



Transparenz in textilen Recyclingprozessen

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Datum: 28.09.2021
AZ: 35613/01
Projektleiter: Tobias Herzog
E-Mail: tobias.herzog@tailorlux.com
Tel: +49 2534 644 44 104

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Abbildungsverzeichnis	3
3	Abkürzungen	4
4	Zusammenfassung	5
5	Zielsetzung und Anlass des Vorhabens.....	5
5.1	Projektboard	6
5.2	Modul 1 Prüfung chemischer Recyclingverfahren	7
5.2.1	Chemisches Recycling Baumwolle	7
5.2.2	Chemisches Recycling PET/Kunststoffe	9
5.3	Modul 2 Prüfung mechanischer Recyclingverfahren	9
5.4	Modul 3 Prototypenbau des Quantifizierungssensors	11
5.5	Arbeitspaket 1 Quantifizierungsalgorithmus	12
5.6	Arbeitspaket 2: Mechanischer Aufbau und Mustermatrix	21
6	Ergebnisse und Diskussion	23
6.1	Markierung und Transparenz in chemischen Recyclingprozessen.....	23
6.2	Machine Learning und Textile Muster.....	23
6.3	Stofferkennung mit NIR und die Möglichkeit R-PET und PET ohne Markierung zu unterscheiden	24
6.4	Kameraerkennung	26
6.5	Der Sensormix und Neuronale Netzwerke	26
7	Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation	27

8 Fazit.....27

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1..... 8

Abbildung 2..... 11

Abbildung 3 Skizze der finalen Trainingspipeline 13

Abbildung 4 Skizze der Anwendung des finalen Modells..... 14

Abbildung 5 - Peaks in Spektraldaten..... 14

Abbildung 6 - dreidimensionale Abbildung der Dimensionsreduktion mittels PCA
(Principal Component Analysis)..... 15

Abbildung 7 - Interne Repräsentation der Spektraldaten nach Anwendung der PCA16

Abbildung 8 - Visualisierung der Netzarchitektur 17

Abbildung 9 - Confusion Matrix - fehlerhaft angelerntes Netz..... 18

Abbildung 10 - Confusion Matrix - erfolgreich angelerntes Netz..... 19

Abbildung 11 - dreidimensionale Abbildung der Dimensionsreduktion mittels UMAP
..... 20

Abbildung 12 - Interne Repräsentation der Spektraldaten nach Anwendung von UMAP
..... 20

Abbildung 13 - NIR Spektrum 24

Abbildung 14 - NIR Spektren von Jeans=Blau, Baumwolle = Grün und Cashmere=Rot
..... 25

Abbildung 15..... 26

3 Abkürzungen

AP.....	<i>Arbeitspaket</i>
PCA.....	<i>Principal Component Analysis</i>
PET.....	<i>Polyethylenterephthalat</i>
R-PET.....	<i>recycletes Polyethylenterephthalat</i>
UMAP.....	<i>Uniform Manifold Approximation and Projection</i>

4 Zusammenfassung

Das Projekt AZ: 35613/01 "Transparenz in textilen Recyclingprozessen" hat die Grundlage für die Quantifizierung von Faseranteilen in Geweben geschaffen und nachgewiesen, dass chemische Markierung und Recyclingprozesse kompatibel sind. Im Ergebnis steht ein Prototyp der Faseranteile am Flächentextil erkennt, ohne dass etwa Sensoren im Produktionsprozess notwendig wären.

Tailorlux hat mit diesem Projekt erstmals maschinelles Lernen mit einem optischen Sensormix verbunden, der auf großes Interesse in der Textilindustrie gestoßen ist und fortan zum Handgerät weiterentwickelt werden soll.

5 Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Tailorlux bietet verdeckte Markierungen für Fasern an, um die Rückverfolgbarkeit und die Quantifizierung von Textilien sicherzustellen.

Um die Markierung tatsächlich gewinnbringend für recycelte Ware einsetzen zu können, muss bewiesen werden, dass

- es keine Implikationen in textilen Recyclingprozessen gibt (chemisch wie mechanisch)
- die Markierung im Textil quantifiziert werden kann, um recycelte Anteile zu identifizieren, und dabei auch zum Beispiel PET von R-PET unterscheiden zu können.
- die Markierung in chemischen Recyclingprozessen komplett gefiltert wird und nach mechanischen Recyclingprozessen mit veränderter Signatur erkannt werden kann.

Kern des Projektes ist damit der Prototypenbau eines Quantifizierungssensors über das Anlernen eines Algorithmus zur Erkennung verschiedener Textilkompositionen und Markierungen. Ferner soll geprüft werden, ob die NIR Spektroskopie die Erkennung von degeneriertem Plastik bzw. verkürzten Polymerketten („Meeresplastik“) zulässt.

5.1 Projektboard

Für die Erstellung eines Lastenheftes und die spätere Verwendung im Markt, hat Taylorlux ein Projektboard mit verschiedenen Vertretern der Textil und Recyclingwelt einberufen. Neben großen Retailern wie PVH und Inditex waren auch R-PET Hersteller wie Indorama oder Vertreter des chemischen Recyclings vertreten. Aus dieser (virtuellen) Veranstaltung und den nachfolgenden Hinweisen der einzelnen Teilnehmer ließen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Ein solches Gerät wird dringend am Markt gebraucht. Allerdings stellt sich die Frage, wer ein solches Gerät bewirtschaften und bedienen soll.
- Die Funktion des Gerätes (Anzeigen Recycelter Anteile) macht nur dann für die großen Hersteller einen Sinn, wenn sich daraus direkte Indikatoren für die eigene Produktverantwortung ableiten ließen.
- Das Produktgewicht muss bei der Messung berücksichtigt werden.
- Es gibt keinen Konsens über den Einfluss verschiedener Materialien auf die Umwelt. So werden die erhöhte Nachfrage von R-PET und chemische Recyclingprozesse von Befürwortern der Naturfaser durchaus kritisch gesehen.
- Eine Weiterentwicklung zum Handgerät wäre wünschenswert.

Das Projektboard wurde nach der Ersterprobung des Prototyps erneut virtuell eingeladen, um das Gesamtsystem zu präsentieren. Dabei ergaben sich Folgekontakte, die zu Folgeprojekten führen. Aktuell verhandelt Taylorlux eine Teilnahme an den EUREGIO-Projekten Recan III und GROSS (Grensoverschrijdende samenwerkingssubsidie), bei denen jeweils das Thema Stofferkennung, Tracerquantifizierung und der Einsatz von Sensoren zu Gunsten von Transparenz in textilen Recyclingvorgängen zum tragen kommt. Das Thema Quantifizierung von recycelten Anteilen hat seit Projektbeginn eine Dynamik angenommen die auch andere Industriezweige betrifft. Durch die gemeinsame Öffentlichkeitsarbeit mit der DBU wurde Taylorlux auch durch einen Verband für PET-Flaschen angesprochen der zusammen mit der Hochschule Niederrhein den Recyclatanteil in Pre-Forms von Flaschen überprüfen möchte.

Das Projekt wurde in 3 Module unterteilt, um die Voraussetzung für die Durchführbarkeit zu schaffen. Dabei ging es im speziellen um folgende Fragestellungen:

Modul 1: Gibt es die Möglichkeit, dass die Faserquantifizierung durch Markierungen im chemischen Recyclingprozess gestört wird?

Modul 2: Gibt es die Möglichkeit, dass die Faserquantifizierung durch Markierungen im mechanischen Recyclingprozess gestört wird?

Modul 3: Welcher Sensormix kann in welchem Design eingesetzt werden, um den Recyclinganteil eines Gewebes zu erkennen?

5.2 Modul 1 Prüfung chemischer Recyclingverfahren

Die Robustheit von anorganischen Markern kann ein Problem werden, wenn diese den Recyclingprozess überstehen und das Detektionssignal verfälschen. So könnte es theoretisch vorkommen, dass eine Markierung für Biobaumwolle die Markierung für Recyclingware stört. Das Projektdesign sah deshalb zwei Verfahrensprüfungen vor, bei denen markierte Textilien in einem De-Polymerisationsprozess und beim chemischen Baumwolle-Recycling eingesetzt werden. Diese wurden mit den Partnern Jeplan und Re:Newcell durchgeführt. Die Tests zeigten, dass die in den Prozess eingetragene Markierung nicht das recycelte Produkt kontaminiert.

5.2.1 Chemisches Recycling Baumwolle

Der Projektpartner Re:Newcell stimmt einer Veröffentlichung des Testreports RM0209 nicht zu. Auszugsweise kann Taylorlux folgende Erkenntnisse über die Tests veröffentlichen. Es wurden markierte Textilien aus dem Projekt 34216/01 in dem chemischen Recyclingprozess verwendet. Die Markierung hatte keinen Einfluss auf den Prozess, konnte jedoch im Endprodukt (Pulp) wieder detektiert werden. Dies bedeutet, dass Marker grundsätzlich das chemische Recycling von Baumwolle kontaminieren. Die entstandene Pulpe aus dem Labor war kontaminiert, allerdings beinhaltet der Labortest keine Sedimentations- bzw. Filterprozesse wie im industriellen Verfahren. Ein industrielles Verfahren kann jedoch unter kommerziellen wie

ökologischen Gesichtspunkten nicht durchgeführt werden, da die Mindestmenge circa 500 Kilo markiertes Textil benötigt hätte. Hier zeigt sich bereits eine entsprechende Barriere gegen die Kontamination durch Marker, eine kritische Menge markiertes Material müsste ein Batch zeitgleich erreichen. Selbst in diesem Fall ist davon auszugehen, dass der Marker durch die industrielle chemische Wiederaufbereitung sedimentiert. Sollte das nicht geschehen, so wird spätestens bei der Wiederaufbereitung der Pulpe zu einer neuen Faser die Markierung gänzlich gefiltert. Der Viskose-Prozess führt die Rohware durch verschiedene Filter und Sedimentierungsprozesse, die eine Kontamination durch Marker unmöglich machen. So kann Taylorlux bei der Herstellung so genannter Markierfaser die Markierung erst kurz vor dem Spinnvorgang einbringen (blauer Kasten Abbildung 1)

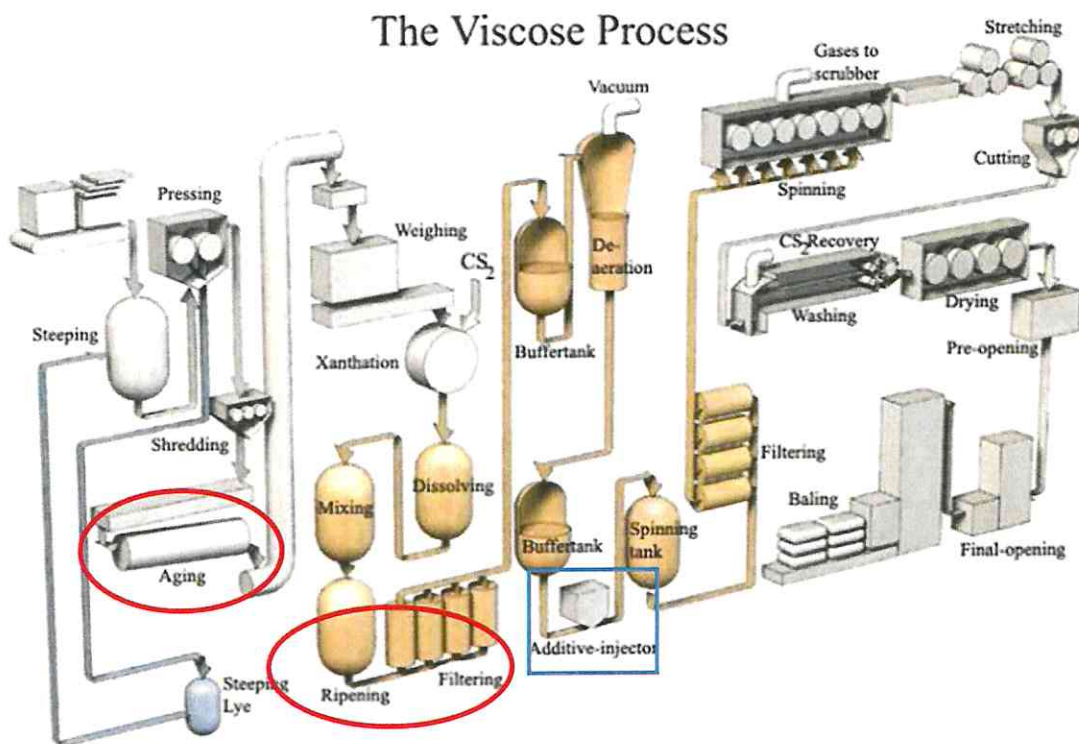


Abbildung 1¹: The Viscose Process

Beim sogenannten Aging und im Reifeprozess mit anschließender Filterung (Rote Kreise Abbildung 1) kann nachweislich keine Markierung passieren. Dieser Umstand

¹ Quelle: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:838767/FULLTEXT01.pdf>

führt zu der Erkenntnis, dass chemische Recyclingprozesse durch den Viskoseprozess gewissermaßen durch eine „Black-Box“ führen.

Exkurs „Black Box Viskoseprozess“:

Unternehmen wie Södra, Re:Newcell oder auch Infinite Fiber werden durch die Presse gefeiert und erhalten Investitionen von großen Retailern und Textilmarken. Diese Firmen verfügen jedoch nicht über eigene Viskosespinnereien, sondern bringen Ihr Produkt in Form einer Pulpe zu Viskoseherstellern. Durch den Produktionsprozess lässt sich am Ende nicht mehr nachvollziehen, welches Ausgangsmaterial genutzt wurde. Für Transparenz im chemischen Recycling ein klarer Nachteil, wenn die Produzenten nicht offenlegen, wieviel Pulpe für wieviel Viskose eingesetzt wird.

5.2.2 Chemisches Recycling PET/Kunststoffe

Bei Tests mit dem Partner Jeplan wurde die Markierung komplett aus dem neuen Produkt entfernt. Hier ergeben sich also gute Möglichkeiten, das depolymerisierte Produkt kontaminationsfrei mit einer neuen Signatur auszustatten. Weitere Tests laufen aktuell, um über die Zudosierung im Katalyseprozess der Monomere die Markierung zu implementieren und den so entstandenen Mehrwert durch einen Sensor sichtbar zu machen.

5.3 Modul 2 Prüfung mechanischer Recyclingverfahren

Für die Prüfung mechanischer Recyclingverfahren wurde ein Ortstermin bei der Firma Altex verabredet und das Konzept der Faserdosiermaschine besprochen. Die Faserdosiermaschine ermöglicht die Zugabe so genannter Markierfasern, welche ab einer Zugabe von 0,1% bereits einen Materialstrom aus Baumwollresten markieren. Da für die Markierung besonders eine homogene Einmischung notwendig ist, wurde ein Zugabeort direkt vor dem finalen Blowroom gewählt, der letzten Stufe des mechanischen Recyclings, bevor die rezyklierte Faser zu Ballen gepresst wird.

Ein weiterer Aspekt der Prüfung ergab sich aus der Fragestellung, was etwa passiert, wenn Markierungen für ägyptische Baumwolle und ökologische Baumwolle im mechanischen Recyclingstrom aufeinandertreffen. Hierzu muss man die Wege der

Sammlung und Sortierung besser verstehen. Dazu wurden Informationen bei Altex als auch bei der Veranstaltung "Alttextilmarkt in Krisenstimmung" am 19.11.2020 in einer Diskussion mit kommunalen Entsorgern eingeholt. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Textilrecycling von Baumwollfasern ist ein „heißes Thema“, dennoch werden (je nach Quellenlage) nur etwa 1% aller Textilien überhaupt recycelt.
- Öffentliche Sammlungen, die durch gemeinnützige Träger in Container im öffentlichen Raum organisiert werden, stehen in Konkurrenz zu dubiosen Firmen und sammeln oftmals mehr Abfälle als verwertbare Kleidung.
- Die Verwertung von Textilien wird durch qualitativ minderwertige Ware (Fast Fashion) zunehmend erschwert. (Diese Erkenntnis gilt im Übrigen auch für chemische Recyclingverfahren)
- Recycelte Baumwolle kann aktuell nur zu 30% und ausnahmsweise zu 50% in Mischgarnen wiederverwendet werden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Marker verschiedener Baumwollsorten in einem mechanischen Recyclingstrom erneut zusammentreffen. Allerdings ist durch die schlechte Recyclingquote und der großen Vermischungsrate von recycelter Baumwolle keine Kontamination zu erwarten, die ein verfälschtes Signal erwarten ließe. Wird die recycelte Baumwolle im Blowroom des Verwerter neu markiert, ist zu erwarten, dass ein Tailorlux-Sensor bei einem späteren Scan einen Marker für ökologische Baumwolle detektiert, gleichzeitig jedoch eine Vielzahl von Recycling Markern erkennt. Es handelt sich damit um eine Fehlergröße, die in der Software berücksichtigt werden muss.

Für einen Piloten in der Praxis hat die Firma Tailorlux zusammen mit dem Retailer Inditex, dem Verwerter Reciclados und der Spinnerei Kipas einen Versuch gestartet, bei dem Markierfasern in Tanger (Marokko) eingemischt und in der Türkei zu Garn gesponnen werden. Die daraus resultierenden Garne werden von der Saxion Universität und anderen Partnern zu Geweben verarbeitet, die dem Sensor zum maschinellen Lernen vorgesetzt werden.

5.4 Modul 3 Prototypenbau des Quantifizierungssensors

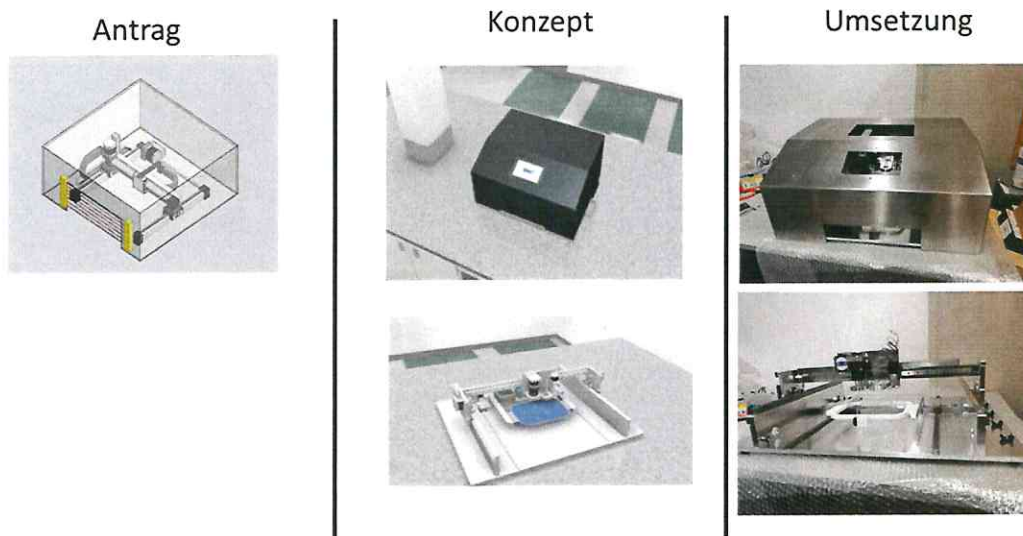


Abbildung 2: Prototypenbau des Quantifizierungssensors

Für das Design wurde mit dem Projektpartner TapDo ein Workshop nach den Richtlinien des „Design Thinking“ in zwei Arbeitsgruppen durchgeführt.

Dabei ging es vor allem um die Frage, wie man unterschiedliche Nutzer zur Einrichtung immer gleicher Messsituationen führt.

Erste Ideen im Sinne eines Flachbettscanners wurden verworfen, weil die Sensoren in verschiedenen Abständen zum Textil detektieren. Bei der Betrachtung üblicher Textilverfahren, kamen der Stickrahmen und die Einzugsrolle in die engere Auswahl. Die Zufuhr über ein Rollensystem ist jedoch sehr komplex, wenn verschiedenste Stoffe zugeführt werden sollen. Die Entscheidung fiel damit auf einen Stickrahmen, welcher dem Bediener als Schublade entgegenfährt. Das Textil wird nun eingespannt und zur Messung eingezogen. Somit können auch größere Textilien eingespannt werden, da der Rahmen die immer gleiche Messfläche definiert.

Eine Haube über dem Gerät erlaubt die maximale Anregung von Markern unter immer gleichen Fremdlichtbedingungen und schützt die Mechanik.

Der Quantifizierungssensor ist mit drei verschiedenen Analyseeinheiten ausgestattet, die sowohl zur Identifizierung des Tracers als zur Stofferkennung beitragen.

Diese sind:

- Eine Kamera mit hohem Dynamikbereich
- Ein spektrometrischer Sensor im visuellen Bereich
- Ein spektrometrischer Sensor im Nahinfrarotbereich

Das Nah-Infrarot Spektrometer kann die Materialkomposition ermitteln. Das Sensormodul operiert in einem Wellenlängenbereich von 1540nm bis 1950nm. Dieser Bereich ist besonders dafür geeignet Textilien und unterschiedliche Kunststoffarten zu erkennen, da die spektrale Absorption dieser Materialien sehr charakteristisch ist.

Das Spektrometer im sichtbaren Bereich evaluiert das Markerspektrum. Für verschiedene Materialien werden verschiedene Marker verwendet, z.B. Bio-Baumwolle oder Recycled-PET. Es werden unterschiedliche Marker für unterschiedliche Materialien verwendet, da die Einarbeitung der Markierung für Natur- oder Kunstfaser unterschiedlich ausfallen und kundenindividuelle Marker verwendet werden.

Der Kamerasensor detektiert die Markerverteilung im Textil und lässt Rückschlüsse auf Homogenität und/oder Konzentration zu.

Die Kombination dieser Sensoren und der Auswertung wurde bereits vor Beginn des Projekts als Patent angemeldet und befindet sich derzeit in der Offenlegungsphase.

Zu jeder Einheit gehört ein eigener Algorithmus (s. AP 1) zur erfolgreichen Erkennung von spektroskopischen Merkmalen im analysierten Textil.

5.5Arbeitspaket 1 Quantifizierungsalgorithmus

Der Kern des Quantifizierungsalgorithmus zur Erkennung eines unbekanntes Textils liegt in der Implementierung von Machine Learning Methoden.

Der erste Schritt bei der Anwendung solcher Methoden ist die Lernphase. In dieser Phase wird eine große Menge an Beispieldaten benötigt, anhand welcher die

komplexen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Proben erlernt werden. Diese Proben werden mit einem eigens für diesen Zweck angefertigten Prototypen gemessen. Das Gerät wird es ermöglichen, eine signifikante Anzahl von spektralen Merkmalen in einer reproduzierbaren und kontrollierbaren Umgebung zu sammeln.

Die so aufgenommenen Spektren werden anschließend algorithmisch vorverarbeitet. Das umfasst Schritte wie z.B. Glättung von Ausreißern, Skalierung der Messwerte und eine nicht-lineare Dimensionsreduzierung. Letztere wird mittels PCA („Principal Component Analysis“) realisiert und komprimiert die Daten auf weniger als 1% ihrer ursprünglichen Größe, was ihre Weiterverwendung im nächsten Schritt möglich macht.

Diese Daten werden dem eigentlichen Algorithmus zugeführt, um ein sogenanntes Neuronales Netz anzulernen. Dabei handelt es sich um ein mathematisches Modell, das in der Lage ist, Zusammenhänge in vieldimensionalen Daten zu erkennen und zu deuten. Dieses Modell ermöglicht die Einordnung einer unbekannt Probe in die richtige Kategorie, solange es in der Lernphase eine ausreichende Anzahl an Beispielen für Proben dieser Kategorie gab.

In unserer Anwendung ermöglicht dies dem Algorithmus die korrekte Erstellung von Clustern für die Tracerkonzentration in der Textilmatrix und die Sortierung einer neuen unbekannt Probe in die zugehörige Konzentrationskategorie, wodurch die korrekte Identifizierung an den Benutzer zurückgegeben wird.

Der Prozess der Lernphase wird in der Abbildung 3 grafisch dargestellt:

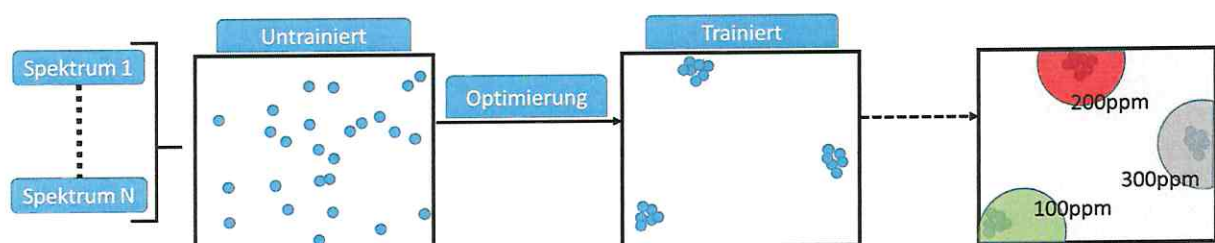


Abbildung 3: Skizze der finalen Trainingspipeline

Der Prozess der Erkennung wird in Abbildung 4 dargestellt:

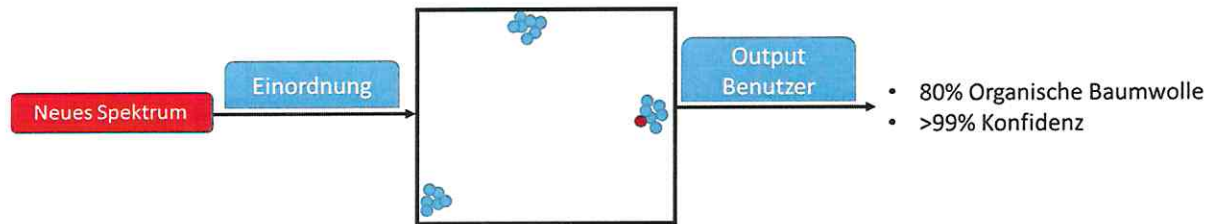


Abbildung 4: Skizze der Anwendung des finalen Modells

Spektraldaten nach der Vorverarbeitung, aber vor der Dimensionsreduzierung. Hier sind eindeutig Peaks erkennbar, es ist aber nicht möglich, die verschiedenen Markerkonzentrationen zuverlässig auseinanderzuhalten:

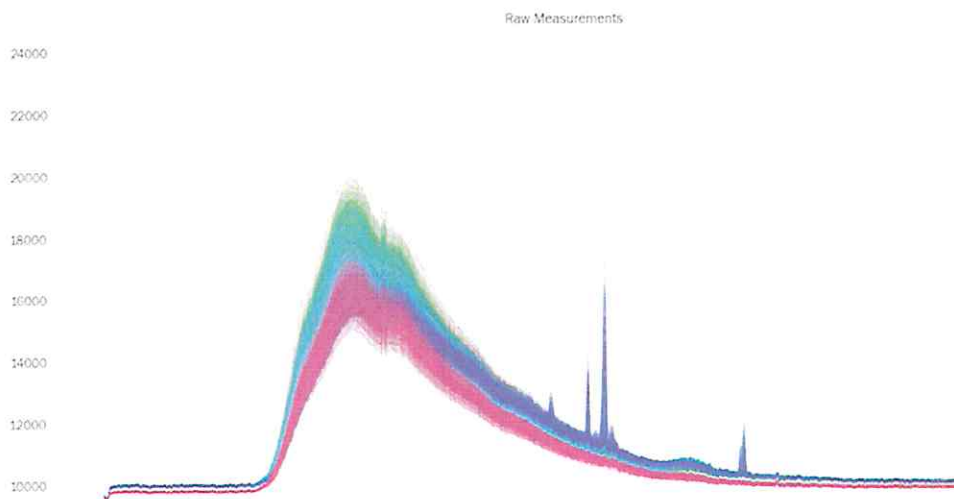


Abbildung 5 - Peaks in Spektraldaten

Spektraldaten bilden nach der Dimensionsreduzierung bereits gut erkennbare Cluster aus. Hier ist eine Reduzierung auf drei Dimensionen dargestellt, da höherdimensionale Daten nicht ansprechend visuell aufbereitet werden können. Intern arbeitet der Algorithmus mit 32 Dimensionen.

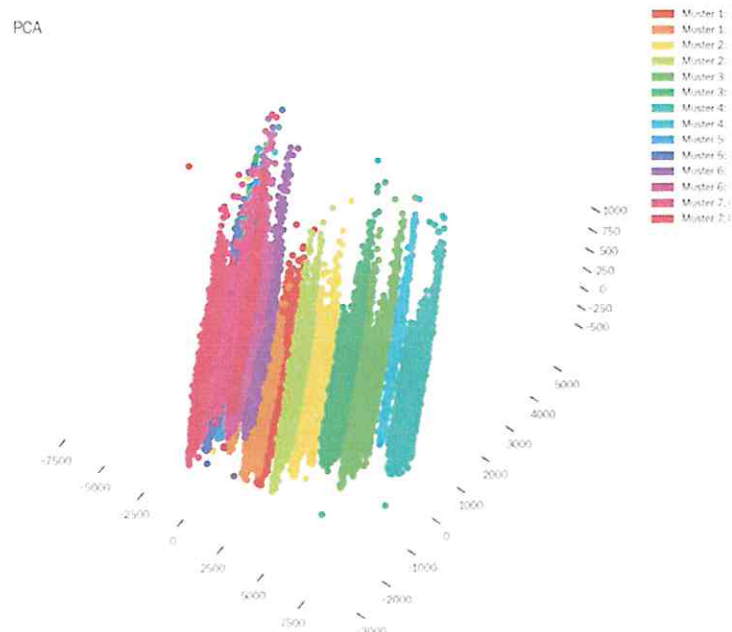


Abbildung 6: dreidimensionale Abbildung der Dimensionsreduktion mittels PCA (Principal Component Analysis)

Die Werte der dimensionsreduzierten Spektren werden auf den Bereich zwischen null und eins skaliert und können somit als Helligkeitswerte einzelner Pixel interpretiert werden. Ein höherer Wert steht für einen helleren Pixel und umgekehrt. Stapelt man mehrere Spektren in dieser Darstellung, so ergeben sich Bilder, welche dem Neuronalen Netz zur Verfügung gestellt werden. Unten ist eine Abbildung dieser Repräsentation zu sehen.

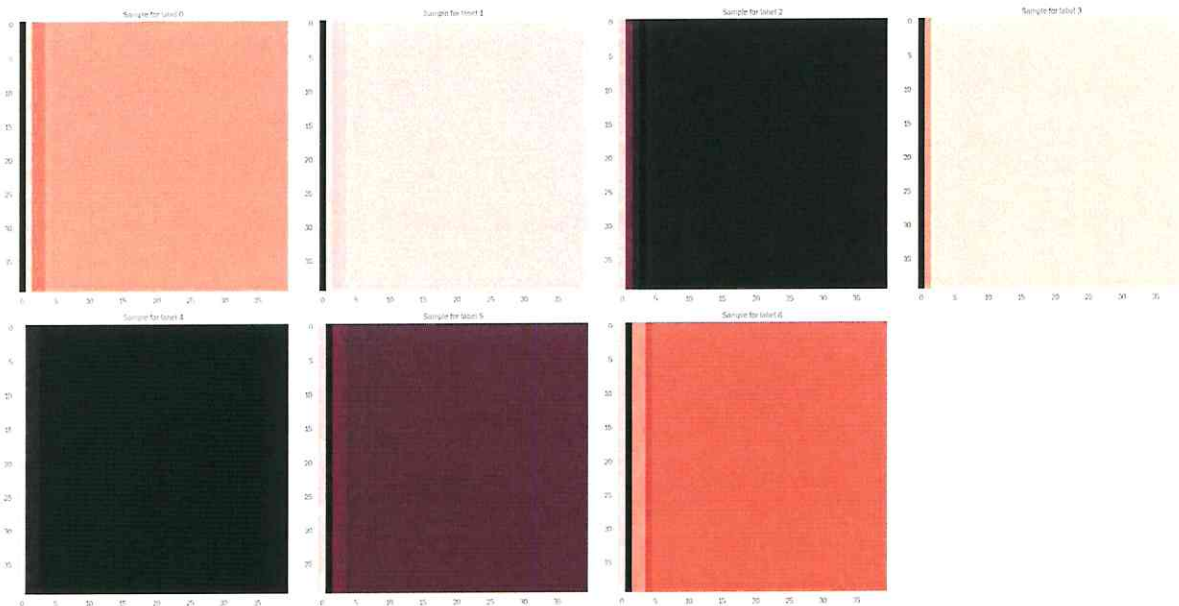


Abbildung 7: Interne Repräsentation der Spektraldaten nach Anwendung der PCA

Die Architektur dieses Neuronalen Netzes („ResNet18“) wird in der folgenden Grafik vereinfacht dargestellt. Sogenannte Skip-Connections und weitere für das Verständnis des Aufbaus weniger wichtige Komponenten wurden hier ausgeblendet. Links in der Abbildung ist in Gelb die Eingabeschicht zu sehen. Sie entspricht einem Bild aus der oben gezeigten internen Repräsentation, das 32x32 Pixel groß ist. Nach und nach durchlaufen die Bilddaten die Netzwerkstruktur von links nach rechts. Verschiedene mathematische Operationen komprimieren die 32x32 Pixel zunächst auf 16x16, dann 8x8 und schließlich 4x4 Pixel. Das ist durch die kleiner werdenden Schichten gekennzeichnet. Gleichzeitig wird jedem Pixel mehr als nur ein Wert zugewiesen, weshalb die Schichten nach rechts hin dicker werden. Die finale Ausgabe erfolgt am rechten Ende an dem sehr kleinen gelben Rechteck in Form einer Klassenzuordnung.

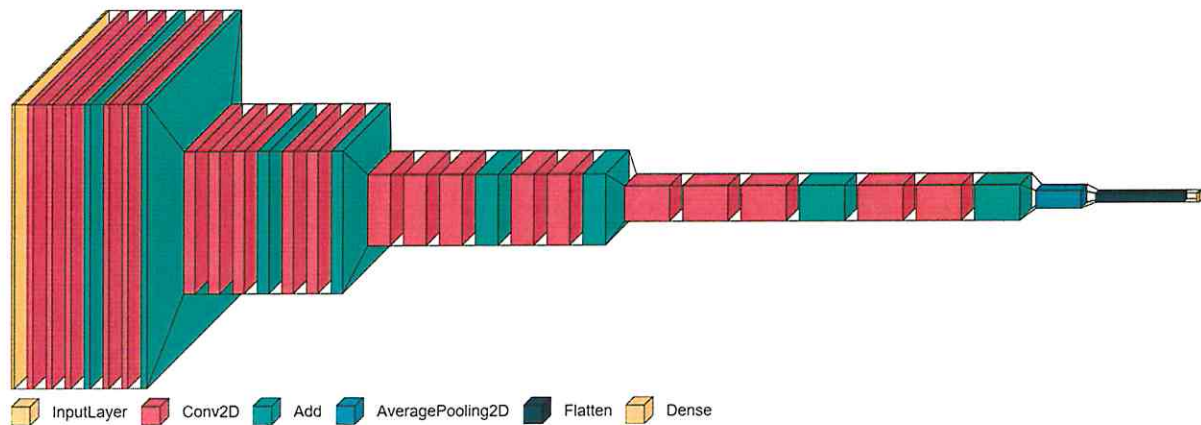


Abbildung 8: Visualisierung der Netzarchitektur

Nach der einfachen Dimensionsreduzierung mittels PCA ist es dem oben dargestellten Neuronalen Netz bereits möglich, mit einer Genauigkeit von >80% eine korrekte Zuordnung zu treffen. Eine noch genauere Aufschlüsselung der korrekten und der fehlerhaften Zuordnungen ist mit Hilfe einer sog. Confusion Matrix möglich. In den Zeilen dieser Matrix ist die tatsächlich richtige Klasse angegeben. In den Spalten ist die Ausgabe des Neuronalen Netzes zu sehen. In dem nachstehenden Beispiel kann also abgelesen werden, dass 51% der Spektren mit 0ppm auch tatsächlich der Klasse mit 0ppm zugeordnet wurden. Weitere 27% der Spektren mit 0ppm wurden fälschlich der Klasse mit 50ppm und 22% der Klasse mit 80ppm zugeordnet.

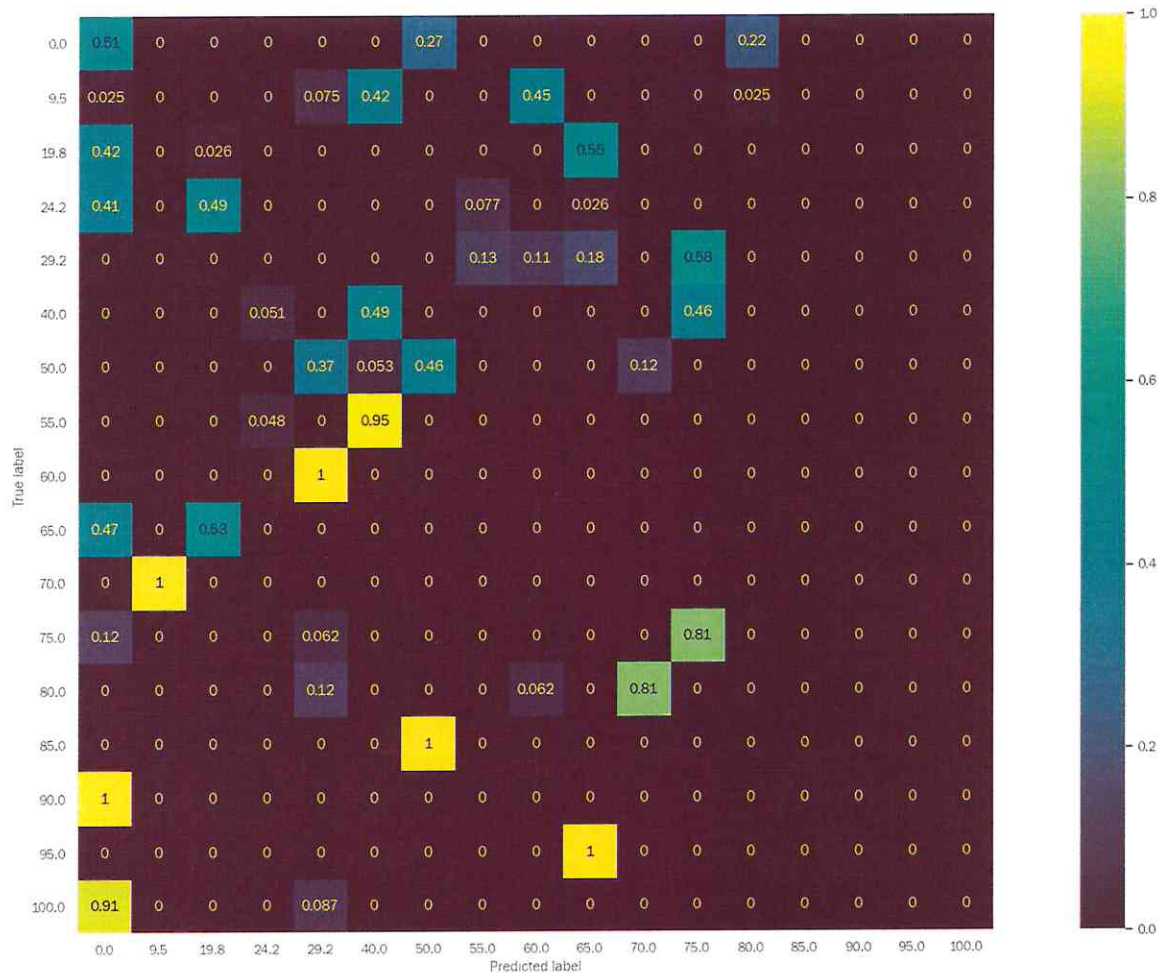


Abbildung 9: Confusion Matrix - fehlerhaft angeleitetes Netz

Es ist leicht zu erkennen, dass die Werte in dieser Matrix keinem Muster folgen. Korrekte Klassifikationen finden sich auf der Diagonalen einer Confusion Matrix wieder, da hier die tatsächliche Klasse und die vorhergesagte Klasse übereinkommen. In diesem Fall ist die Diagonale jedoch kaum besetzt, da diese Matrix auf den Ausgaben eines fehlerhaft angeleiteten Neuronalen Netzes basiert.

Die nächste Abbildung zeigt eine Confusion Matrix, wie sie nach einem erfolgreichen Training aussieht. Hier sind die Werte auf der Diagonalen gut sichtbar, da das Netz in den meisten Fällen richtig entscheidet. Selbst fehlerhafte Ausgaben des Netzes sind nah an dem eigentlichen Ergebnis angesiedelt, was die Qualität der Ausgaben weiter erhöht. Wenn eine Probe zum Beispiel mit 50ppm Marker versehen ist und von dem Netz nicht richtig klassifiziert werden kann, ist eine fehlerhafte Ausgabe von 55ppm weit wünschenswerter als eine Ausgabe von 95ppm. Diese Eigenschaft erfüllt das

Modell ebenfalls, was durch die ausschließlich eng an der Diagonalen angesiedelten Werte sichtbar ist.

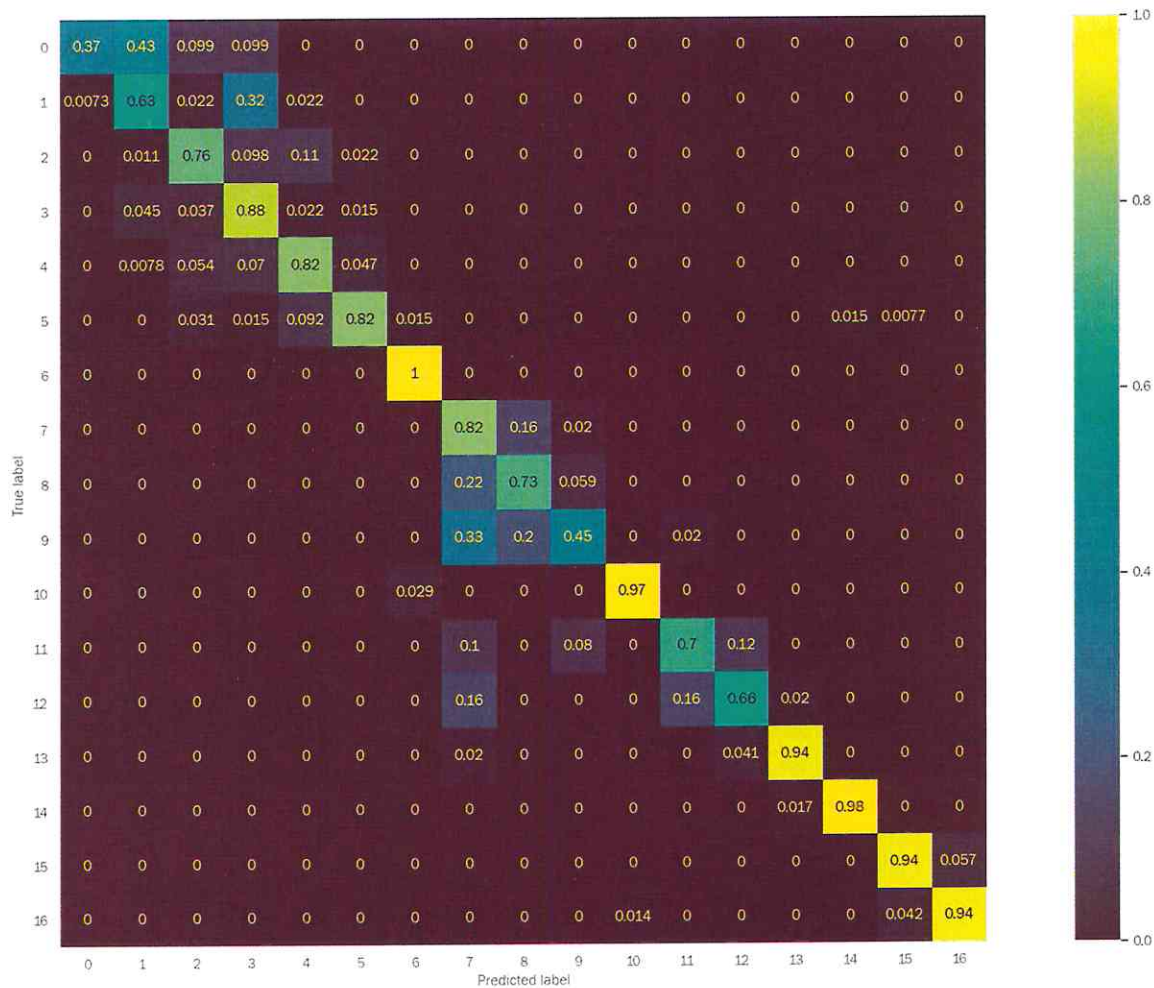


Abbildung 10: Confusion Matrix - erfolgreich angelegtes Netz

Erste Versuche mit einem alternativen Verfahren zur Dimensionsreduktion (UMAP), das die PCA ersetzen würde, sind vielversprechend. Verglichen mit den Darstellungen, die von der PCA berechnet wurden, bleibt in dieser Repräsentation ein höherer Datengehalt erhalten. Das ist in Abbildung 12 daran erkennbar, dass die Darstellungen über alle Dimensionen (Spalten) hinweg signifikant unterschiedliche Farben aufweisen. Die Darstellungen in Abbildung 7 haben diese Eigenschaft nicht: in den Bildern weiter rechts liegende Spalten ähneln sich farblich sehr und "verwaschen", wodurch der tatsächliche Informationsgehalt sinkt.

Weitere Versuche und Optimierungen sind geplant.



Abbildung 11: dreidimensionale Abbildung der Dimensionsreduktion mittels UMAP

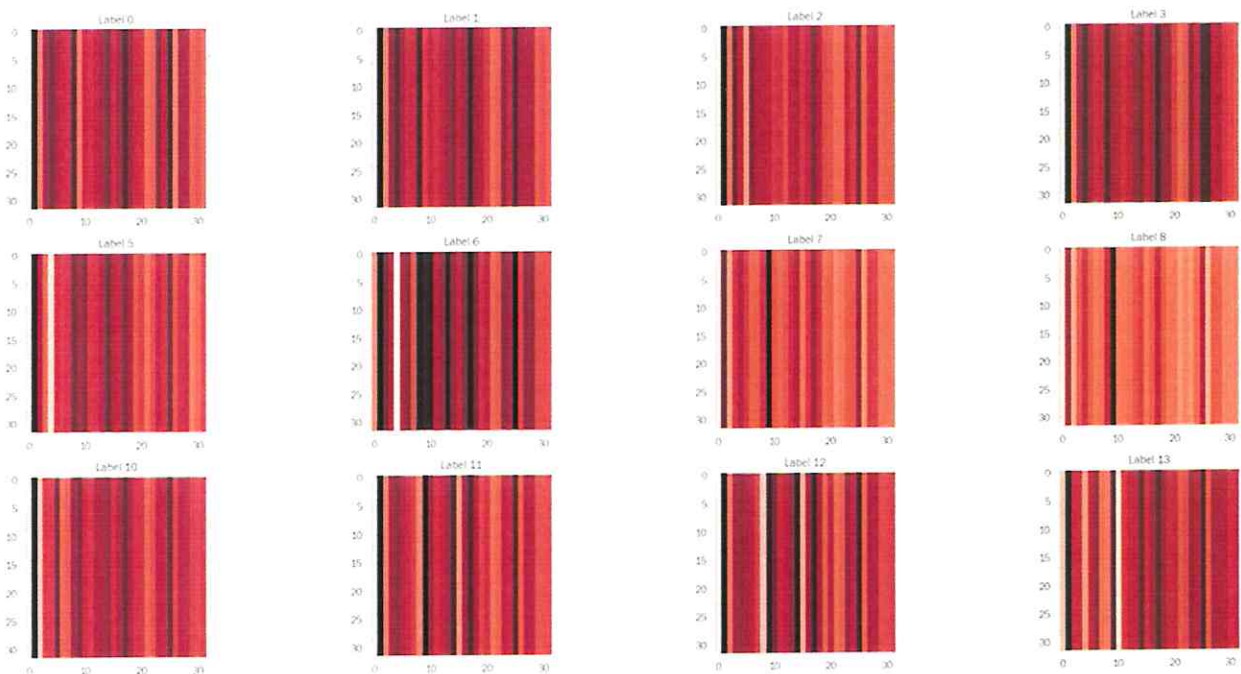


Abbildung 12: Interne Repräsentation der Spektraldaten nach Anwendung von UMAP

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Genauigkeit des Neuronalen Netzes stellt ein alternatives Konzept der zu lernenden Ausgabe dar: das Netz kann so angeleitet werden, dass es statt Klassenzuordnungen, die Parameter von Gaußverteilungen ausgibt. Das hat zwei Vorteile:

- zum einen wird der Probe nicht mehr eine Klasse, sondern ein konkreter ppm-Wert zugeordnet, der auch zwischen den Werten der ursprünglich zum Anlernen genutzten Klassen liegen kann, was eine hochauflösendere Einteilung erlaubt.
- Zum anderen gibt das Netz zusätzlich ein Konfidenzintervall aus, sodass unsichere Zuordnungen weiter untersucht werden können.

Die Arbeit wird weiter fortgesetzt.

5.6 Arbeitspaket 2: Mechanischer Aufbau und Mustermatrix

Das NIR Modul muss über eine Firmware in den Sensor integriert werden, um Erkenntnisse aus der Materialerkennung mit der Detektion der Markierung abzugleichen. Dabei stützt sich Taylorlux auf die bewährte Zusammenarbeit mit TapDo und konnte einen Werkstudenten für den Anteil der „Computer Vision“ gewinnen. TapDo hatte bereits im zurückliegenden Projekt „Rückverfolgbarkeit und Quantifizierung von Biobaumwolle“ gezeigt, dass die Quantifizierung von markierter Baumwolle an einem Kardenband möglich ist. Dieses Know-How wurde nun auf den Sensor übertragen und mit der NIR-Dimension ergänzt. Dazu werden Viskose, Baumwolle, PA, PP und PET Textilien in einer Referenzdatenbank erfasst.

Damit der Quantifizierungsalgorithmus richtig trainiert werden kann, ist eine Basis von geeigneten Proben erforderlich. In Hinblick auf die großen Unterschiede in Bezug auf Materialien, Oberflächen, Farben und insgesamt Herstellungsmethoden bei den Mustern, die Taylorlux von den Industriepartnern erhält, wurde beschlossen, eine neue Serie von Mustern mit bekannten und kontrollierten Spezifikationen zu erstellen.

Das Material der Wahl für die Produktion ist Baumwolle. Um eine Referenz für weitere Studien im Bereich der Textilfarben zu haben, wurde das natürliche Weiß der Baumwolle für die Probenherstellung beibehalten. Für den ersten Datensatz wurde Baumwollgewebe mit einem Gehalt von 100 ppm an 10 % mit Tracer angereicherten Fasern verwendet. Die erste Produktion wurde in zwei Teilproduktionen aufgeteilt:

- Nicht markierte Kette mit Mischung aus markiertem und nicht markiertem Schuss

- Markierte Kette mit Mischung aus markiertem und nicht markiertem Schuss

Eine Vermischung in der Kette ist möglich, es gibt aber zwei Faktoren, die dagegensprechen:

- Sobald die Probe um 90 Grad gedreht wird, geht die Kette- oder Schuss-Information verloren.
- Die Herstellung einer Kette ist ein arbeitsintensiver Prozess, der bei Proben mit einer Breite von 30 cm bis zu 2 Tage dauert.

Daher wurde die Entscheidung getroffen, die Mischung verschiedener Garne nur im Schuss zu begrenzen.

Vorversuche mit einer feinen und einer groben Matrix, die das gleiche Tracer-Material enthalten, haben gezeigt, dass die Dicke des Garns in den verschiedenen Proben keinen Einfluss auf die Messungen und die spektralen Ergebnisse hat. Dadurch war es möglich, Materialien (Garne) verschiedener Dicken für die Herstellung von Mustern sowohl in der Teilproduktion als auch zwischen Teilproduktionen zu mischen. Es wurde beschlossen, die Vermischung nach Materialmengen (Masse) zu berechnen.

Die erste Teilproduktion enthält die folgenden Proben, da die Kette für alle Proben gleich ist, wird sie nur einmal beschrieben:

- Muster 1: Kette: 100% unmarkiertes Material | Schuss: 100% markiertes Material
- Muster 2: Schuss: 20% unmarkiertes Garn | 80% markiertes Garn
- Muster 3: Schuss: 40% unmarkiertes Garn | 60% markiertes Garn
- Muster 4: Schuss: 60% unmarkiertes Garn | 40% markiertes Garn
- Muster 5: Schuss: 80% unmarkiertes Garn | 20% markiertes Garn
- Muster 6: Schuss: 100% unmarkiertes Garn (Blindprobe)
- Muster 7: Schuss: 50% unmarkiertes Garn | 50% markiertes Garn

Die nächsten Musterproduktionen werden die Fälle von PET/R-PET-Mischungen sowie von Materialmischungen wie Baumwolle/PET abdecken. Es war besonders schwierig, eine geeignete Quelle für R-PET-Material für die Musterherstellung zu

finden. Wie in 6.3 dargestellt, gibt es einen vielversprechenden Ansatz zur Erkennung von R-PET versus PET mittels NIR-Analyse. Auf der Seite der Proben müssten jedoch R-PET Referenzen vollstufig hergestellt werden, d.h. gewaschene Flakes, Granulat-Mischung und Garnerstellung unter kontrollierten Bedingungen hergestellt werden, dies war im Projektzeitraum und im Projektbudget nicht möglich. Die über die ganze Projektdauer anhaltende „Polymerkrise“ machte die Situation nicht einfacher. Es war nicht möglich ein Textil zu beziehen dessen Ausgangspolymer bekannt gewesen wäre.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Markierung und Transparenz in chemischen Recyclingprozessen

Die Ergebnisse zeigen, dass die industriellen Recyclingprozesse immer mindestens einen Prozessschritt zur Homogenisierung aufwiesen, die einen kausalen Zusammenhang zwischen Quantität von Markern und Rezyklat-Anteil erlauben. Die Markierungen selbst haben keinen negativen Einfluss auf textile Recyclingprozesse bzw. können das neue Signal für recycelte Ware kaum verfälschen. Grundsätzlich ist es also möglich, recycelte Bestände zu markieren, um ihren besonderen Wert gegenüber Neuware zu kennzeichnen und deren Quantität in Stoffen nachzuweisen. Dabei nahm das Projekt keinerlei Bewertung hinsichtlich der ökologischen Bilanz von chemisch recycelten Stoffen vor. Im Vordergrund des Projektes stand der grundsätzliche Nachweis einer möglichen Quantifizierung von Rezyklat in Flächentextilien zum Nachweis von Recyclingquoten, zur Weiterverwendung in einem Produktpass.

6.2 Machine Learning und Textile Muster

Durch zahlreiche Anfragen und Einladungen an ähnlichen Projekten teilzunehmen, stellen wir abschließend fest, dass die Deutsche Bundesumweltstiftung ein Projekt gefördert hat, welches am Puls der Zeit ist. Die Erstellung von Datenbanken und Sensoren zur Erhöhung der Recyclingquote mit werthaltigen und möglichst homogenen Stoffströmen hat gerade erst begonnen und Taylorlux hat mit drei

Sensortypen Möglichkeiten aufgezeigt, mehr Transparenz in textiles Recycling zu bringen.

Taylorlux hat hier eine einzigartige Pionierarbeit leisten dürfen, die im Rahmen der weiteren Entwicklung auf phänomenale Ergebnisse hoffen lässt.

6.3 Stofferkennung mit NIR und die Möglichkeit R-PET und PET ohne Markierung zu unterscheiden

Für dieses Projektziel konnten keine signifikanten Proben eingeholt werden. Die Frage nach der Authentizität und dem tatsächlichen Gehalt an Rezyklat löst teilweise zynischen Antworten im Markt aus. So konnte Taylorlux ein Muster selbst erstellen, um festzustellen, dass das Projektziel damit nicht erreicht werden konnte:

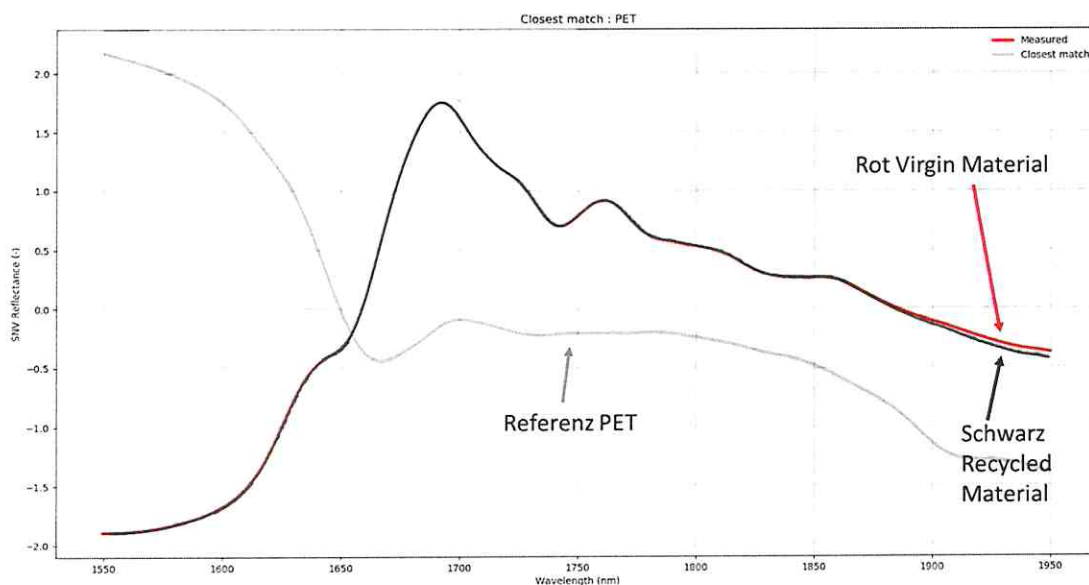


Abbildung 13: NIR Spektrum Virgin PET vs. Recycled PET

Zwar zeigen die Proben einen Ansatz zwischen 1900nm und 1950nm die eine Hypothese zur grundsätzlichen Machbarkeit stützen würden, allerdings muss neben der geringen Mustervielfalt folgendes festgestellt werden:

- Die absolute Intensität und Wellenlängenstabilität des NIR-Spektrometers muss so gewählt werden, dass geringe Probenmengen zu aussagekräftigen Informationen führen oder deutlich größere Mengen an Daten genommen werden.

- Die Vielfalt der PET Nachbehandlung hinsichtlich Farbe, Ausrüstung und Coatings ist ein Problem für die Erkennung.

Die Grundsätzliche Stofferkennung funktioniert und kann sehr gut in das Gesamtergebnis integriert werden:

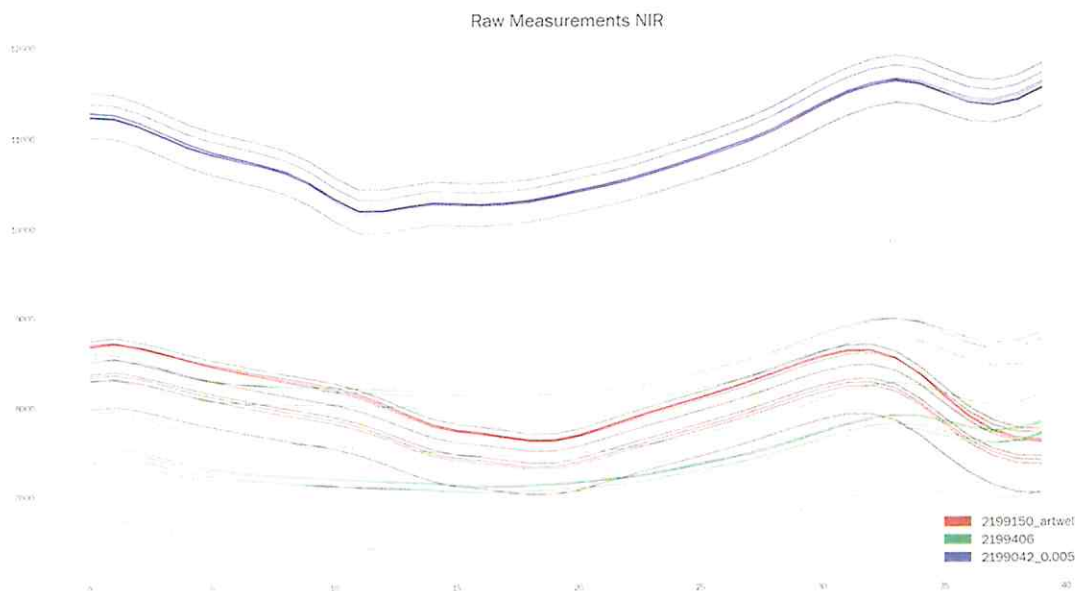


Abbildung 14: NIR Spektren von Jeans=Blau, Baumwolle = Grün und Cashmere=Rot

Aus Abbildung 14 ist jedoch zu erkennen, dass die spektrale Antwort des Materials im NIR sensorbedingten Schwankungen unterliegt, jedoch ist die Form des Spektrums für die unterschiedlichen Materialien gleich. Dadurch wird ersichtlich, wie wichtig eine ausreichende Datenlage für die sichere Wiedererkennung von unterschiedlichen Materialien ist. Dies verifiziert die Annahme zur Analyse von Abbildung 13. Für eine bessere Datenlage muss recyceltes Gewebe vollstufig unter kontrollierten Bedingungen hergestellt werden und ein zukünftiger NIR Sensor muss besser auflösen (siehe auch 5.6) können, um kleinste Abweichungen zu detektieren. Taylorlux hat die Schwächen des verwendeten NIRONE Sensors analysiert und eine eigene NIR-Spektrometer Entwicklung angestoßen, die in Quartal II 2022 in ein Handgerät einfließen sollen. Neben der Markierung ist NIR-Spektroskopie ein wesentlicher Erfolgsfaktor der Materialerkennung.

6.4 Kameraerkennung

Die Kameraerkennung wurde zunächst nur als einfaches Erkennungshilfsmittel installiert, um spektrale Daten besser einordnen zu können. Im Projektverlauf konnte jedoch bewiesen werden, dass sich Verschnitt im Weben erkennen lässt. So kann etwa ein Gewebe welches nur zu 50% aus recyceltem Garn gewebt wurde durch die Kamera erkannt werden.

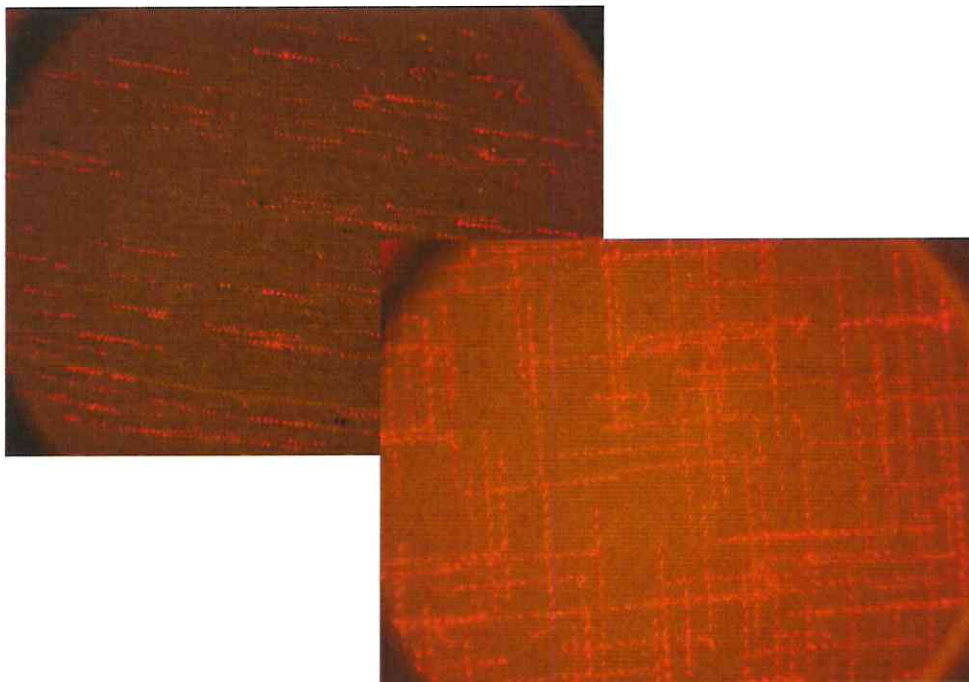


Abbildung 15: Tracerfaser im Textil

Die Kameraerkennung wird in Verbindung mit dem NIR-Sensor auch im Falle von Textilien Nachbearbeitungsprozessen eine größere Rolle spielen. So ist es wahrscheinlich, dass PU-Coatings und Färbeverfahren erkannt werden können. Es gibt erste Hinweise, dass das wasserschonende „Dry-Indigo-Verfahren“ mit dieser Methode erkannt werden kann. Problematisch sind die Filter der Kamera, da diese theoretisch für jeden Marker individuell gesetzt werden müssen. Für eine Überführung in ein Handgerät gibt es noch kein Konzept.

6.5 Der Sensormix und Neuronale Netzwerke

Der Mix aus Stofferkennung, Markererkennung und Kamera wird auch die weitere Sensorentwicklung von Taylorlux prägen und ultimativ in einem Handgerät aufgehen.

Die erstellten Muster sind eine Datenbasis, die auch von anderen Projekten zu textiler Transparenz genutzt werden können. Die durch das Projekt geförderte Materialvielfalt ist nach erstem Feedback von Projektpartnern einzigartig. Das Verifikationsunternehmen Eurofins ist ebenfalls an den Daten interessiert. So könnte eine ausreichende Zahl von Referenzdaten in einer Datenbank dezentralen Prüfstellen zur Verfügung gestellt werden. Taylorlux zieht daraus die Erkenntnis, dass ein angelerntes System auf immer gleichförmige Sensordaten zurückgreifen muss und hat im September 2021 eine neue Sensorentwicklung initiiert, die einen verbesserten NIR und UV/VIS-Sensor zum Ziel haben. Diese Sensoren lassen sich durch einen einzigartigen Produktionsprozess immer gleich kalibrieren und können so der dezentralen Datenerhebung einer Materialdatenbank dienen.

7 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das ARD Format „W..Wie Wissen“ sendete am 05.12.2020 einen Beitrag der den Besuch von Taylorlux bei Altex zum Gegenstand hatte.

Auf der Basis der Pressemitteilung der deutschen Bundesstiftung Umwelt, meldeten sich unter anderen zwei Verbände bei Taylorlux. Im Ergebnis dieser Gespräche ist Taylorlux dem Netzwerk ReNewTex beigetreten, wo aktuell eine Markierung für das Recycling von Teppichen und anderen Bodenbelägen entwickelt wird. Der Organisator, das Institut für Forschung, Prüfung und Zertifizierung (<https://www.tfi-aachen.de/>) ist von den ersten Ergebnissen überzeugt und möchte dazu vermutlich einen ZIM Antrag stellen.

Taylorlux hat das Projekt außerdem beim Zentralverband Textil+Mode vorgestellt.

8 Fazit

Das Projekt hat in vielerlei Hinsicht neue Impulse für Transparenz in textilen Recyclingprozessen geschaffen. Wichtigster Grundstein ist die Erkenntnis, dass die bereits bei der Biobaumwolle eingesetzte Markierungstechnologie auch in textilen Recyclingprozessen eingesetzt werden kann. Sowohl beim chemischen als auch

mechanischen Recycling sind keine Signalverfälschungen zu erwarten. Recycelte Fasern und Polymere können sicher markiert werden, um „Greenwashing“ zu vermeiden. Vielmehr kann die Verwendung dieser Fasern auch in einem Flächengewebe zerstörungsfrei nachgewiesen werden.

Der dafür entwickelte Prototyp setzt einen, nach heutigem Kenntnisstand weltweit einzigartigen Sensormix ein, um die Zusammensetzung von Textilien mit künstlicher Intelligenz zu analysieren. Auch wenn ein Unternehmen wie Eurofins grundsätzliches Interesse an einem solchen Verifikationsgerät zeigt, so muss die weitere Entwicklung ultimativ in ein Handgerät münden, um an verschiedenen Punkten der textilen Wertschöpfung aber auch in anderen Industrien eingesetzt zu werden. Beinahe in jedem Industriezweig gibt es digitale Konzepte wie die Blockchain zur Verbesserung von Transparenz und Materialauthentizität aber keine physischen Analysen, die solche Konzepte auch stützen.

Eine zentrale und selbstlernende Datenbank zur Materialanalyse braucht neben Markern und VIS-Spektroskopie auch einen NIR Sensor. Das nun abgeschlossene Projekt konnte nicht alle Ziele hinsichtlich der NIR-Erkennung erreichen, hat aber wertvolle Grundlagen geschaffen, die in ein weiterentwickeltes Gerät einfließen werden.

Zu einem umfassenden Fazit gehört auch den Stellenwert der Mustererstellung nochmals hervorzuheben. Durch das geförderte Projekt konnte eine einzigartige Vielfalt von textilen Mustern erstellt werden. Diese Muster sind die Grundlage für den Aufbau des neuronalen Netzwerkes. Dieses Netzwerk erkennt und klassifiziert die erstellten Muster schon heute mit einer Genauigkeit von >90%. Das heißt, dass eine einzelne Probe, die dem Algorithmus präsentiert wird, mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90% der korrekten Klasse zugeordnet wird. Weitere Forschung in Richtung alternativer Vorverarbeitung und stochastischer Repräsentation der Daten wird das Modell weiter verbessern

Das Projekt hat einen funktionalen Prototypen hervorgebracht und erstmals Sensordaten, Markierung und künstliche Intelligenz in einem Gerät kombiniert.

Taylorlux wird dieses Projekt selbstständig fortführen und hat dazu folgende Maßnahmen getroffen:

- Die Mustererstellung geht durch textile Projekte weiter und jedes erstellte Kundenmuster erweitert die Datenbank.
- Taylorlux hat eine eigene VIS/NIR Entwicklung begonnen, die eine neue Sensorplattform schaffen wird.
- Die Hochschule Niederrhein und Saxion haben Interesse an einer Kooperation zum weiteren Ausbau der Materialdatenbank.
- Anfertigung einer Masterarbeit über das Thema.

Der Markt verlangt nach Lösungen, die zur Klarheit über die Verwendung von recycelter Waren beitragen. Die ambitionierten Recyclingquoten und Emissionsabgaben werden diesen Trend noch verstärken. Das vorliegende Projekt markiert einen ersten Meilenstein auf dem Weg zu einer technischen Möglichkeit die Recyclingquote in textiler Wertschöpfung tatsächlich nachzuweisen und Ideen wie den Produktpass zu verbessern.

29.09.2021



Datum, Unterschrift