, natürlicher Rohstoff, der in der Textilindustrie bisher nur begrenzt recycelt wird. Produktionsabfälle, Altwaren oder minderwertige Fasern werden häufig mechanisch oder thermisch verwertet sowie deponiert. Gleichzeitig bestehen große ökologische und ökonomische Potenziale für eine stoffliche Wiederverwendung. Das Projekt CircWool knüpft an diese Herausforderung an und untersucht chemische Verfahren zur schonenden Auflösung von Wollfasern, mit Hilfe von vorgelagerten Produktanalysen zur Datengenerierung und einer Marktumfrage.

Das Vorhaben wurde von der RWTH Aachen University – Institut für Textiltechnik (ITA) koordiniert und in Kooperation mit der Hochschule Niederrhein – Center Textillogistik (CTL) sowie der ORTOVOX Sportartikel GmbH (OVO) durchgeführt.

Ein zentraler Bestandteil des Forschungsvorhabens war die systematische Untersuchung einer repräsentativen Auswahl von Wolltextilien aus dem ORTOVOX-Sortiment. Ziel war es, die in der Wollindustrie üblichen Material- und Konstruktionsformen abzubilden und damit eine belastbare Grundlage für die Bewertung des kreislauffähigen Potenzials dieser Produkte zu schaffen – von reinen Wollflächen bis hin zu komplexen Funktionsmaterialien mit synthetischen Anteilen.

Anhand der bereitgestellten Textilien führte das CTL eine umfassende Sortierung durch. Mithilfe eines auf den Inputstrom „Wolle“ abgestimmten Sortierkatalogs sind die Textilien unter Berücksichtigung verschiedener Kategorien, wie Produktart, Materialzusammensetzung und der Qualitätseinschätzung („Wiederverwendung“ / „Verwertung“) sortiert worden. Der Fokus lag dabei auf Mono- und Multimaterialien mit Wollanteil. Der erstellte Sortierkatalog fungierte als strukturierte Grundlage zur systematischen Erfassung und Bewertung der untersuchten Produkte. Die präzise Erfassung aller relevanten Produktmerkmale, im Detail, war für die anschließende Analyse und Bewertung des Sortierprozesses von entscheidender Bedeutung.

Die Ergebnisse zeigen ein vielschichtiges Bild: Produkte mit hohem Wollanteil und klar trennbaren Strukturen weisen ein deutliches Potenzial für chemisches Recycling auf, während Textilien mit komplexen Verbundstrukturen – etwa durch die Kombination von Woll- und Synthetikfasern oder funktionelle Laminierungen – erhebliche Einschränkungen bei der hochwertigen Rückgewinnung der Wollfasern aufweisen. Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Bedeutung von Materialreinheit und modularen Konstruktionsansätzen für eine effiziente stoffliche Wiederverwertung und zeigen einen deutlichen Zielkonflikt im Hinblick auf Haltbarkeit und Recyclingfähigkeit. Anhand der Sortiererergebnisse und der Stoffstromanalyse entlang der textilen Wertschöpfungskette konnte das substantielle Potenzial des lösemittelbasierten Wollrecyclings eingeordnet werden.

Parallel zur materialwissenschaftlichen Analyse wurde eine strukturierte Online-Umfrage durchgeführt, um Marktpotenzial, Verbraucherakzeptanz und Zahlungsbereitschaft für recycelte Wollfasern zu ermitteln. Die Befragung richtete sich an Personen mit hohem Interesse an nachhaltiger Outdoorbekleidung. Die Umfrageergebnisse verdeutlichen ein hohes Innovations- und Nachhaltigkeitsinteresse der Zielgruppe, eine grundsätzliche Kaufbereitschaft, sowie die Akzeptanz und das Interesse an innovativen recycelten Fasern mit Wolleigenschaften.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts war die Untersuchung chemischer Verfahren zur Auflösung von Wolle und zur Gewinnung von Keratinlösungen für die Herstellung von Keratinfasern. Im Mittelpunkt der Arbeit stand zunächst die alkalische Hydrolyse von Wolle, um die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Reaktionsbedingungen, Fragmentierung und Löslichkeit von Keratin zu verstehen. Die systematische Variation von Reaktionszeit und Konzentration der alkalischen Komponenten zeigte, dass diese Parameter maßgeblich die resultierende Kettenlänge und die spätere Verarbeitbarkeit bestimmen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde das Spektrum der Auflösungsverfahren erweitert und reduktive Systeme untersucht. Dabei erwies sich insbesondere ein Lösungssystem auf Basis von Harnstoff, Thioharnstoff, Tris(hydroxymethyl)aminomethane (TRIS) und Natriumhydrogensulfid in einem Ethanol-Wasser-Gemisch als vielversprechend. Es lieferte stabile Keratinlösungen, die grundsätzlich für Nassspinnprozesse geeignet sind. Die Materialeigenschaften reichen derzeit noch nicht zur Herstellung reiner Keratinfasern aus. Daher wurde im nächsten Schritt die Möglichkeit der Herstellung einer Blendfaser geprüft. Durch die Kombination von Keratin mit Glucan, einem Nebenprodukt der Zuckerproduktion, konnte ein reproduzierbarer Nassspinnprozess entwickelt werden, der vollständig biobasierte und nachhaltige Fasern liefert. Die resultierenden Keratin-Glucan-Blendfasern zeigten vollständige Koagulation sowie mechanische Eigenschaften im Bereich von etwa 4 bis 7 cN/tex Zugfestigkeit und 12 bis 23 % Bruchdehnung und erreichen damit Werte, die nach Weiterentwicklung mit synthetischen Referenzmaterialien vergleichbar sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Projekt erfolgreich abgeschlossen wurde. Es konnte ein Proof-of-Principle zur chemischen Rückgewinnung und Wiederverwertung von Restwolle entwickelt werden – von der Auftrennung über die Lösung und Aufbereitung bis hin zur Faserneubildung. Die erzielten Ergebnisse belegen die technische Machbarkeit einer lösungsmittelbasierten Keratingewinnung und eröffnen neue Perspektiven für biobasierte, zirkuläre Textilfasern. Damit eröffnet das Projekt nicht nur neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Recyclingfähigkeit von Wollprodukten, sondern auch Ansätze zur Erforschung innovativer Fasersysteme auf Keratinbasis, die langfristig zur Transformation hin zu kreislauffähigen und ressourcenschonenden Materiallösungen beitragen können. In der weiteren Entwicklung sollen insbesondere die Skalierbarkeit des Prozesses, die Materialeigenschaften und die ökologische Bewertung vertieft untersucht werden.

## 2 Einleitung

Das Verbundvorhaben CircWool wurde im Innovationsraum BIOTEXFUTURE durchgeführt und hatte zum Ziel, neue Verfahren zur stofflichen Rückgewinnung von Keratin aus Wollreststoffen zu entwickeln und deren Weiterverarbeitung in faserförmige oder funktionale Materialien zu demonstrieren. Ausgangspunkt des Projekts war die bislang unzureichende stoffliche Nutzung großer Mengen an Roh- und Restwolle, die aufgrund von Qualitätsstreuungen, fehlenden Marktzugängen oder regulatorischen Anforderungen häufig entsorgt oder lediglich energetisch verwertet wird.

Wolle besteht zu einem überwiegenden Anteil aus dem Strukturprotein Keratin. Dieses Protein stellt grundsätzlich einen hochwertigen, biobasierten Rohstoff dar, ist jedoch aufgrund seiner stark vernetzten molekularen Struktur nur schwer zugänglich. Insbesondere die hohe Dichte an Disulfidbrücken innerhalb und zwischen den Keratinmolekülen verleiht der Wollfaser ihre Stabilität, erschwert jedoch einen gezielten chemischen Aufschluss. Vor diesem Hintergrund bestand ein zentrales Anliegen des Projekts darin, geeignete chemische Aufschlussstrategien zu identifizieren, die eine kontrollierte Rückgewinnung von Keratin ermöglichen und gleichzeitig eine Weiterverarbeitung zu höherwertigen Materialien erlauben.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung wurden im Projekt gezielt experimentelle Arbeiten durchgeführt, die sich auf den chemischen Aufschluss von Wolle, die Charakterisierung der gewonnenen Keratinlösungen sowie deren Weiterverarbeitung bis hin zur Faserherstellung erstreckten. Unterschiedliche Extraktionsverfahren wurden untersucht, die resultierenden Keratinlösungen strukturell und prozesstechnisch charakterisiert und deren Eignung für nachgelagerte Verarbeitungsschritte – insbesondere die Faserherstellung – bewertet. Der Fokus lag dabei auf der Analyse der zugrunde liegenden Reaktionsmechanismen, der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen der gewonnenen Keratinfractionen sowie der Übertragbarkeit der entwickelten Prozessketten auf skalierbare, industriell relevante Verfahren.

Im Rahmen des Projekts konnte ein belastbarer Proof-of-Principle für die stoffliche Nutzung chemisch recycelter Wollreststoffe erbracht werden. Es gelang erstmals, auf Basis von Wollhydrolysat eine vollständig biobasierte Keratinblendfaser mit einem Keratinanteil von mindestens 50 % herzustellen und diese über einen skalierbaren Nassspinnprozess bis in den Pilotmaßstab zu verarbeiten. Darüber hinaus wurden reduktive Extraktionsverfahren identifiziert, die den Erhalt höhermolekularer Keratinfractionen ermöglichen und damit eine vielversprechende Grundlage für die zukünftige Entwicklung reiner Keratinfasern darstellen. Die erzielten Ergebnisse belegen das grundsätzliche Potenzial chemischer Recyclingansätze für die hochwertige stoffliche Verwertung von Wollabfällen und bilden eine tragfähige wissenschaftliche Basis für weiterführende Prozessoptimierungen und industrielle Anschlussprojekte.

### 3 Detaillierte Darstellung der durchgeführten Arbeiten am ITA

Wolle besteht zu etwa 95 % [Car10] aus Keratin, einem hochstrukturierten Protein mit starker intermolekularer Vernetzung über Disulfidbrücken. Diese hohe Vernetzung verleiht Wolle ihre besondere Stabilität, erschwert jedoch zugleich den Aufschluss und die Rückgewinnung langer, verarbeitbarer Keratinfragmente. Ziel des Projektes war daher die systematische Untersuchung von Extraktionsverfahren, die Bewertung der Eignung der unterschiedlichen Keratinlösungen für die Renaturierung und Weiterverarbeitung, die Entwicklung erster Prozessketten zur Fasererzeugung durch das Nassspinnen und die Abschätzung der Skalierbarkeit und der potenziellen industriellen Nutzung.

#### 3.1 Keratinextraktion durch alkalische Hydrolyse

Die alkalische Hydrolyse stellt einen grundlegenden Ansatz zur Rückgewinnung von Keratin aus Wollresten dar. Bei diesem Verfahren wird die Proteinstruktur der Wolle durch den Einsatz konzentrierter Natriumhydroxidlösungen gezielt hydrolytisch gespalten, wodurch eine hohe Ausbeute an Keratinhydrolysat entsteht. Charakteristisch für diesen Ansatz ist, dass die Peptidketten des Keratins statistisch und weitgehend unspezifisch aufgebrochen werden. Dies führt zu hohen Aufschlussgraden, jedoch zu vergleichsweise kurzen Molekülketten, die im Gegensatz zu reaktiv extrahierten Fragmenten nur eingeschränkt faserbildend sind.

##### 3.1.1 Allgemeine Hydrolyse von Wolle

Die hydrolytische Aufbereitung von Wolle adressiert ein fundamentales Defizit in der Verwertung von Wollreststoffen: Obwohl Wolle zu ca. 95 % [Car10] aus Keratin besteht, wird dieses Protein bislang kaum stofflich genutzt, da die dichte Vernetzung über Disulfidbrücken seine kontrollierte Auflösung erheblich erschwert. Für eine spätere Nutzung etwa in biobasierten Fasersystemen ist jedoch ein reproduzierbarer, skalierbarer und chemisch robuster Aufschlussprozess notwendig. Die alkalische Hydrolyse (siehe Abb. 3.1) stellt hierfür einen zentralen Ansatz dar, da sie hohe Aufschlussgrade ermöglicht und wesentliche strukturelle Eigenschaften des Keratins – insbesondere funktionelle Aminosäuregruppen – zumindest teilweise erhält [AL77, Sim02].

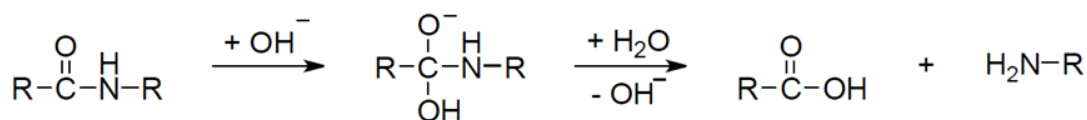


Abb. 3.1: Reaktionsschritte der basenkatalysierten Hydrolyse von Peptidbindungen. R beschreibt den chemischen Rest. [AL77, Sim02]

Unter stark basischen Bedingungen werden zunächst intermolekulare Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrücken und Salzbrücken destabilisiert. In der Folge kommt es zur basenkatalysierten Spaltung der Peptidbindungen innerhalb der Keratin-Hauptkette. [AL77, Sim02] Gleichzeitig werden Disulfidbrücken irreversibel geöffnet bzw. in Nebenreaktionen überführt (siehe Abb. 3.2). Der dargestellte Mechanismus verdeutlicht den unspezifischen, statistischen Charakter der Hydrolyse, bei dem die Proteinstruktur nicht selektiv aufgelöst wird, sondern sukzessive in kürzere Peptidfragmente zerlegt wird. [Asq77]

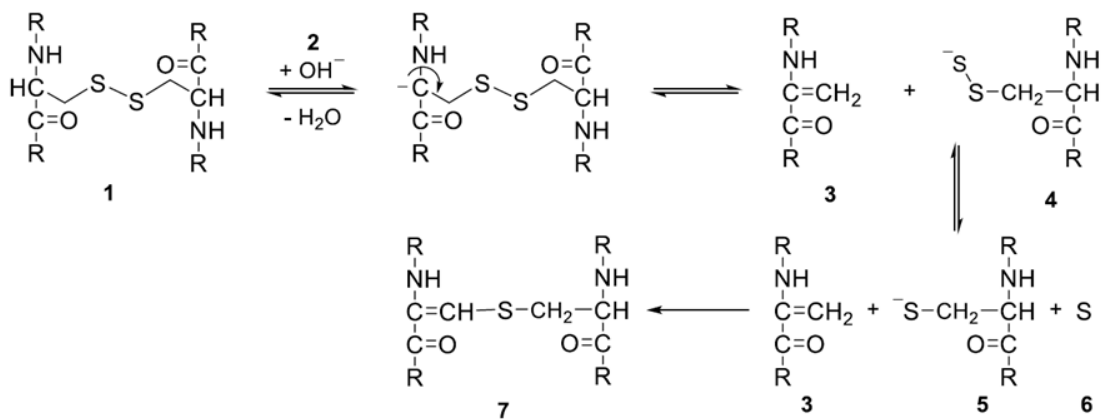


Abb. 3.2: Mechanismus der bimolekularen β-Eliminierung der Disulfid-Bindung. [Asq77]

Die zentralen Forschungsfragen die aus den Reaktionsgleichungen abgeleitet werden konnten, lauten: [Sei24]

- Wie können Wollstrukturen unter alkalischen Bedingungen gezielt, effizient und reproduzierbar hydrolysiert werden?
- Welche Molekulargewichtsverteilungen entstehen dabei?
- Inwiefern eignen sich diese hydrolytisch erzeugten Keratinfragmente als Rohstoff für spätere Verarbeitungsschritte?

Für diese Untersuchungen wurde ein systematischer Versuchsaufbau gewählt, bei dem die relevanten Prozessgrößen – pH-Wert, Temperatur, Reaktionszeit und Konzentration der eingesetzten Lauge – gezielt variiert und ihr jeweiliger Einfluss auf Löslichkeit, Reaktionskinetik, Molekulargewichtsverteilung und strukturelle Integrität der Keratinfragmente untersucht wurde. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass der pH-Wert die dominierende Stellgröße des Prozesses darstellt: Mit zunehmender Basizität steigt sowohl die Reaktionsgeschwindigkeit als auch der Aufschlussgrad der Wollfasern signifikant an. Bereits nach vergleichsweise kurzen Reaktionszeiten konnte ein nahezu vollständiger Abbau der Wollmatrix beobachtet werden, was auf eine effektive Öffnung der stark vernetzten Proteinstruktur hindeutet. [Sei24]

Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass eine Erhöhung der Reaktionsintensität – insbesondere durch hohe Laugenkonzentrationen und verlängerte Reaktionszeiten – zu einer fortschreitenden Reduktion der mittleren Molekulargewichte der Keratinfragmente führt. Dieses Verhalten ist auf die unspezifische, statistische Spaltung der Peptidbindungen im alkalischen Milieu zurückzuführen, bei der neben der Auflösung intermolekularer Wechselwirkungen auch die Primärstruktur des Proteins zunehmend angegriffen wird. Infolgedessen entstehen überwiegend kurzkettige Peptide mit breiter Molekulargewichtsverteilung, deren physikalische Eigenschaften sich deutlich von denen höhermolekularer Keratinpolymere unterscheiden. [Sei24]

Die Analyse dieser Zusammenhänge verdeutlicht den grundlegenden Zielkonflikt der alkalischen Hydrolyse: Einerseits ermöglicht sie einen schnellen, reproduzierbaren und nahezu vollständigen Aufschluss von Wollfasern, andererseits limitiert sie durch die fortschreitende Kettenverkürzung die direkte Eignung der entstehenden Produkte für faserbildende Anwendungen. Diese Erkenntnisse sind jedoch von zentraler Bedeutung für die Einordnung der Hydrolyse im Gesamtprozess, da sie klare Randbedingungen für die Prozessführung definieren und zugleich die Notwendigkeit nachgelagerter Verarbeitungskonzepte – etwa der Einbindung der Hydrolysate in Blendmaterialien – wissenschaftlich fundiert begründen.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die alkalische Hydrolyse keinen Zugang zu eigenständig faserbildenden Keratinmolekülen ermöglicht. Dennoch entsteht dabei ein wertvolles Keratinhydrolysat mit guter Löslichkeit und hoher chemischer Homogenität. Dieses Hydrolysat eignet sich in besonderem Maße als Ausgangsmaterial für die Herstellung biobasierter Blendmaterialien. Durch die hohe Reaktionsrobustheit und die gute Skalierbarkeit kann dieser Prozess industriell eingesetzt werden, insbesondere in Kombination mit weiteren polymerbasierten Komponenten, die die kurzen Molekülketten funktional kompensieren können. Die Hydrolyse bietet somit einen praktikablen und effizienten Weg, bislang ungenutzte Wollreststoffe in eine stofflich verwertbare Form zu überführen und bildet damit einen wichtigen Baustein in der ganzheitlichen Kreislaufführung von wollbasierten Ressourcen.

### **3.1.2 Herstellung von Keratinblendfasern aus Wollhydrolysat – Spinnprozessentwicklung und Scale-up**

Die Entwicklung einer spinnfähigen Keratinblendfaser aus Wollhydrolysat stellt den entscheidenden wissenschaftlich-technischen Fortschritt des Projekts dar und markiert den Übergang von der reinen Rohstoffrückgewinnung hin zu einem tatsächlich fasertechnisch nutzbaren Materialsystem. Ausgangspunkt dieser Arbeiten war die Erkenntnis, dass hydrolytisch erzeugte Keratinfragmente zwar in hoher Ausbeute verfügbar sind, aufgrund ihrer geringen mittleren Kettenlängen jedoch nicht zur Herstellung reiner Kera-

tinfasern geeignet sind. Gleichzeitig besteht ein erheblicher Bedarf an vollständig biobasierten, skalierbaren Fasersystemen, die eine stoffliche Nutzung bislang nicht verwerteter Wollreststoffe ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, ob Wollhydrolysate durch gezieltes Blenden mit einem geeigneten biobasierten Polymer in spinnfähige Systeme überführt und über etablierte Nassspinnverfahren zu kontinuierlichen Fasern verarbeitet werden können. [Kro25]

Zentraler Ansatz war die Entwicklung von Keratinspinnlösungen auf Basis von Wollhydrolysat und Glucan. Glucane sind Polysaccharide pflanzlichen oder mikrobiellen Ursprungs, die unter anderem als Neben- bzw. Reststoffe in der Stärke- und Zellstoffindustrie, bei der Verarbeitung von Getreide (z. B. aus Gersten- oder Haferkleie) sowie aus Pilz- und Hefefermentationen gewonnen werden können. Beim Blenden erwies sich Glucan als besonders geeigneter Partner, da es vollständig biobasiert und biologisch abbaubar ist, eine gute Löslichkeit im wässrigen System aufweist und im Nassspinnprozess eine strukturstabilisierende Funktion übernimmt. Ziel war es, ein Lösungssystem zu entwickeln, das sowohl rheologisch stabil als auch prozessfähig ist und eine kontinuierliche Faserbildung erlaubt. Hierzu wurden systematisch unterschiedliche Blendverhältnisse, Feststoffgehalte sowie Lösungsvorbereitungsstrategien untersucht. Es zeigte sich, dass insbesondere das Verhältnis von Keratin zu Glucan einen entscheidenden Einfluss auf die Spinnstabilität, die Koagulation und die resultierende Faserqualität besitzt. Spinnlösungen mit einem gleichen Anteil beider Komponenten zeigten eine deutlich verbesserte Filamentbildung gegenüber Keratinhydrolysat reichen Systemen. [Kro25]

Die Spinnprozessentwicklung erfolgte in einem mehrstufigen Ansatz, beginnend im Labormaßstab. In einem ersten Schritt wurden die entwickelten Spinnlösungen mittels Extrusion durch eine Spritze und Kanüle untersucht, um die grundsätzliche Spinnbarkeit zu bewerten. Dabei wurden die Lösungen durch definierte Düsen in ein Koagulationsbad extrudiert. Als Koagulationsmedium erwies sich eine wässrige Mischung aus Schwefelsäure und Natriumsulfat als besonders geeignet, da sie eine kontrollierte pH-Absenkung bewirkte, die Koagulation der Polymerkomponenten gezielt auslöste und zur Ausbildung vollständig koagulierter, zusammenhängender Filamente führte. Bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium konnten kontinuierliche Fasern erzeugt werden, die eine homogene Morphologie aufwiesen (siehe Abb. 3.3). Die visuelle Ausbildung klar definierter Filamente bestätigte erstmals das prinzipielle Potenzial des entwickelten Keratin/Glucan-Systems für eine Faserherstellung. [Kro25]

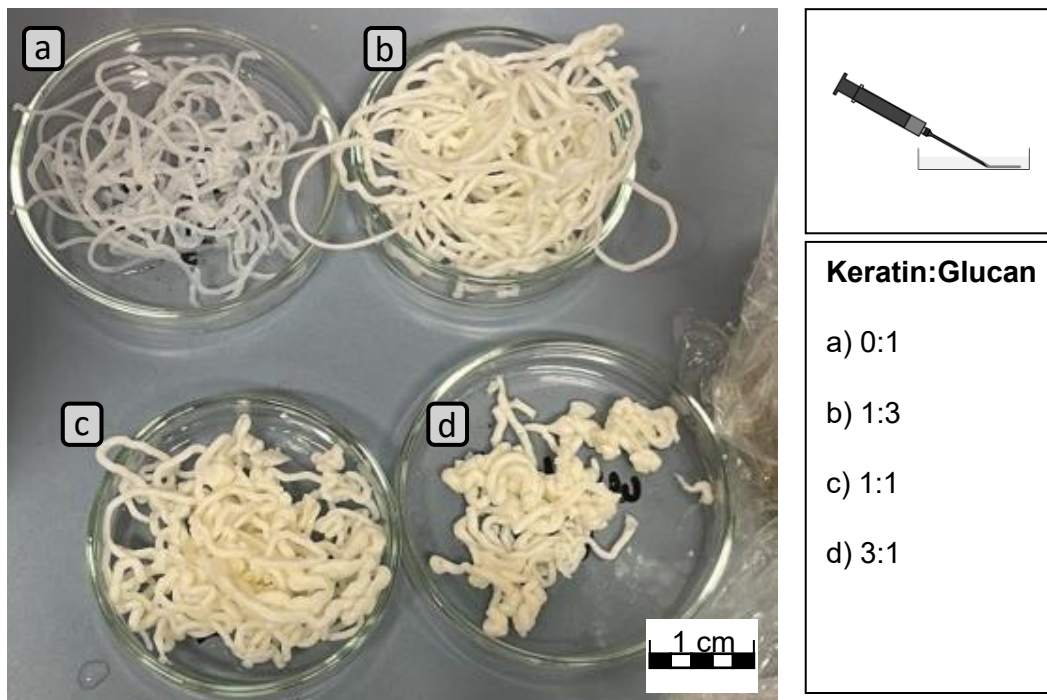


Abb. 3.3: Gebildete Fasern auf Labormaßstab; von a) bis d) Ansätze mit zunehmendem Anteil an Keratinhydrolysat. [Kro25]

Während die Spinnlösung zunächst nahezu transparent erscheint, erfolgt im Koagulationsbad eine Umwandlung zu einer milchig-transparenten Faserstruktur. Mit steigendem Glucananteil nimmt der Weißgrad der erzeugten Fasern zu. Dies ist auf den geringeren Keratinanteil zurückzuführen, wodurch der Schwefelgehalt der Lösung reduziert ist. Gleichzeitig zeigt sich bei höheren Glucananteilen eine gleichmäßigere Oberflächenmorphologie der Fasern, was eine einfachere und weitgehend zerstörungsfreie Entnahme aus dem Koagulationsbad ermöglicht. Insgesamt weist die Spinnlösung mit gleichen Anteilen an Glucan und Wolle (siehe Abb. 2.3, c) die bestmögliche Verarbeitungseigenschaften bei höchstem Wollanteil auf. Außerdem konnte bei diesem Gemisch eine zuverlässig Ausspinnbarkeit gewährleistet werden. [Kro25]

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde der Prozess auf eine kontinuierlich arbeitende Laborspinnanlage übertragen. Dieser Schritt stellte einen wesentlichen Meilenstein dar, da hier erstmals Prozessbedingungen eines industriell relevanten Nassspinnverfahrens abgebildet wurden. Der grundlegende Aufbau der verwendeten Labornassspinnanlage ist in Abb. 3.4 schematisch dargestellt und dient zur Einordnung der nachfolgend beschriebenen Prozessschritte und Parameter. [Kro25]

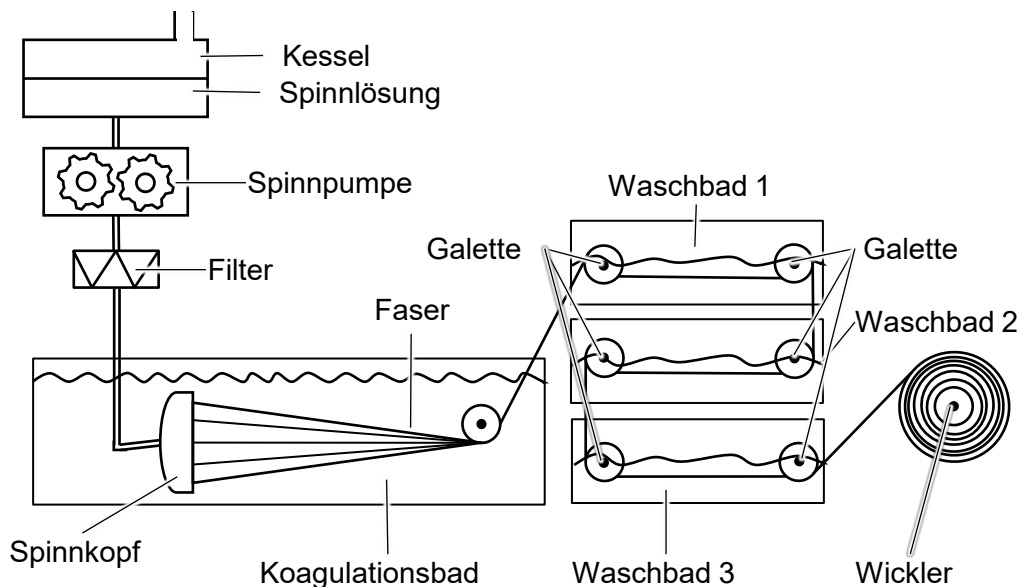


Abb. 3.4: Schematischer Aufbau der Laborspinnanlage. [Kro25]

Die Labornassspinnanlage besteht im Wesentlichen aus einer beheizten Spinnlösungsvorlage, einer Extrusionseinheit mit definierter Spinndüse, dem nachgeschalteten Koagulationsbad sowie mehreren Galetten zur Fadenführung und mechanischen Verstreckung. Nach der Extrusion der Spinnlösung in das Koagulationsbad erfolgt die Fällung der Polymerkomponenten und die Ausbildung eines kontinuierlichen Filaments. Anschließend wird der Faden über die Galetten geführt, wodurch eine kontrollierte mechanische Verstreckung realisiert wird. Eine Inline-Trocknung ist in dieser Anlagenkonfiguration noch nicht vorgesehen. Im Rahmen dieser Versuche wurden zentrale Prozessparameter systematisch variiert, darunter die Extrusionsgeschwindigkeit, die Galettendrehzahlen sowie das Verstreckungsverhältnis. Ziel war es, die Molekülorientierung innerhalb der Faser gezielt zu erhöhen und damit die mechanischen Eigenschaften der Blendfaser zu verbessern. Die im Labormaßstab hergestellten Fasern sind in Abb. 3.5 dargestellt. [Kro25]



Abb. 3.5: Gesponnene und getrocknete Multifilamentfasern aus der Laborspinnanlage, Spinnlösung Keratin:Glucan links 1:3 und rechts 1:1. [Kro25]

Wie bereits in der Auswertung der Ergebnisse im Labormaßstab gezeigt, führt ein erhöhter Keratinanteil in der Faser zu einer verstärkten Gelbfärbung. Zudem weist die Faseroberfläche einen geringeren Glanz auf, während die Haptik weicher erscheint. Im mechanischen Verhalten zeigen beide Fasertypen vergleichbare Eigenschaften unter händischen Zug- und Biegebelastung. [Kro25]

In einem weiteren entscheidenden Schritt wurde der entwickelte Spinnprozess auf den Pilotmaßstab übertragen. Hierzu wurden die Spinnlösungen in größerem Maßstab hergestellt und auf einer Pilotnassspinnanlage verarbeitet, deren schematischer Aufbau in Abb. 3.6 dargestellt ist. [Kro25]

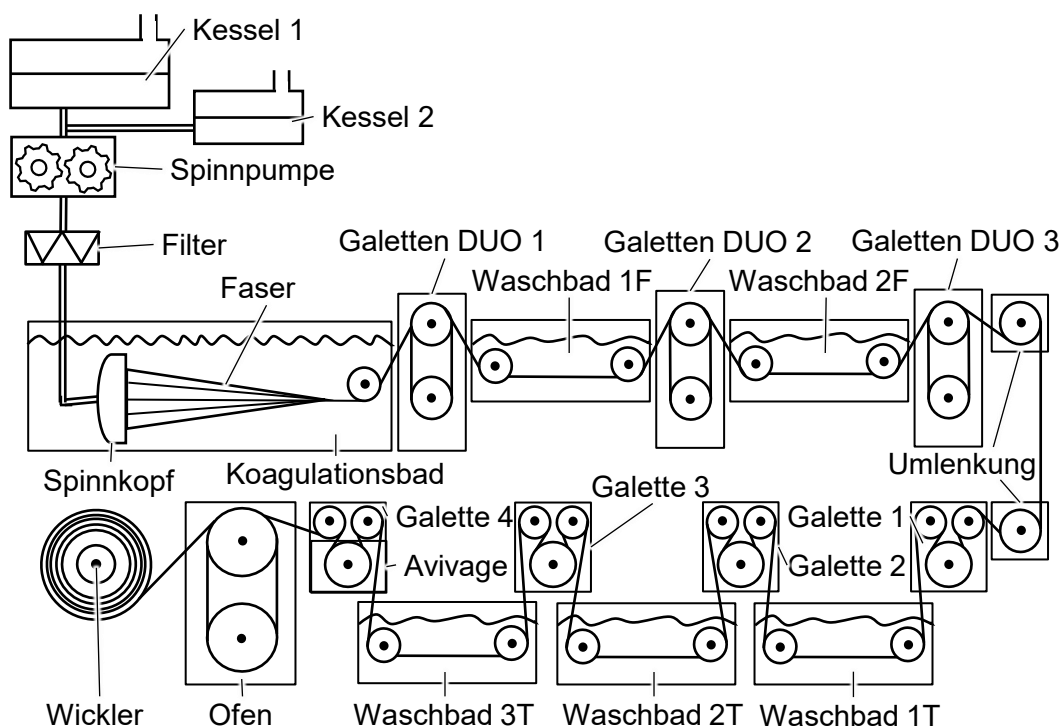


Abb. 3.6: Schematischer Aufbau der Pilotnassspinnanlage für die Versuche auf Pilotmaßstab. [Kro25]

Die Pilotnassspinnanlage bildet den industriellen Nassspinnprozess in vereinfachter, jedoch maßstabsrelevanter Form ab. Sie umfasst im Wesentlichen eine Spinnlösungsvorlage, eine Spinndüsenereinheit, ein mehrstufiges Koagulations- und Waschbad sowie nachgeschaltete Galetten zur Fadenführung und Verstreckung mit integrierter Inline-Trocknung. Im Vergleich zur Labornassspinnanlage erlaubt diese Konfiguration eine stabilere Prozessführung über längere Laufzeiten sowie die Verarbeitung größerer Spinnlösungsmengen. Dadurch können skalierungsbedingte Effekte, wie veränderte Koagulationskinetik, Fadenstabilität und Prozessrobustheit, gezielt untersucht werden. Ziel dieser Versuchsreihe war es, die Übertragbarkeit der im Labor entwickelten Prozessparameter auf größere Anlagen zu evaluieren und mögliche skalierungsbedingte Effekte

zu identifizieren. Die Versuche zeigten, dass die Keratin/Glucan-Spinnlösungen auch im Pilotmaßstab stabil verarbeitet werden konnten. Dabei wurden die folgenden Prozessparameter gewählt (siehe Tab. 3.1): [Kro25]

Tab. 3.1: Übersicht der Prozessparameter der Spinnversuche im Pilotmaßstab der 1:1-Mischung aus Wolle:Glucan.[Kro25]

Nr.	Filamente	Extrusion [U/min]	Galetten DUO 1 [m/min]	Verstreckung [ ]	Ofentemperatur [°C]
1	308	7	12	1,1	100 – 110
2	1.000	7	12	3,36	90 – 130
3	1.000	7	15	4,18	100 – 120

Dabei gelang es unter allen hier gezeigten Bedingungen kontinuierlich Fasern herzustellen. Die vollständige Koagulation sowie die Gleichmäßigkeit der Faserstruktur wurden im Anschluss mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht (siehe Abb. 3.7). [Kro25]

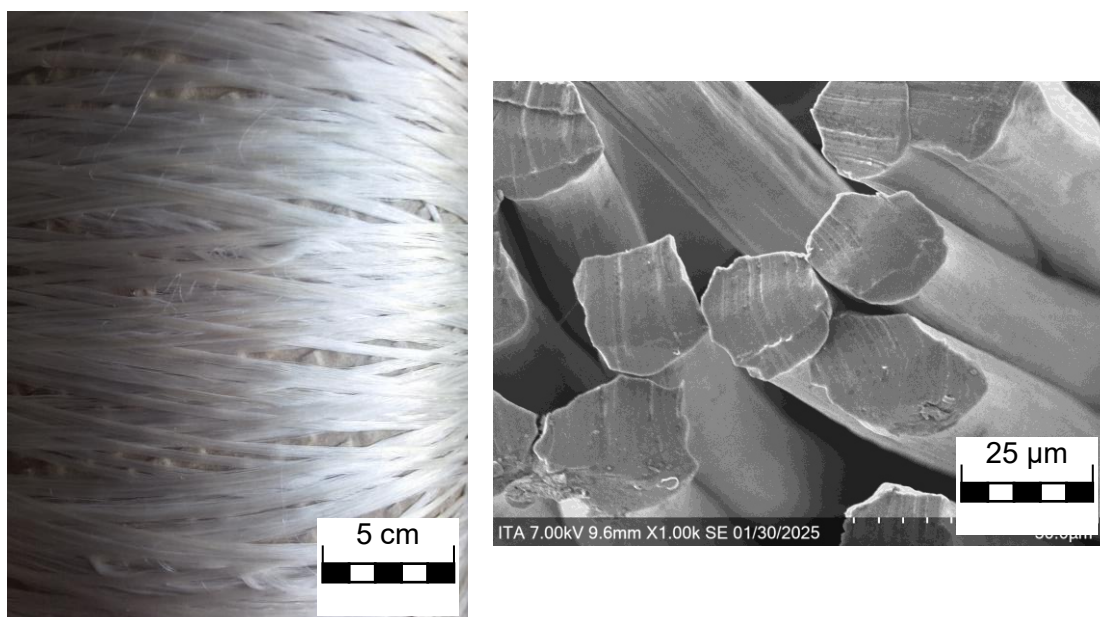


Abb. 3.7: Fotografie (links) und REM-Bild (rechts) der Keratin:Glucan-Faser (1:1); hergestellt auf der Nassspinnanlage im Pilotmaßstab mit 308 Filamente und einer Ofentemperatur von 110 °C. [Kro25]

In den REM-Aufnahmen der Faserquerschnitte und -oberflächen (siehe Abb. 3.7) ist eine dichte, homogene Struktur erkennbar. Das zeigt, dass sich die beiden verschiedenen Biopolymere homogen gemischt haben. Eine Inselbildung der verschiedenen Materialien

hätte zu Schwachstellen in der Faser führen können. Dies konnte durch die REM-Aufnahmen jedoch ausgeschlossen werden. Thermogravimetrische Analysen bestätigen das Vorhandensein beider biobasierter Komponenten und belegen den vollständig biogenen Charakter der erzeugten Blendfasern. Die mechanischen Eigenschaften der Fasern liegen mit Zugfestigkeiten im Bereich von 4 – 7 cN/tex und Bruchdehnungen von etwa 12 – 23 % noch unterhalb der Zielwerte etablierter Natur- und Synthefasern wie Wolle oder Polyamid, jedoch sind die aktuellen mechanischen Eigenschaften ein guter Ausgangspunkt zur weiteren Faserentwicklung. [Kro25]

Zusammenfassend belegen diese Ergebnisse, dass es im Rahmen des Projekts gelungen ist, aus Wollhydrolysat eine vollständig biobasierte Keratinblendfaser über einen skalierbaren Nassspinnprozess herzustellen. Die erfolgreiche Übertragung vom Labor bis hin zum Pilotmaßstab stellt einen belastbaren Proof-of-Principle für die stoffliche Nutzung chemisch recycelter Wollreste dar. Die entwickelten Prozessketten zeigen ein hohes Potenzial für weiterführende Optimierungen hinsichtlich Prozessstabilität, Faserperformance und Wirtschaftlichkeit und bilden damit eine zentrale Grundlage für eine mögliche industrielle Umsetzung.

### 3.2 Reduktive Keratinextraktion

Die reduktive Extraktion stellt einen zentralen, aufeinander aufbauenden Entwicklungspfad im Projekt dar und ergänzt die alkalische Hydrolyse um einen Ansatz, der gezielt auf den Erhalt längerer, potenziell faserbildender Keratinfragmente abzielt. Im Gegensatz zur Hydrolyse, bei der Peptidbindungen statistisch gespalten werden, liegt der Fokus der reduktiven Verfahren auf der selektiven Öffnung der Disulfidbrücken innerhalb der Keratinstruktur, während die Polypeptid-Hauptkette weitgehend erhalten bleibt.

Keratin ist durch einen hohen Anteil der Aminosäure Cystein charakterisiert, deren Thiolgruppen (-SH) intermolekulare Disulfidbrücken (-S-S-) ausbilden. Diese kovalenten Vernetzungen sind maßgeblich für die hohe Stabilität und geringe Löslichkeit von Wolle verantwortlich. [AHL+22, Feu02, Vei23b, Zam24]. Zur Auflösung von Keratin ist es erforderlich, sowohl die Disulfidbrückenbindungen (DSBB) als auch die Wasserstoffbrückenbindungen (WBB) und Salzbrücken zu spalten. Aus diesem Grund kommen bei der Keratinextraktion sogenannte „reductive mixed solvents“ (reduzierende gemischte Lösungsmittel, MS) zum Einsatz. Diese Systeme enthalten zum einen ein Reduktionsmittel zur gezielten Spaltung der Disulfidbrücken und zum anderen Komponenten, die mit Wasserstoffbrücken- und Salzbrücken wechselwirken können. Auf diese Weise werden sowohl inter- als auch intramolekulare Wasserstoffbrücken und Salzbrücken effektiv aufgelöst. Als entsprechende Komponenten werden unter anderem Salze sowie organische Substanzen wie Harnstoff eingesetzt, entweder in wässrigen Lösungen oder in binären Lösungsmittelsystemen, beispielsweise Ethanol-Wasser-Gemischen. Eine Übersicht

über mögliche Chemikalien zum Aufbruch der Keratinstruktur sind in Tab. 3.2 dargestellt. [SCP+20, JCX+17]

Tab. 3.2: Auflistung von verschiedenen Chemikalien, die für das Aufbrechen von Disulfidbrückenbindungen und Wasserstoffbrücken bei der Extraktion von Keratin aus Wolle genutzt werden. [SCP+20, JCX+17]

Disulfidbrückenbindungen	Wasserstoffbrückenbindung	Salzbrücken
Natriumhydrogensulfit (NaHSO <sub>3</sub> ) (0,93 M)	Urea	Lithiumbromid (LiBr)
2-Mercaptoethanol (1,2 M)	Thiourea	Natriumsulfat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Tris (2-carboxyethyl) phosphine (TGEP) (1,2 M)	Ethanol	Natriumlaurylsulfat (SDS)
Natriumsulfid (Na <sub>2</sub> S)	Isopropanol	
	Tris(hydroxymethyl)-aminomethan (TRIS)	

Das Ziel dieser kombinierten Wirkmechanismen ist es, Keratin in löslicher Form mit möglichst hoher molarer Masse zu gewinnen und damit die Voraussetzung für eine spätere fasertechnische Verarbeitung zu schaffen. Entscheidend ist dabei, dass durch den selektiven Aufbruch der Disulfidbrücken die makromolekulare Kettenlänge des Keratins weitgehend erhalten bleibt, wodurch sich im Vergleich zu hydrolytischen Verfahren deutlich verbesserte Struktur- und Vernetzungsgrade ergeben. Diese höheren molaren Massen wirken sich unmittelbar auf die rheologischen Eigenschaften der Keratinlösungen aus, indem sie eine erhöhte Viskosität, verbesserte Kettenüberlappung und damit eine grundsätzlich bessere Spinnfähigkeit ermöglichen.

### 3.2.1 Vorbehandlung: Selektive Modifikation der Cuticula als Voraussetzung für die reduktive Extraktion

Die Untersuchungen im Projekt zeigten, dass die reduktive Extraktion von Keratin aus Wolle ohne geeignete Vorbehandlung nur eingeschränkt effizient verläuft. Ursache hierfür ist die komplexe hierarchische Struktur der Wollfaser, insbesondere die dichte, lipidreiche Cuticula, die den darunterliegenden Cortex – und damit den Hauptanteil des Keratins – gegenüber chemischen Reagenzien weitgehend abschirmt. Erste Extraktionsversuche machten deutlich, dass reduktive Systeme zwar prinzipiell in der Lage sind,

Disulfidbrücken zu spalten, die Zugänglichkeit dieser Bindungen jedoch stark limitiert ist, wenn die äußeren Faserstrukturen intakt bleiben. [Sch25]

Vor diesem Hintergrund wurde eine gezielte Vorbehandlung der Wollfasern untersucht, deren Ziel es war, die Cuticula selektiv zu modifizieren oder partiell aufzulösen, ohne dabei den Cortex oder die Keratin-Hauptstruktur wesentlich zu schädigen. Hierfür wurden verschiedene chemische Behandlungsbedingungen systematisch variiert und deren Wirkung mittels Lichtmikroskopie analysiert. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass eine vorgeschaltete Cuticula-Vorbehandlung die effektive Diffusion reduktiver Reagenzien in den Faserquerschnitt erleichtert und damit die Reaktionskinetik der nachfolgenden reduktiven Extraktion beschleunigt. Gleichzeitig trägt sie zu einer höheren Reproduzierbarkeit der Extraktion bei, da die Heterogenität der Faseroberfläche reduziert wird. Die Vorbehandlung ist somit nicht als optionaler Schritt, sondern als funktional notwendige Prozessstufe zu verstehen, um das volle Potenzial reduktiver Extraktionsverfahren auszuschöpfen. [Sch25]

### **3.2.2 Grundlagen der reduktiven Keratinextraktion**

Nach der in Kapitel 2.2.1 dargestellten Vorbehandlung wurde systematisch untersucht, welche reduktiven Aufschlussverfahren grundsätzlich geeignet sind, Wollfasern effektiv zu lösen und dabei Keratinfragmente mit möglichst hoher struktureller Integrität (insbesondere Erhalt der Peptidkette) zu gewinnen. Im Zentrum standen reduktive Lösungssysteme, die (i) Disulfidbrücken gezielt öffnen, (ii) gleichzeitig die Proteinstruktur über chaotrope Additive (z. B. Harnstoff/Thiourea) auflockern und (iii) ein lösliches Keratin mit hinreichender molarer Masse bereitstellen. [Sch25]

Experimentell wurden hierfür mehrere reduktive Systeme vergleichend betrachtet, darunter Varianten eines etablierten Shindai-Ansatzes sowie sulfidische bzw. Sulfit basierte Alternativen. Als wesentliche Bewertungskriterien dienten der erreichbare Aufschlussgrad, die Stabilität und Homogenität der Keratinlösungen sowie analytische Hinweise auf den Erhalt der Proteinstruktur. [Sch25]

Für die wissenschaftliche Einordnung ist insbesondere die Kopplung von Prozessbeobachtung und Strukturdiagnostik entscheidend. Im Projekt werden dazu FTIR-Spektren genutzt, um die charakteristischen Amid-Banden des Keratins (Amid I/II/III) und damit den weitgehenden Erhalt der Peptidbindungen zu beurteilen. Ein entsprechendes gemessenes FTIR-Spektrum ist in Abb. 3.8 dargestellt. [Sch25]

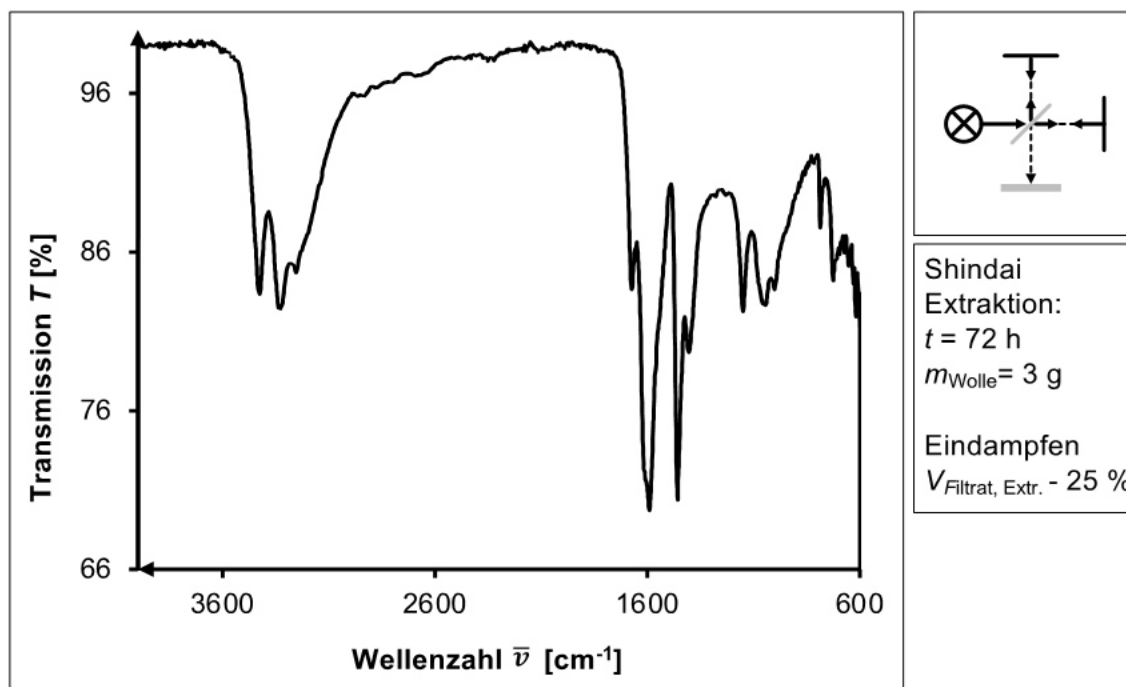


Abb. 3.8: FTIR-Spektrum des Rückstandes der 72 h-Extraktion mittels Shindai-Reagenz nach dem Eindampfen des Filtratvolumens um 25 %. [Sch25]

Das FTIR-Spektrum zeigt die für Keratin typischen Banden von Proteinen. Die Absorptionsbanden bei  $3428 \text{ cm}^{-1}$  und  $3334 \text{ cm}^{-1}$  sind den N–H- und O–H-Streckschwingungen zuzuordnen, die charakteristisch für Proteinstrukturen sind. Die ausgeprägte Bande bei  $1675 \text{ cm}^{-1}$  entspricht der Amid-I-Schwingung und ist primär auf die C=O-Streckschwingung zurückzuführen, welche der  $\alpha$ -Helix-Sekundärstruktur zugeordnet werden kann. Die Amid-II-Bande bei  $1592 \text{ cm}^{-1}$  resultiert aus einer Überlagerung von C–N-Streck- und N–H-Biegeschwingungen und ist insbesondere mit der  $\beta$ -Faltblattstruktur des Keratins assoziiert. [Sch25]

Die Absorptionsbanden bei  $1458 \text{ cm}^{-1}$  und  $1406 \text{ cm}^{-1}$  sind untypisch für klassische Amid-Schwingungen und weisen daher auf weitere Bestandteile der Schafwolle hin. In diesem Wellenzahlbereich treten üblicherweise  $\text{CH}_2$ - und  $\text{CH}_3$ -Deformationsschwingungen auf, die auf lipidische Komponenten der Wolle zurückgeführt werden können. Die Banden bei  $1149 \text{ cm}^{-1}$  und  $1046 \text{ cm}^{-1}$  sind der Amid-III-Region zuzuordnen und resultieren aus C–N-Streckschwingungen sowie N–H-Schwingungen. Obwohl die Amid-III-Bande eine geringere Intensität als die Amid-I- und Amid-II-Banden aufweist, liefert sie zusätzliche Informationen zur Sekundärstruktur des Proteins. Schließlich sind die Absorptionsbanden im Bereich von  $786 \text{ cm}^{-1}$  bis  $605 \text{ cm}^{-1}$  charakteristisch für Keratin und deuten auf das Vorhandensein von C–S- sowie S–S-Bindungen hin. [Sch25]

Die Versuchsserie zeigte, dass reduktive Systeme prinzipiell lösliche Keratinfractionen erzeugen können, die im Vergleich zu hydrolytischen Produkten eine höhere strukturelle

Integrität erwarten lassen. Gleichzeitig wurde ersichtlich, dass die Prozessführung empfindlich auf Parameter wie Temperatur, Reaktionszeit und die Zusammensetzung der Reagenzien reagiert. Diese Befunde definierten die Ausgangsbasis für die nachfolgende Optimierung des Lösungssystems.

### 3.2.3 Optimierung der Lösungssysteme und Koagulation

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 2.2.2 wurde im Anschluss das Lösungssystem im Hinblick auf (i) höhere Löslichkeitsgrade, (ii) bessere Prozessstabilität und (iii) verbesserte Verarbeitbarkeit (insbesondere Koagulationsverhalten) weiterentwickelt. Der Fokus lag auf der Modifikation des Reduktionssystems (u. a. Einsatz von Sulfit als Reduktionsäquivalent), der Variation der Lösungsmittelzusammensetzung (z. B. Ethanol/Wasser-Gemische zur Anpassung von Polarität und Solvatation) sowie der gezielten Auswahl des Koagulationsmediums. [Won25]

Ein zentraler wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit liegt in der detaillierten und systematischen Untersuchung der Koagulation reduktiv extrahierter Keratinlösungen. Im Rahmen des Projekts wurden unterschiedliche Koagulationsmedien vergleichend untersucht, um deren Einfluss auf die Renaturierung und Strukturfixierung der gelösten Keratinmoleküle zu bewerten. Besondere Aufmerksamkeit galt dem Vergleich zwischen gesättigter Natriumsulfatlösung und organischen Koagulationsmedien wie Aceton (siehe Abb. 3.9). [Won25]

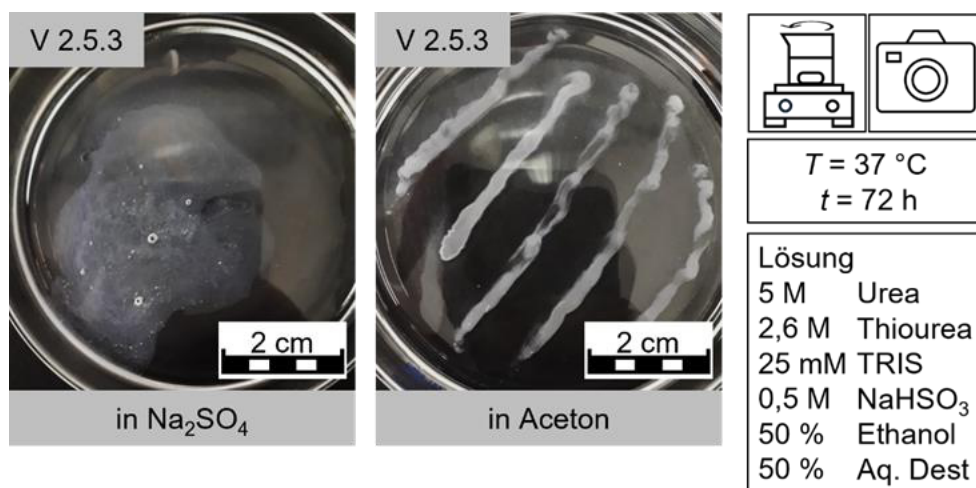


Abb. 3.9: Koagulation einer Keratinlösung in einer gesättigten Natriumsulfatlösung (links) oder Aceton (rechts). [Won25]

Die vergleichende Darstellung der Koagulationsversuche verdeutlicht, dass die Koagulation in gesättigter Natriumsulfatlösung zu einer sehr schnellen Ausfällung führt, die nicht mit einer ausgeprägten Aggregation der Keratinmoleküle einhergeht. Diese unkon-

trollierte Koagulation verhindert eine geordnete Strukturbildung. Dem gegenüber ermöglicht Aceton als Koagulationsmedium eine deutlich langsamere und homogenere Koagulation, bei der die Keratinmoleküle kontrollierter ausfallen und dadurch stärker aggregieren. Diese Unterschiede lassen sich unmittelbar aus der Abbildung ableiten und unterstreichen die zentrale Rolle des Koagulationsmediums als strukturgebenden Prozessparameter. Unter geeigneten Koagulationsbedingungen konnten filamentartige, faserähnliche Strukturen beobachtet werden, die sich klar von den amorphen Aggregaten unterscheiden, die bei ungünstigen Koagulationsbedingungen entstehen. [Won25]

Zusammenfassend zeigen die Koagulationsversuche, dass über die gezielte Wahl des Koagulationsmediums und der Koagulationsbedingungen der Übergang von gelöstem Keratin zu strukturierten, potenziell faserbildenden Morphologien gesteuert werden kann. Während schnelle, ionisch geprägte Koagulationsprozesse zur wenig Aggregation führen, begünstigen langsamere, weniger stark wechselwirkende Medien eine homogenere Strukturfixierung. Diese Erkenntnisse stellen einen entscheidenden Zwischenschritt auf dem Weg von der Keratinextraktion zur fasertechnischen Verarbeitung dar und liefern die wissenschaftliche Grundlage für die im Projekt nachfolgenden Spinnversuche. [Won25]

### **3.2.4 Übertragung auf spinnfähige Systeme**

Im nächsten Entwicklungsschritt wurde untersucht, inwieweit die optimierten reduktiven Keratinlösungen für spinntechnische Anwendungen geeignet sind. Dabei lag der Fokus auf der Bewertung der Molekulargewichtsverteilung, der zeitlichen Stabilität der Lösungen sowie der Möglichkeit, die Keratinstrukturen gezielt zu stabilisieren. [Ess25]

Gelelektrophoresen (siehe Abb. 3.10) zeigen, dass reduktiv extrahierte Keratinlösungen deutlich höhere Molekulargewichte aufweisen als hydrolytische Produkte und sich somit wahrscheinlich grundsätzlich besser für faserbildende Anwendungen eignen. [Ess25]

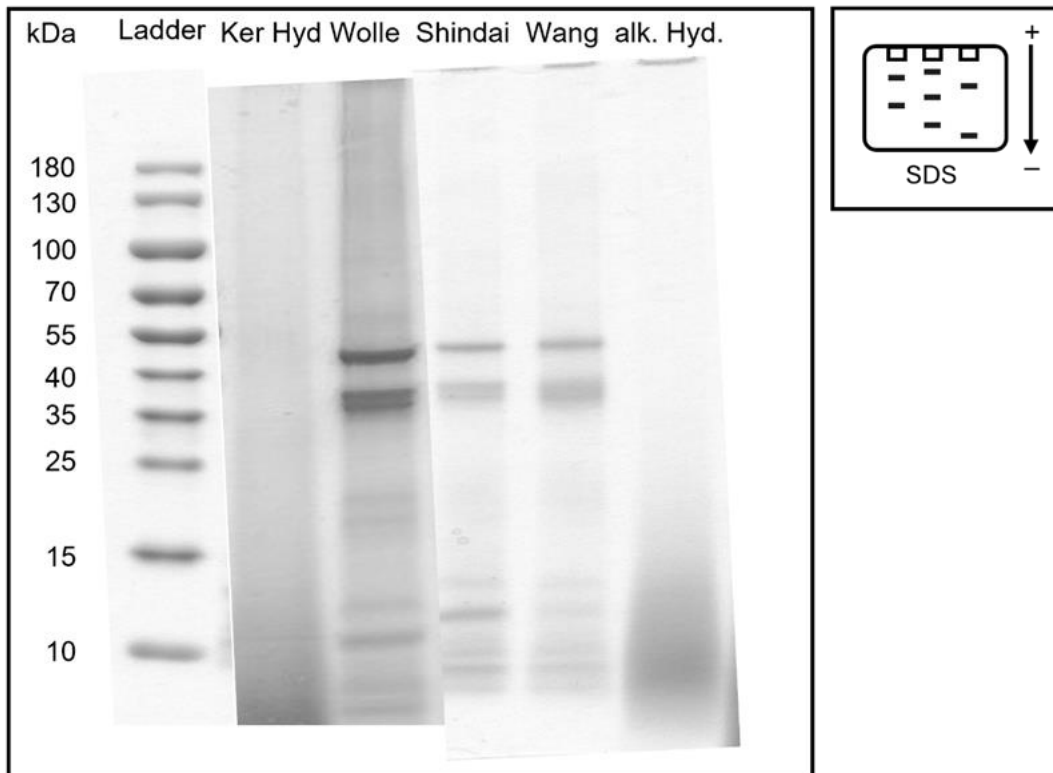


Abb. 3.10: Gelelektrophorese von den Extraktionsmethoden sowie den verwendeten Rohstoffen. [Ess25]

In der Gelelektrophorese zeigt die Wolle mehrere charakteristische Proteinbanden. Die intensivsten Signale treten bei Molekulargewichten von etwa 60 kDa und 40 kDa auf und sind dem Keratin ( $\alpha$ -Keratinen) zuzuordnen, welche das strukturelle Grundgerüst der Wollfaser bilden. Zusätzlich lassen sich schwächere Banden bei circa 13 kDa und 11 kDa detektieren, die den Keratin-assoziierten Proteinen (KAP) der Wolle zugeordnet werden können. Sowohl die nach Shindai [NAT+02] als auch die nach Wang [WLM+16] durchgeführten Extraktionsmethoden zeigen ausgeprägte Banden im Bereich von 60 kDa und 40 kDa. Daraus kann geschlossen werden, dass beide Verfahren das Molekulargewicht der Keratinproteine nicht signifikant verringern und somit eine vergleichsweise schonende Reduktion und Extraktion der Proteine ermöglichen. [Ess25]

Neben dem Molekulargewicht wurde auch die Haltbarkeit der Keratinlösung untersucht. Dafür sind in Abb. 3.11 Mikroskopie Aufnahmen einer Keratinlösung nach 1, 2 und 7 Tagen gezeigt. [Ess25]

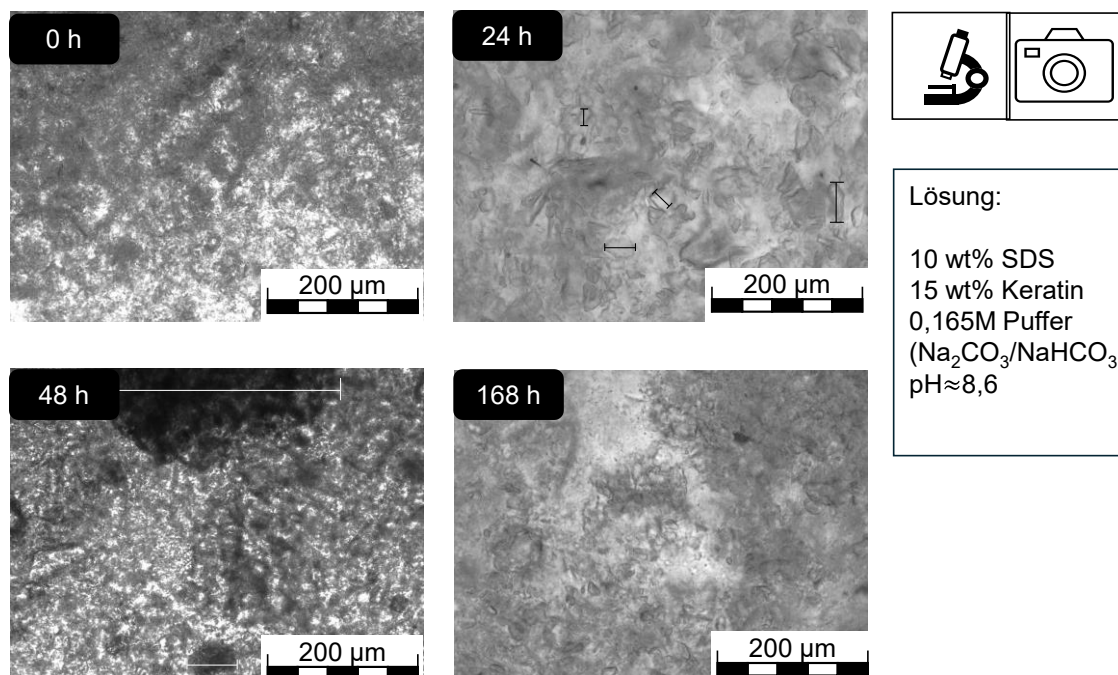


Abb. 3.11: Degradation der Keratinlösung nach 1, 2 und 7 Tagen. [Ess25]

Aus den Abbildungen geht eindeutig hervor, dass die Partikelanzahl mit zunehmender Standzeit ansteigt. Zu Beginn sind die Partikel lediglich schemenhaft erkennbar, während sich mit fortschreitender Alterung der Lösung eine deutlich ausgeprägtere Inhomogenität einstellt. Dabei sind bereits nach einem Tag Partikel einer Größe von ca. 15 – 50 µm erkennbar (Abb. 3.11, 24 h, schwarze Linie). Nach einer Standzeit von 48 h ist insbesondere ein Aggregieren des Keratins zu einer dunklen Struktur in der oberen Hälfte des Mikroskopiebildes deutlich zu beobachten. Dies Aggregat hat eine Größe von ca. 400 µm (Abb. 3.11, 48 h, weiße Linie) und belegt damit die Alterung der Lösung durch den Zusammenschluss von Keratinpartikeln. Gleichzeitig werden Phasengrenzen zunehmend klarer sichtbar, und es zeigt sich eine weitere Zunahme der Partikelgröße. [Ess25]

### 3.2.5 Einordnung der reduktiven Extraktion im Gesamtprojekt

Die aufeinander aufbauenden Ergebnisse der reduktiven Extraktion zeigen deutlich, dass dieser Ansatz ein hohes Potenzial für die Gewinnung faserbildender Keratinstrukturen besitzt, jedoch zugleich mit spezifischen Herausforderungen verbunden ist. Während die selektive Öffnung der Disulfidbrücken den Erhalt langer Polypeptidketten ermöglicht, erfordern die resultierenden Lösungen eine gezielte Stabilisierung und Prozessführung, um eine reproduzierbare Weiterverarbeitung zu gewährleisten.

Im Kontext des Gesamtprojekts bilden die reduktiven Arbeiten eine entscheidende wissenschaftliche Grundlage für das Verständnis der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen

von Keratin und lieferten wertvolle Erkenntnisse, die sowohl für die Entwicklung von Keratinblendfasern als auch für zukünftige Arbeiten zur Herstellung reiner Keratinfasern von zentraler Bedeutung sind. Die systematische Abfolge der Untersuchungen ermöglichte es, die Prozessgrenzen klar zu identifizieren und gezielt Ansatzpunkte für weiterführende Optimierungen abzuleiten.

## **4 Wichtigste Position des zahlungsmäßigen Nachweises**

Die kostenneutrale Verlängerung des Projekts führte zu einer höheren Beanspruchung der Personalkosten, insbesondere bei den studentischen Hilfskräften, da die chemischen Untersuchungen und Spinnversuche deutlich zeitintensiver waren als ursprünglich kalkuliert. Gleichzeitig konnten Einsparungen bei Sachmitteln erzielt werden, da bestimmte Chemikalien in kleineren Mengen benötigt wurden und Geräte gemeinsam mit anderen Projekten genutzt werden konnten. Außerdem reduzierten sich die Reisekosten aufgrund von verstärkter digitaler Kommunikation und interner Projektabstimmungen.

## **5 Verwertung der Ergebnisse nach Projektende**

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bilden eine sehr gute Grundlage für die Entwicklung nachhaltiger Recyclingtechnologien in der Textilindustrie. Die Forschungsergebnisse wurden im Rahmen von BioTexFuture regelmäßig präsentiert und in Vorträgen und Fachbeiträgen kommuniziert. Darüber hinaus wurde CircWool in mehreren Presseartikeln und Messeauftritten vorgestellt, um das öffentliche Bewusstsein für biobasierte Materialkreisläufe zu stärken. Eine Dissertation ist in Vorbereitung, die sich vertieft mit den erzielten Ergebnissen und der Skalierung des Prozesses befassen wird. Mehrere Folgeprojekte sind derzeit in Planung.

## 6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

### Konferenzen/Vorträge

- Gudehus, Lisa; Wipperfurth, Juliane: CircWool - Recycling-Technologie für Wollabfälle zur Reintegration in einen zirkulären textilen Kreislauf, 7. Textillogistikforum, Dortmund, 02.07.2025.
- Mauter, Sabrina: Analysis of pre- and post-consumer used textiles from outdoor clothing sector with focus on chemical wool recycling, Fashion Textiles Wearables, iLetters, Manchester, 29.04.2025.
- Wipperfurth, Juliane; Brien, Christine: Closing the loop of wool by chemical recycling?, Dornbirn Global fiber congress, Dornbirn, 18.09.2025.

### Messen/Ausstellungen:

- BIOTEXFUTURE Spring Member Day, Herzogenaurach, 15.05.2025.
- Center Textillogistik: Ausstellung Demonstrator, 7. Textillogistikforum, Dortmund, 02.07.2025.
- BIOTEXFUTURE: Zukünfte der textilen Wertschöpfungskette, Sonderausstellung: Deutsches Museum Nürnberg - Das Zukunftsmuseum, Nürnberg, 07.08. – 14.09.2025.
- MUNICH FABRIC START 2025 KEYHOUSE, München, 02.09. – 03.09.2025.
- BIOTEXFUTURE Fall Forum 2025, Aachen, 09.10.2025.
- Innovationsräume Bioökonomie: Partnerschaften aus Industrie und Forschung für biobasierte Innovationen aus Deutschland, BMFTR, Berlin, 19.11. – 20.11.2025.
- Wipperfurth, Juliane: Wool Waste to Circular Textiles: Innovative Recycling Solutions, Aachen – Dresden – Denkdorf International Textile Conference, Aachen, 27.11. – 28.11.2025.
- Center Textillogistik: Ausstellungsstand Industrieausstellung, 17. Kolloquium "recycling for textiles" (re4tex), Dezember 2025, Chemnitz.

### Berichterstattungen:

- macondo publishing GmbH; „CircWool – Wollabfälle recyceln und kreislauffähig machen“; Umweltdialog;  
<https://www.umweltdialog.de/de/WIRTSCHAFT/Wirtschaft/2025/CircWool-Wollabfaelle-recyceln-und-kreislauffaehig-machen.php>
- macondo publishing GmbH; „Wollabfälle recyceln und kreislauffähig machen“; textile network;  
<https://textile-network.de/de/Business/Wollabfaelle-recyceln-und-kreislauffaehig-machen>

- macondo publishing GmbH; „Recycling von Wollabfällen“, Melliand International  
<https://www.textiletechnology.net/melliand/news/biotextfuture-recycling-von-woll-abfaellen-50803>
- macondo publishing GmbH; „CIRCWOOL-Projekt: Forschungsprojekt gelingt Durchbruch beim Woll-Recycling“; Textilwirtschaft;  
<https://www.textilwirtschaft.de/green/news/circwool-projekt-forschungsprojekt-gelingt-durchbruch-beim-woll-recycling-250091>
- Redaktion SAZsport; „CircWool: Entwicklung einer Technologie zur Wiederverwertung von Wollabfällen“; SAZsport.  
<https://www.sazsport.de/markt-politik/nachhaltigkeit/circwool-entwicklung-technologie-wiederverwertung-wollabfaellen-2957682.html>
- Redaktion Oi Compass; “CircWool Project aims to convert wool waste into sustainable high-performance fibers”; Oi Compass;  
<https://www.oicompass.com/csr-and-sustainability/circwool-project-aims-to-convert-wool-waste-into-sustainable-high-performance-fibers/114162.article>
- TexData International „Reintegration von Wollabfällen in einen textilen Kreislauf durch chemisches Recycling“, geplant Q1 2026

## 7 Literatur

- [AHL+22] Allafi, F.; Hossain, M. S.; Lalung, J.; Shaah, M.; Salehabadi, A.; Ahmad, M. I.; Shadi, A.:  
Advancements in Applications of Natural Wool Fiber  
Review Journal of Natural Fibers, 19 (2022), H. 2, S. 497–512
- [AL77] Asquith, R.; Leon, N.:  
Chemical Reactions of Keratin Fibres.  
In Asquith, R. S. Chemistry of Natural Protein Fibers. 1. Aufl. Boston, MA: Springer US, 1977, S. 193–203
- [Asq77] Asquith, R.:  
Chemistry of Natural Protein Fibers.  
1. Aufl. - Boston, MA: Springer US, 1977
- [Car10] Cardamone, J.:  
Investigating the microstructure of keratin extracted from wool: Peptide sequence (MALDI-TOF/TOF) and protein conformation (FTIR)  
Journal of Molecular Structure 969 (2010), H. 1-3, S. 97–105
- [Feu02] Feughelman, M.:  
Natural protein fibers.  
Journal of Applied Polymer Science, 83 (2002), H. 3, S. 489–507
- [JCX+17] Jin, S.; Chen, Z.; Xin, B.; Xi, T.; Meng, N.:  
An investigation on the comparison of wet spinning and electrospinning: Experimentation and simulation.  
Fibers Polym., Nr. 18 (2017), pp. 1160–1170.
- [NAT+02] Nakamura, A.; Arimoto, M.; Takeuchi, K.; Fujii, T.:  
A Rapid Extraction Procedure of Human Hair Proteins and Identification of Phosphorylated Species  
Biological & Pharmaceutical Bulletin, 25 (2002), H. 5, S. 569–572, doi: 10.1248/bpb.25.569
- [SCP+20] Suarato, G.; Contardi, M; Perotto, G.; Heredia-Guerrero, J.A.; Fiorentini, F.; Ceseracciu, L.; Pignatelli, C.; Debellis, D.; Bertolli, R.; Anthanassiou, A.:  
From fabric to tissue: Recovered wool keratin/polyvinylpyrrolidone bio-composite fibers as artificial scaffold platform.  
Materials Science & Engineering C, Nr. 116 (2020), p. 111151, 2020
- [Sim02] Simpson, W.:  
Wool Chemistry.

In Simpson, W. S.; Crawshaw, G. H. Wool. 25. 1. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002, S. 135–147

- [Vei23] Veit, D.:  
Fasern: Geschichte, Erzeugung, Eigenschaften, Markt  
Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, S. 285–339
- [WLM+16] Wang, K.; Li, R.; Ma, J. H.; Jian, Y. K.; Che, J. N.:  
Extracting keratin from wool by using l -cysteine  
Green Chemistry, 18 (2016), H. 2, S. 476–481, doi:  
10.1039/C5GC01254F
- [Zam24] Zambrotta, M.:  
Extract value from wool waste: keratin and the circular economy Science in school  
The European journal for science teachers (2024), S. 1–4

## Studentische Arbeiten

- [Ess25] Esser, L.:  
Optimierung der Keratinaufbereitung für das Nassspinnen.  
Bachelorarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen 2025
- [Kro25] Krohmer, A.:  
Prozessentwicklung des Nassspinnens von Keratinblend-Fasern: Skalierung von Labor- zum Technikumsmaßstab.  
Bachelorarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen 2025
- [Sch25] Schraudy, S.:  
Untersuchung von verschiedenen Extraktionsmethoden zum Lösen von Keratin aus Wollresten.  
Forschungsarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen 2025
- [Sei24] Seidler, L. J.:  
Hydrolytisches Upcycling von Wollabfällen durch alkalische Hydrolyse: Untersuchung der Einflüsse der NaOH-Konzentration, der Reaktionszeit und -temperatur.  
Bachelorarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen 2025
- [Won25] Wontroba, L.:  
Untersuchung der reduktiven Löslichkeit von Keratin zur Herstellung

einer Keratinspinnlösung.

Forschungsarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen 2025