



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit

**Auswirkungen äußerer Einflussfaktoren auf die nahinfrarot-
basierte Erkennung und Detektion von Kunststoffen**

November 2018

Thomas Spanlang, BSc

Die Eidesstattliche Erklärung muss unterschrieben und mit Datum versehen in Ihre Abschlussarbeit eingebunden werden.

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 07.11.2018

Unterschrift Verfasser/in
Thomas, Spanlang
Matrikelnummer: 00535192

DANKSAGUNG

Vorab möchte ich mich kurz bei all jenen bedanken, die mich während der Ausarbeitung und der Verfassung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Bastian Küppers, MSc., der meine Arbeit betreut und begutachtet hat und mich mit hilfreichen Anregungen und konstruktiver Kritik stets unterstützt hat, herzlich bedanken.

Auch allen anderen Mitarbeitern des AVAW, die mir in jedweder Form Unterstützung haben zukommen lassen, möchte ich auf diesem Weg meinen Dank aussprechen.

Einen speziellen Dank möchte ich abschließend an meinen Vater, meine Mutter, meine Schwester und besonders meine Ehefrau richten, die mich nicht nur während der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben, sondern auch während all der Jahre meines Studiums stets zu mir gestanden haben.

Thomas Spanlang

Weibern, 07.11.2018

Kurzfassung

Auswirkungen äußerer Einflussfaktoren auf die nahinfrarot-basierte Erkennung und Detektion von Kunststoffen

Bei der Sortierung von Kunststoffen wird die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) schon seit meinen Jahren eingesetzt. Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Erkennung und den Auswirkungen äußerer Einflüsse auf verschiedene, gängige Kunststoffarten, welche mit Hilfe der NIRS untersucht und analysiert werden.

Im theoretischen Teil wird zu Beginn allgemein auf das Thema Kunststoffe eingegangen. Nach einem Überblick zur geschichtlichen Entwicklung werden Informationen zu den untersuchten Kunststoffarten angegeben, gefolgt von einem Exkurs in das Recycling dieser Materialien. Im Anschluss wird die Thematik der sensorgestützten Sortierung besprochen. Der allgemeine Aufbau eines Sortierstandes und die verschiedenen Sensortypen werden vorgestellt. Die in dieser Masterarbeit verwendete Nahinfrarottechnik wird erläutert.

Im praktischen Teil wird der Aufbau des benutzten Sortierstandes beschrieben. Danach werden die Wirkungen verschiedener oberflächlicher Einflüsse, wie Schmutz, Feuchtigkeit, Treibstoffe oder auch die mittelfristige Einwirkung von Witterung auf die Kunststoffe dargestellt. Mögliche Veränderungen des Infrarotspektrums, welches im Bereich zwischen 1000 und 1700 nm betrachtet wird, werden dokumentiert. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse analysiert und ein Resümee gezogen.

Abstract

Effects of external influences on near-infrared-based identification and detection of plastics

For classifying plastics, the near-infrared spectroscopy (NIRS) has already been used for several years. The present master thesis concerns about the detection and effect of external influences on various common sorts of plastic, which are being examined and analysed by NIRS.

The theoretical part begins with an introduction on the topic on plastics. After an overview of the historical development, information of the examined kinds of plastics is given, followed by a digression about recycling of these materials. Afterwards the topic of sensor based sorting technology is being discussed. The general settings of a sorting stand and various types of sensors are introduced. The near infrared technique, which is applied in this master thesis is also explained.

The practical part describes the experimental construction of the used sorting stand. Then superficial influences, such as dirt, moisture, fuel or the medium term effect of weather on the plastics are presented. Changes on the infrared spectrum, in a region between 1000 and 1700 nm, are recorded. In conclusion the gathered results are analysed and a resume is drawn.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	3
2 GRUNDLAGENTEIL.....	4
2.1 Grundlagen Kunststoffe	4
2.1.1 Entwicklung der Kunststoffe	4
2.1.2 Grundlegende Eigenschaften von Kunststoffen	7
2.1.3 Einteilung der Kunststoffe	10
2.1.4 Chemikalienbeständigkeit	12
2.1.5 Witterungsbeständigkeit.....	12
2.2 Die verwendeten Kunststoffe im Detail	13
2.2.1 Polyethylene (PE)	13
2.2.1.1 PE-HD.....	14
2.2.1.2 PE-LD	15
2.2.1.3 PE-LLD	16
2.2.2 Polypropylen (PP).....	17
2.2.3 Polyvinylchlorid (PVC)	18
2.2.4 Polystyrol (PS).....	20
2.2.5 Polyethylenterephthalat (PET)	22
2.2.6 Thermoplastisches Polyurethan (TPU).....	22
2.2.7 Landfill Mining.....	24
2.3 Recycling von Kunststoffen.....	24
2.3.1 Aufbereitung vor Sortierung	25
2.3.2 Werkstoffliches Recycling	26
2.3.3 Stoffliches Recycling	26
2.3.4 Energetische Nutzung.....	26
2.4 Sensorgestützte Sortierung	27
2.4.1 Entwicklung der sensorgestützten Sortierung	27
2.4.2 Möglichkeiten des Aufbaus eines sensorgestützten Sortierstandes	27
2.4.3 Die eingesetzten Sensortypen	29
3 PRAKTISCHER TEIL.....	34
3.1 Übersicht Sortierstand	34
3.1.1 Geräteteile	34

3.1.2	Helios Optimizer	37
3.2	Spektren der Kunststoffe	39
3.2.1	Rohspektren ohne Einflüsse	39
3.2.2	Unterschiede Oberfläche glatt/rau.....	40
3.2.3	Simulation der Reinigung der Kunststoffe (Wasser, Spülmittel, Seife).....	40
3.2.4	Einflussfaktor petrochemische Flüssigkeiten (Öl, Benzin, Diesel)	41
3.2.5	Einflussfaktor Alterung (Witterung, Temperatur)	43
3.2.6	Chemische Einflussfaktoren.....	44
3.2.7	Verschmutzung durch Anhaftungen	45
4	ERGEBNISSE / DISKUSSION	46
4.1	Rohspektren und abgeleitete Spektren der Kunststoffe ohne Einflüsse	47
4.2	Spektren von Verunreinigungen ohne Kunststoffe.....	53
4.3	Auswirkungen von verschiedenen äußeren Einflüssen.....	56
4.4	Fazit / Resümee.....	76
5	ZUSAMMENFASSUNG	78
6	VERZEICHNISSE	I
6.1	Literatur.....	I
6.2	Abkürzungsverzeichnis	II
6.3	Tabellen	III
6.4	Abbildungen	III

1 Einleitung

Die Betreuer dieser Masterarbeit waren Herr Univ.-Prof. DI Dr. mont. Roland Pomberger und Herr Bastian Küppers, MSc.

Kunststoffe sind aus der heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Die Produktionszahlen steigen seit Jahrzehnten konstant und mit ihnen die Dringlichkeit des Themas der Verwertung bzw. der Entsorgung der anfallenden Kunststoffabfälle. Um dies zu bewerkstelligen müssen neue Wege gefunden werden, um die Kunststoffe noch sortenreiner zu trennen. Eine Technologie die sich dabei als geeignet erweist ist die Nah-Infrarot-Spektroskopie.

1.1 Problemstellung

Der sensorgestützte Sortierstand des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) bietet durch die Kombination von Visuellen-, Nahinfrarot-, und induktiven Sensoren die Möglichkeit zur Sortierung von Stoffen. Eine zentrale Thematik ist hierbei die möglichst fehlerfreie Erkennung und Trennung von verschiedenen Kunststoffsorten anhand ihres Infrarotspektrums. Da die entsprechenden Kunststoffe nun bereits anhand ihrer Spektren im Nahinfrarotbereich, zwischen 1000 und 1700 nm, eindeutig zugeordnet werden können, wird in dieser Masterarbeit ein zusätzlicher Schritt durchgeführt, indem die Spektren durch äußere Einflüsse einer Veränderung unterzogen werden. Da Kunststoffe in der Realität mit Ölen, Treibstoffen und Wasser in Berührung kommen, bei verschiedenen Außentemperaturen sortiert oder auch für einige Wochen im Freien gelagert werden, werden diese und weitere Faktoren auf die Kunststoffproben angewendet. Die Frage wie weit sich dadurch die Erkennung der Fraktionen verändert, oder ob die simulierten Einflüsse keine Änderung mit sich bringen, wird dadurch geklärt.

1.2 Zielsetzung

Zunächst wird theoretisch in die Themen der Kunststoffe und der sensorgestützten Sortierung eingeführt. Die verwendeten Kunststoffe und Geräte werden beschrieben und der Stand der Technik dargestellt. Nach einer Übersicht der reinen Kunststoffspektren werden die einzelnen äußeren Faktoren darauf angewendet und die gesammelten Ergebnisse dokumentiert und erläutert.

2 Grundlagenteil

In diesem Kapitel erfolgt sowohl ein Überblick über die Thematik der Kunststoffe, als auch über die sensorgestützte Sortierung, im Speziellen wird auf die Technik der Nahinfrarotspektroskopie eingegangen. Nach einem kurzen historischen Überblick folgen Informationen zu markanten Eigenschaften der Kunststoffe, durch die diese eine einzigartige Stellung in der modernen Welt erlangen. Es folgt eine generelle Einteilung und danach eine Beschreibung der für diese Arbeit relevanten Arten.

Darauf folgt das Thema der sensorgestützten Sortierung. Auch hier wird mit einer historischen Übersicht begonnen, gefolgt von einer Betrachtung der gängigsten Sensorsysteme. Als Kern der Arbeit wird detailliert auf die Nahinfrarot-Sensoren mit den zugehörigen Themen eingegangen.

2.1 Grundlagen Kunststoffe

Zum besseren Verständnis der Auswirkungen der Einflüsse wird das Thema Kunststoffe vorab genauer behandelt.

2.1.1 Entwicklung der Kunststoffe

Menschen verwenden seit jeher Polymere wie Holz, aus Tierhäuten gegerbtes Leder oder aus Naturfasern hergestellte Textilien. Dabei wurden vorkommende, vorhandene Materialien verarbeitet (Menges et al. 2011:1).

Ein wichtiger Vorläufer von Kunststoffen ist Naturkautschuk. Mit dem aus milchigen Baumsäften (Latex) gewonnenen Naturstoff begann in der ersten Hälfte des 19. Jahrhundert die Kautschukindustrie. Die Entdeckung der Vulkanisation (Umwandlung von Kautschuk in Gummi durch Erhitzung und Zusatz von Schwefel) durch Goodyear war dafür ein wichtiger Meilenstein. Gummi wurde in der Elektroindustrie für Isolationszwecke und ab Beginn des 20. Jahrhunderts in der Autoindustrie verwendet (Menges et al. 2011:1f).

Die gezielte Umwandlung von Naturstoffen in die heute unter dem Begriff „Kunststoffe“ bekannten Materialien begann in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Die ersten Produkte waren Celluloid (aus Cellulose chemisch umgewandelt) und Kunstseiden (Menges et al. 2011:2).

Heute werden als Kunststoffe Stoffe bezeichnet, die hauptsächlich aus Makromolekülen organischer Verbindungen (Polymeren) bestehen, die synthetisch oder durch Umwandlung von Naturprodukten entstehen. Bei der Verarbeitung sind sie unter bestimmten Bedingungen (Wärme oder Druck) plastisch formbar. Bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften werden Kunststoffe in drei Gruppen eingeteilt: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere (Menges et al. 2011:2).

Eine größere wirtschaftliche Bedeutung erlangten die Kunststoffe erst in den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts, nachdem der deutsche Nobelpreisträger Hermann Staudinger mit dem

Erstellen des Modells vom Aufbau der Kunststoffe aus Molekülketten die wissenschaftliche Grundlage für die Herstellung synthetischer Thermoplaste gelegt hatte. Einen zusätzlichen Schub bekam sie durch die Autarkiebestrebungen Deutschlands vor und während des 2. Weltkriegs. In Deutschland wurde zum Beispiel der Kautschuk Buna und Polyamid 6 (bekannt als Perlon) entwickelt, in England Polyethylen und in den USA Polyamid 66 (bekannt als Nylon). Die chemische Industrie etablierte sich damit als Werkstoffhersteller (Menges et al. 2011:2).

Nach dem 2. Weltkrieg begann der Aufschwung der Kunststoffindustrie. Basisstoff war anfangs Kohle. Die Erfindung der katalytisch bewirkten Polymerisation der Polyolefine (gesättigte Kohlenwasserstoffe) führte dazu, dass die in den Raffinerien beim Cracken von Erdöl entstehenden Abfälle (vor allem die Gase Ethylen und Propylen) einer wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden konnten. Die großen Chemiekonzerne stellten in den 50-er Jahren ihre Erzeugung weitgehend auf Erdöl um. In den Industrieländern nahm die Produktion der Polymerwerkstoffe um weit über 10 % pro Jahr zu, was bald zu einem Engpass bei den Polyolefinen führte. In den Crackern wurde daraufhin eine spezielle Qualität, „Naphtha“ als Rohstoff für die Polymerisation erzeugt (Menges et al. 2011:2).

Die Erdölkrise 1973 und Umweltthemen ab den 90-er Jahren führten zu einer Dämpfung des starken Wachstums. Aber immer noch verzeichnen viele Kunststoffe eine dynamische Entwicklung (Menges et al. 2011:2).

Heute werden Kunststoffe in nahezu allen Lebensbereichen eingesetzt. Sowohl bei Massenartikeln, wie sie für Verpackungen, Haushaltsgeräte, im Bauwesen, für Sport- und Freizeitutensilien verwendet werden, als auch bei hochwertigen Artikeln der Elektro- und Fahrzeugindustrie, im Feingerätebau bis hin zur Luft- und Raumfahrt haben sich diese Werkstoffe bewährt (Menges et al. 2011:3).

Immer noch werden neue Einsatzgebiete entdeckt. Häufig werden dabei Metalle durch Kunststoffe substituiert. Die besonderen Eigenschaften der Kunststoffe bedeuten für viele Anwendungen einen signifikanten Vorteil gegenüber klassischen Werkstoffen. Die leichte Verarbeitbarkeit macht Kunststoffe zu einem typischen Großserienwerkstoff. Ein hohes Wachstum verzeichnet die Gruppe der Thermoplaste (z.B. Polypropylen). Das liegt daran, dass sich Thermoplaste besonders leicht und wirtschaftlich zu Formteilen und Profilen verarbeiten lassen. Polypropylen ist inzwischen zu einem wichtigen Werkstoff auch für technische Anwendungen geworden. Besonders interessant ist der vermehrte Einsatz für Spezialprodukte wie Faserverbund-Werkstoffe, die im Leichtbau Verwendung finden. Die Herstellung sehr großer Bauteile wird damit ermöglicht (z.B. Windräder) (Menges et al. 2011:3).

Die thermoplastischen Kunststoffe wie Polyolefine, Polyvinylchlorid und Polystyrole bilden über 2/3 der Kunststoffproduktion. Die restlichen Thermoplaste kommen nur mehr auf 10 %. Auf Duroplaste (härtbare Harze), wozu auch die meisten Faserverbund-Werkstoffe gehören, entfallen ca. 22 % (Menges et al. 2011:6).

In den Schwellen- und Entwicklungsländern wächst der Verbrauch von Kunststoffen aufgrund des steigenden Lebensstandards rasant. Dort werden vor allem Massenkunststoffe nachgefragt (Menges et al. 2011:6).

Die Bedeutung der Kunststoffe hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Dies ist unter anderem an den Weltweiten Produktionszahlen erkennbar. In Abbildung 1 ist die weltweite Produktion von Kunststoffen, Aluminium und Rohstahl seit den 1950-er Jahren dargestellt (Menges et al. 2011:1).

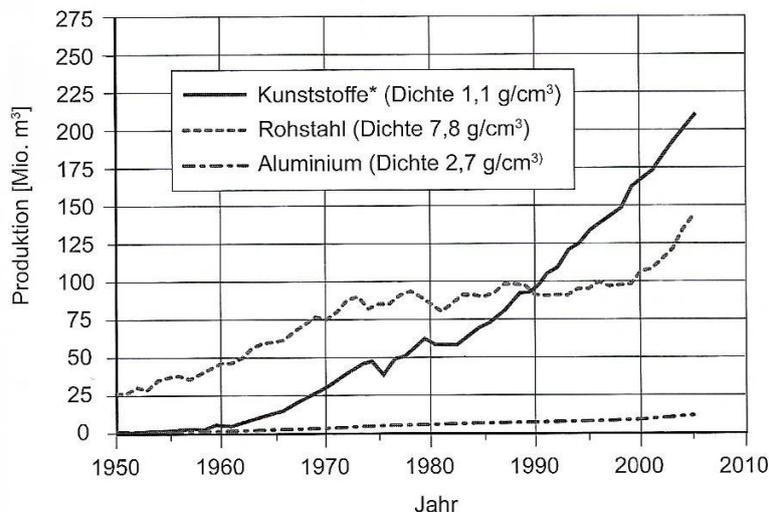


Abbildung 1: Weltproduktion Rohstahl, Aluminium, Kunststoffe (Baur et al. 2007:3).

Die Anwendungsgebiete von Kunststoffen sind vielfältig. Allseits bekannt sind sie als Verpackungen in allen Bereichen. Von Lebensmitteln über Möbel bis hin zu ganzen industriellen Anlagen, wird alles in Kunststoffverpackungen ausgeliefert. Im Bauwesen kommen Kunststoffe zur Wärmedämmung zum Einsatz. Die meisten Elektrogeräte besitzen ebenfalls ein Kunststoffgehäuse und aus der Automobilbranche sind Kunststoffe seit Jahrzehnten nicht mehr wegzudenken. Die Einsatzgebiete der Kunststoffe, bezogen auf Europa, sind in Abb. 2 dargestellt.

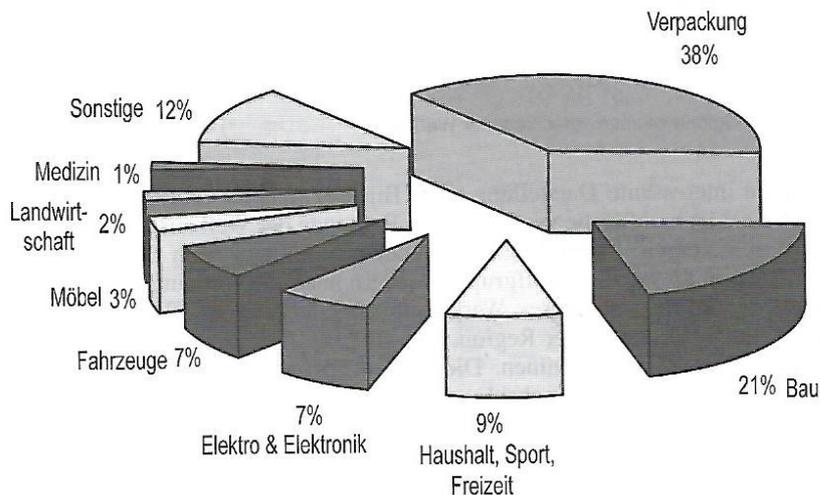


Abbildung 2: Anwendungsgebiete Kunststoffe (Baur et al. 2007:4).

2.1.2 Grundlegende Eigenschaften von Kunststoffen

Geringe Dichte:

Kunststoffe sind wesentlich leichter als andere Werkstoffe wie Metalle und Keramik (Dichte nur 0,8 bis 2,2 g/cm³). Damit sind sie für viele Anwendungen wie im Flugzeug- und Fahrzeugbau, sowie bei Verpackungen besonders geeignet. Durch Einarbeitung von leichten Fasern kann die Tragfähigkeit signifikant erhöht werden, wodurch sie zu den wichtigsten Leichtbauwerkstoffen gehören (Menges et al. 2011:13).

Flexibilität:

Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber anderen Werkstoffen ist die große Spannweite des Elastizitätsmoduls. Diese Elastizitätsmodule und die Festigkeiten reichen von denen eines weichen Kautschuks bis zu Leichtmetallen wie Aluminium. Besonders hervorzuheben ist die Flexibilität von Gummi (Elastomere) (Menges et al. 2011:13).

Bei hohen Anforderungen an die Steifigkeit bzw. großen Formteilen werden Füllstoffe in Form von Fasern eingearbeitet. Bei kleinen bis mittleren Formteilen wird bereits durch entsprechende Konstruktion der niedrige Modul überspielt und viele Anforderungen können auch ohne Fasereinarbeitung dank des hohen Trägheitsmoments erzielt werden (Menges et al. 2011:13).

Niedrige Verarbeitungstemperatur, zähflüssige Schmelzen:

Die Verarbeitungstemperatur (Formbarkeit) der gebräuchlichsten Kunststoffe, den Thermoplasten, liegt bei 200 – 250 °C. Damit ist eine einfache Verarbeitung möglich und führt in der Regel auch zu geringen Fertigungskosten. Mit dieser Eigenschaft wird das Einarbeiten von Füllstoffen und damit die Anpassung an unterschiedliche Anforderungen wesentlich erleichtert. Dies gilt insbesondere auch für die Einfärbung von Formteilen, sodass

eine nachträgliche Lackierung obsolet wird. Dies führt inzwischen auch zu Anwendungen im medizinischen Bereich, wie z.B. bei Pflastern, die wegen der niedrigen Verarbeitungstemperatur mit Wirkstoffen versehen werden können ohne diese zu schädigen (Menges et al. 2011:14).

Ebenso erlaubt diese Eigenschaft die Herstellung von synthetischen Schaumstoffen mit sehr geringer Dichte (ca. $0,01 \text{ g/cm}^3$), die in der Schall- und Wärmeisolation Verwendung finden (Menges et al. 2011:15).

Die Schmelzen von Kunststoffen sind zähflüssig und klebrig. Damit können bis zu 60 % an Füllstoffen eingearbeitet werden. Aus Weich-PVC werden zum Beispiel Fußbodenbeläge hergestellt, wobei Pulver oder Sand beigemischt und damit die Druckfestigkeit erhöht wird (Menges et al. 2011:15).

In erheblichen Mengen wird auch Kohlenstoff (in Form von Graphit, Ruß oder Faser) eingearbeitet. Bei der Herstellung von Autoreifen werden dadurch die Lichtbeständigkeit und mechanische Eigenschaften verstärkt. In anderen Fällen wird die Leitfähigkeit für Strom und Wärme verbessert (Menges et al. 2011:15).

Im Leichtbau sind die Kennzahlen Festigkeit und Elastizität jeweils bezogen auf die Dichte entscheidend. Durch faserverstärkte Kunststoffe werden diese Kennzahlen drastisch erhöht und übertreffen die Werte von Metallen signifikant. Gewisse Kunststoffe liegen bei niedrigen Temperaturen (\sim Raumtemperatur) in flüssigem Zustand vor. Damit können nun Fasern und auch Textilien einfach getränkt werden. Diese Eigenschaft wird bei Verbundwerkstoffen verwendet: bei der Polymerisation wird eine hohe Haftfestigkeit zu den Fasern aufgebaut, was die Elastizität wesentlich erhöht. Mit diesem Werkstoff können riesige Bauteile wie zum Beispiel Windräder hergestellt werden (Menges et al. 2011:16).

Niedrige Leitfähigkeiten für Wärme und Strom:

Die niedrige Wärmeleitfähigkeit (1×10^{-1} bis $8 \times 10^{-1} \text{ W/mK}$) erschwert die Herstellung durch beispielsweise lange Abkühlzeiten, fördert aber die Verwendung vieler Kunststoffe als Isolationswerkstoff (Menges et al. 2011:16).

Wegen der niedrigen elektrischen Leitfähigkeit – der elektrische Durchgangswiderstand liegt zwischen 10^{10} und 10^{18} Ohm cm – sind Kunststoffe für die Isolierung von elektrischen Leitungen prädestiniert. Auch in dieser Hinsicht sind Kunststoffe anpassbar. Durch Beimischen von Kohlenstoff (z.B. Graphit, Ruß) kann der Durchgangswiderstand variiert werden. Durch speziellen Molekülaufbau können sogar hoch leitfähige („intrinsische“) Polymere (z.B. Polyacetylen, Polyanilin) hergestellt werden (Menges et al. 2011:16).

Einige Kunststoffe sind transparent:

Etliche amorph erstarrende Kunststoffe sind mineralischen Gläsern in Punkto Zähigkeit überlegen, bei ähnlichen optischen Eigenschaften. Diese werden im Automobilbau und im Bauwesen verwendet (Acrylglas, Polycarbonat) (Menges et al. 2011:16).

Hohe chemische Beständigkeit:

Kunststoffe sind nicht korrosionsgefährdet, ihr atomarer Bindungsmechanismus unterscheidet sich von der metallischen Bindung. Metalle werden von diversen Säuren und Laugen angegriffen, Kunststoffe sind davon nicht betroffen. Hierdurch ist auch die ausgezeichnete Witterungsbeständigkeit begründet. Mit Stabilisatoren kann auch der Einfluss der UV-Strahlung reduziert werden (Menges et al. 2011:17).

Viele Kunststoffe sind durch organische Lösungsmittel leicht löslich, was bei manchen Verarbeitungen hilfreich sein kann. Allerdings muss bei vielen Anwendungen diese Löslichkeit durch Auswahl entsprechend beständiger Werkstoffe berücksichtigt werden (Menges et al. 2011:17).

Durchlässigkeit (Permeation, Diffusion):

Aufgrund der niedrigen Dichte (= großer Atomabstand) ist eine höhere Durchlässigkeit gegenüber Gasen und verschiedenen Flüssigkeiten gegeben, was bei vielen Anwendungen einen Nachteil darstellen kann. Allerdings sind gewisse Polymerwerkstoffe nur gegenüber ähnlich aufgebauten Gasen und Flüssigkeiten leicht durchlässig. Es gilt also für die jeweilige Anwendung den geeignetsten Werkstoff auszusuchen. Für manche Anwendungen stellt diese Durchlässigkeit wiederum einen Vorteil dar bzw. ist unbedingt erforderlich, wie z.B. für Membranen und im Einsatz als Organersatz (Menges et al. 2011:17).

Geringer Energieverbrauch in der Herstellung:

Für die Herstellung von Kunststoffen wird im Vergleich zu anderen Werkstoffen weniger Energie in der Herstellung benötigt (siehe Abb. 3). Dasselbe gilt für die Erzeugung von Formteilen aus Kunststoff (Menges et al. 2011:17).

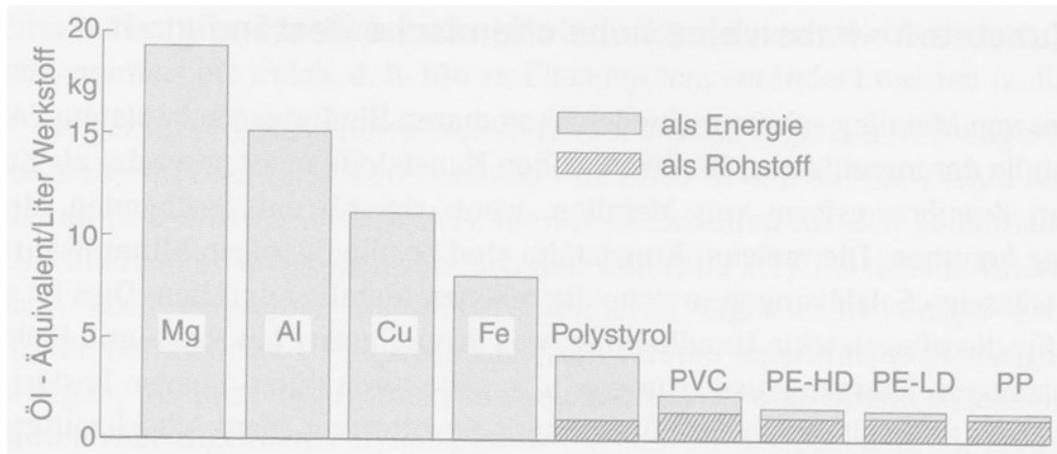


Abbildung 3: Energiebedarf für Herstellung (Menges et al. 2011:18).

Vielseitige Recyclingmöglichkeiten (energetisch / stofflich):

Grundsätzlich hat jede Wiederverwertung das Ziel, Ressourcen zu schonen. Sortenreine Kunststoffabfälle werden in der Regel wiederverwendet, bei gemischten Abfällen ist es oft ökologisch sinnvoller, diese thermisch zu verwerten. (Menges et al. 2011:18)

Beim energetischen Recycling wird Energie gewonnen. Kunststoffe sind aufgrund ihres organischen Aufbaus leicht brennbar, der Heizwert von Kunststoffabfällen ist mit dem von Steinkohle vergleichbar. Bei der Verbrennung entstehen im Wesentlichen Kohlendioxid und Wasserstoff. Energetisch verwertet werden vor allem stark verschmutzte bzw. vermischte Kunststoffabfälle, bei denen eine Wiederaufbereitung zu aufwändig bzw. ökologisch nicht sinnvoll ist. (Menges et al. 2011:18)

Das stoffliche Recycling hat das Ziel, aus Kunststoffabfällen wieder Rohstoffe zu gewinnen und diesen zur Herstellung hochwertiger Produkte einzusetzen. Beim stofflichen Recycling werden die Polymermoleküle in niedermolekulare Bausteine rückgeführt und nach einer Reinigung wieder in chemischen Prozessen verwendet. Falls es sich bei den Molekülen um Monomere handelt, können diese direkt in der Polymerisation eingesetzt werden. In der Fertigung anfallende Kunststoffabfälle werden weitestgehend sofort wieder dem Produktionsprozess zugeführt. (Menges et al. 2011:19)

2.1.3 Einteilung der Kunststoffe

Kunststoffe können auf verschiedene Art und Weise eingeteilt werden. Gängige Unterteilungen sind: mechanisch-thermisches Verhalten (Struktur und Bindungsmechanismus), Ursprung (natürlich oder synthetisch), Verwendung oder Entstehungsreaktion (Michaeli 2010:13).

Hier wird die Unterteilung nach Struktur und Bindungsmechanismus der Makromoleküle verwendet. Je nach Art der Makromoleküle unterscheidet man:

- „lineare Kettenmoleküle *Thermoplaste*
- verzweigte Kettenmoleküle *Thermoplaste*
- schwach vernetzte Kettenmoleküle *Elastomere*
- stark vernetzte Kettenmoleküle *Duroplaste*“ (Michaeli 2010:13).

Thermoplaste

Thermoplaste (oder auch Plastomere) sind Kunststoffe, deren Makromoleküle lineare oder verzweigte Kohlenstoffketten darstellen. Die einzelnen Molekülketten werden durch schwache physikalische Bindungen zusammengehalten, abhängig von Art und Anzahl der Seitenketten. Besitzen die Moleküle nur kurze und wenige Seitenketten, spricht man von teilkristallinen Strukturen. Teilkristalline Thermoplaste haben immer eine trübe oder milchige Farbe und sind zähelastisch. Im Gegensatz dazu sind bei den amorphen Thermoplasten die Molekülketten stark verzweigt und wie in einem Knäuel ineinander verschlungen. Amorphe Kunststoffe sind immer glasklar und bei Raumtemperatur spröde. Amorphe Kunststoffe werden auch als synthetische Gläser bezeichnet (Michaeli 2010:13).

Durch Erhitzen werden die sekundären Bindungskräfte vermindert, sodass der Kunststoff elastisch wird. Wird die Temperatur weiter gesteigert, so nimmt er einen plastischen Zustand an. Dieser Prozess ist reversibel, d.h. der Übergang in den plastischen Zustand kann beliebig oft wiederholt werden. Thermoplaste sind aufgrund der Beweglichkeit der Molekülketten schmelzbar, schweißbar, quellbar und löslich (Michaeli 2010:13).

In teilkristallinen Kunststoffen liegen kristalline und amorphe Strukturen nebeneinander vor. Unterhalb der Glasübergangstemperatur (< Raumtemperatur) sind die amorphen Bereiche erstarrt, der Kunststoff ist hart und spröde und für eine Verarbeitung nicht zu gebrauchen. Wird diese Temperatur überschritten, wird zuerst die Beweglichkeit der Molekülketten im amorphen, nicht aber im kristallinen Bereich erhöht. Der Kunststoff besitzt gleichzeitig Zähigkeit und Festigkeit. Bei weiterer Erhitzung wird die Beweglichkeit der amorphen Molekülketten immer größer und der kristalline Bereich beginnt zu schmelzen. Bei hohem Molekulargewicht bildet sich dabei eine amorphe Phase und zwischen der Kristallitschmelztemperatur und der Fließtemperatur entsteht eine hochviskose Schmelze (kautschukelastischer Bereich). Bei Überschreiten der Fließtemperatur wird eine Verarbeitung unmöglich. Bei niedrigen Molekulargewichten wird der Kunststoff bei Überschreiten des Kristallitschmelzpunktes direkt dünnflüssig (Michaeli 2010:13ff).

Duroplaste (Duromere)

Duroplaste sind Polymere, die aus einer Schmelze oder Lösung durch eine Vernetzungsreaktion – meist durch Erhitzen - hervorgehen. Die Kettenmoleküle sind durch engmaschige Querverbindungen miteinander verbunden. Erwärmung führt nicht zu einer plastischen Verformbarkeit, sondern zur Zersetzung. Ausgehärtete Duroplaste sind bei Raumtemperatur sehr hart, steif und spröde und lassen sich nur mechanisch bearbeiten. Sie lassen sich nicht schmelzen, sind nicht löslich und nur schwach quellbar. Wegen ihrer

mechanischen und chemischen Beständigkeit auch bei höheren Temperaturen werden Duromere häufig für Elektroinstallationen eingesetzt (Michaeli 2010:16f).

Elastomere

Bei den Elastomeren sind die Kettenmoleküle durch weitmaschige Querverbindungen miteinander vernetzt und damit flexibel. Elastomere werden auch als kautschukelastische Stoffe (Gummi) bezeichnet. Elastomere lassen sich nicht schmelzen, sie sind nicht löslich aber in gewissem Ausmaß quellbar. Zu den Elastomeren gehören alle Arten von vernetztem Kautschuk. Sie werden vor allem in der Reifenindustrie und für Gummiartikel verwendet (Michaeli 2010:16f).

2.1.4 Chemikalienbeständigkeit

In der nachstehenden Tabelle 1 ist die Beständigkeit gegen verschiedene Chemikalien bewertet. Wie zu erkennen ist, haben die verwendeten Kunststoffe allgemein eine gute Beständigkeit, speziell gegen Säuren und Laugen, worauf im praktischen Teil noch eingegangen wird.

Tabelle 1: Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen (Baur et al. 2007:767).

Kunststoff Kurz- zeichen	Wasser	schwach	Säuren		Lauge		Halogene	oxyd. Verbindungen	Lösungsmittel													
			stark	Flußsäure	schwach	stark			anorganische Salze	Paraff. Kohlenwasserstoffe	Halogen-Alkane	Alkohole	Äther	Ester	Ketone	Aldehyde	Amine	org. Säuren	aromat. Verbindungen	Kraftstoffe	Mineralöl	Fette, Öle
PE-LLD	+	+	+	+	+	+	+	-	-	⊗	-	○	-	○	○		+	-	⊗	○	⊕	
PE-LD	+	+	+	+	+	+	+	-	-	⊗	-	+	○	⊕	⊕	⊕	+	+	⊕	⊕	⊕	
PE-HD	+	+	+	+	+	+	+	-	-	⊗	⊗	+	○	+	+	+	+	⊕	⊕	⊕	⊕	
PP	+	+	⊕	⊕	+	+	+	⊗	-	⊕	⊗	+	○	⊕	⊕	+	+	⊕	⊗	⊕	+	
PS	+	+	⊕	⊕	⊕	+	+	-	○	⊗	-	+	⊗	-	-	⊗	+	⊕	⊗	⊗	○	
PVC-U	+	+	+	+	⊕	+	+	○	⊕	⊕	⊗	+	⊗	-	-	⊗	⊕	⊕	⊗	⊗	+	
PVC-P	+	+	⊕	⊕	+	○	+	○	⊕	-	⊗	⊗	⊗	-	-	+	+	⊕	-	-	○	
PET		+	⊕	⊕	⊕		+		+	+	⊗	⊕	+	+	+		+	+	+	+	+	
TPU	+	⊕	○	-	⊕	⊕	+	-	⊗	+	⊗	⊕	⊕	⊕	+	+	+	○	⊕	+	+	

+ beständig, ⊕ beständig bis bedingt beständig, ○ bedingt beständig

⊗ bedingt beständig bis unbeständig, - unbeständig

2.1.5 Witterungsbeständigkeit

Die in den Versuchen verwendeten Kunststoffe sind stabilisiert, daher ist die Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse, wie Tab. 2 zu entnehmen ist, generell sehr gut.

Tabelle 2: Witterungsbeständigkeit von Kunststoffen (Baur et al. 2007:774).

Kunststoff	Bewitterung	
	nicht-stabilisiert	stabilisiert
PD-LD	3	1 bis 2
PE-HD	3	1 bis 2
PP	3	2
PS	3	2
PVC-U	2	1 bis 2
PVC-P	3	2
PET	2	

Beständigkeit: 1: sehr gut, beständig
2: durchschnittlich, 3: wenig beständig

2.2 Die verwendeten Kunststoffe im Detail

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Versuche an folgenden gängigen und weit verbreiteten Kunststoffen durchgeführt:

- PE-LD (Polyethylen, low density),
- PE-HD (Polyethylen, high density),
- PE-LLD (Polyethylen, linear low density),
- PP (Polypropylen),
- PS-HI (Polystyrol, high impact),
- PVC (Polyvinylchlorid),
- PET (Polyethylenterephthalat),
- TPU (Thermoplastisches Polyurethan).

Eine genaue Erläuterung dieser Kunststoffe inklusive Herstellungsverfahren, chemischem Aufbau und Anwendungsgebieten folgt in den nächsten Kapiteln.

2.2.1 Polyethylene (PE)

Weltweit gesehen ist Polyethylen der mit Abstand meist genutzte Kunststoff. Bezüglich der Linearität und Seitenketten, siehe Abb. 4, muss grundsätzlich zwischen drei Arten des Polyethylens unterschieden werden.

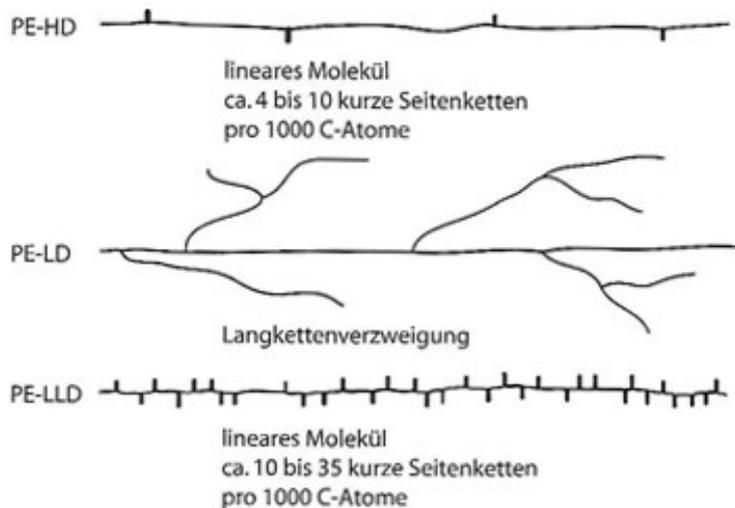


Abbildung 4: Makromolekularer Aufbau verschiedener Polyethylene (Baur et al. 2007:16).

Standardpolyethylen kann man folgende Eigenschaften zuordnen:

- „Niedrige Dichte im Vergleich mit anderen Kunststoffen,
- hohe Zähigkeit und Reißdehnung
- sehr gute elektrische und dielektrische Eigenschaften,
- sehr geringe Wasseraufnahmen,
- geringe Wasserdampfdurchlässigkeit,
- hohe Chemikalienbeständigkeit,
- die Beständigkeit gegen Spannungsrissbildung nimmt mit der molaren Masse zu, Copolymere sind beständiger als Homopolymere, gute Ver- und Bearbeitbarkeit“ (Elsner et al. 2012:118f).

2.2.1.1 PE-HD

Aufbau

Die Strukturformel des Polyethylens ist in Abb. 5 erkennbar.

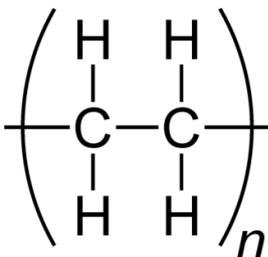


Abbildung 5: Polyethylen Polymer. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Polyethylene-repeat-2D-flat.png>

Alle Polyethylene besitzen grundsätzlich denselben Aufbau. Es handelt sich um einen zentralen Polymerstrang (siehe Abb. 5) mit mehr oder weniger langen Seitenketten. Die Länge und Anzahl dieser Seitenketten bestimmt die Art des Polyethylens (siehe Abb. 4).

Herstellung

Die Erzeugung von PE hoher Dichte (PE-HD) erfolgt unter Einwirkung eines Katalysators nach vorwiegend zwei Verfahren. Dem Ziegler-Verfahren und dem Phillips-Verfahren. Ersteres verwendet Titanester, Titanhalogenide und Aluminiumalkyle als Katalysator, Zweiteres mit einem Chromoxidkatalysator (Elsner et al. 2012:120).

Der Druck liegt beim Ziegler-Verfahren etwa 1 bis 50 bar, die Temperatur liegt zwischen 20 und 150 °C. Die Temperatur im Phillips-Verfahren liegt bei 85 bis 180 °C und die Drücke bei etwa 20 bis 50 bar. Es wird nach einem Suspensions-, Lösungs-, Gasphasenverfahren mit unterschiedlichen Drücken und Temperaturen vorgegangen. Das Ergebnis sind Ethylenmoleküle in weitgehend linearen Makromolekülen. Dies führt zu einem höheren Kristallinitätsgrad (60 – 80 %) und dementsprechend zu einer höheren Dichte von 0,942 bis 0,965 g /cm³ (Elsner et al. 2012:120).

Anwendungen

Die Produktion von PE-HD begann Mitte der fünfziger Jahre des 19. Jahrhunderts. Seitdem ist das Haupteinsatzgebiet unverändert die Herstellung von Haushaltswaren als auch Lager- und Transportbehälter durch das Spritzgießen. Ebenfalls werden Flaschentransportkisten und Müllgroßbehälter hergestellt (Elsner et al. 2012:159).

Aber auch Verpackungsfolien aus PE-HMW weisen eine große Steigerung auf. Durch hochfeste und zähe Materialien kann die Foliendicke stark reduziert werden. Bei Haushaltsmüllbeuteln von 20 µm auf 7 µm und bei Papiersack-Inlinern von 80 bis 120 µm auf 20 bis 35 µm (Elsner et al. 2012:159).

Für die chemische Industrie wird dank der hohen Beständigkeit tafelförmiges Halbzeug aus diesem Werkstoff erzeugt. Trinkwasser-Druckrohre oder Abwasserrohre werden seit mehr als 40 Jahren vorwiegend aus PE-HD hergestellt (Elsner et al. 2012:159).

2.2.1.2 PE-LD

Aufbau

Der grundsätzliche strukturelle Aufbau des PE-LD entspricht, mit der zentralen CH₂-Kette, dem des PE-HD. Lediglich durch mehrere und vor allem längere Seitenverzweigungen folgen die niedrigere Dichte und die spezifischen Eigenschaften (siehe Abb. 4 + 5).

Die Strukturformel in Abb. 6 lässt die Verzweigungen des Polyethylens gut erkennen.

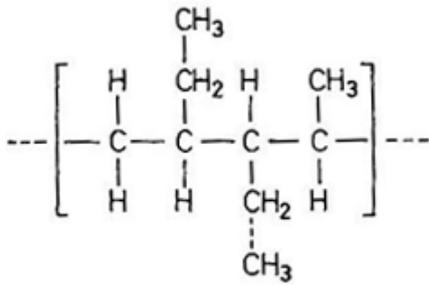


Abbildung 6: Polyethylen Polymer mit Seitensträngen (Elsner et al. 2012:124).

Herstellung

Die Herstellung von Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) erfolgt nach zwei Verfahren, dem Röhrenreaktorverfahren (BASF) und dem Autoklaven (ICI). Die Drücke bei diesen Hochdruckverfahren liegen zwischen 1000 und 3500 bar, die Temperatur zwischen 80 und 300 °C. Peroxid oder Sauerstoff werden als Katalysatoren eingesetzt. Es entstehen verzweigte Polyethylenmoleküle mit verschiedenen langen Seitenketten. Die Dichte beträgt zwischen 0,915 und 0,935 g/cm³, der Kristallinitätsgrad 40 – 50 % (Elsner et al. 2012:120).

Anwendungen

Mit einem Anteil von 73 % in Westeuropa sind Folien das wichtigste Anwendungsgebiet von PE-LD. Es wird unterschieden in: Verpackungs-, Schrumpf-, Dünn-, Schwergutsack-, Tragtaschen- und Landwirtschaftsfolien. Als Wasserdampfsperre dient es in Mehrschichtfolien (Elsner et al. 2012:158).

Ein Anteil von jeweils 7 % wird für Spritzgießen und Beschichten aufgebraucht. Flexible Hohlkörper nehmen einen Anteil von 3 % in Anspruch (Elsner et al. 2012:158).

2.2.1.3 PE-LLD

Herstellung

Vier Verfahren haben sich zur Erzeugung von PE-LLD durchgesetzt.

- „Gasphasenverfahren (z.B. Unipol der UCC),
- Lösungsverfahren (z.B. Dow, Du Pont),
- Emulsionsverfahren (slurry, z.B. Phillips, vornehmlich für PE-MD geeignet),
- Hochdruckverfahren (z.B. Orkem, Norsolor“ (Elsner et al. 2012:120).

Anwendungen

Haupteinsatzgebiet des PE-LLD ist ebenfalls die Herstellung von Folien. Diese haben verglichen mit Folien aus PE-LD ähnlich gute optische Charakteristika bei sowohl höherer Reiß- und Durchstoßfestigkeit als auch bei besserer Kältezähigkeit. PE-LLD wird zunehmend bei der Herstellung von Containern, Surfbrettern und Kanus eingesetzt. Für die

Medizintechnik werden Katheder und Ampullen aus PE-LLD gefertigt (Baur et al. 2007:454, Elsner et al. 2012:170).

Aufbau

PE-LLD besitzt ebenfalls, wie PE-LD und PE-HD, eine zentrale CH₂-Kette. Zusätzlich befinden sich mehr kurzkettinge Verzweigungen an den Seiten als bei PE-HD (siehe Abb.4).

2.2.2 Polypropylen (PP)

2007 lag der Bedarf weltweit bei über 45 Mio. t, ist nach Polyethylen der am zweithäufigsten verwendete Kunststoff. Haupteinsatzgebiete sind der Verpackungs- und Faserbereich, aber auch im Automobil und Konsumerbereich. Eigenschaften von PP sind (Elsner et al. 2012:213):

- „Niedrige Dichte,
- hoher Schmelzpunkt,
- niedrige Neigung zur Spannungsrisbildung,
- vielseitige Möglichkeiten, mechanische Eigenschaften einzustellen,
- gute Verarbeitbarkeit,
- Lebensmittelechtheit,
- Sterilisierbarkeit“ (Elsner et al. 2012:213).

Aufbau, Eigenschaften.

In Abb. 7 ist zu sehen, dass sich beim Polypropylen-Polymer die CH₂ und C₂H₃ Elemente wiederholen.

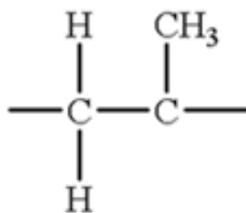


Abbildung 7: Polypropylen Polymer. https://www.researchgate.net/figure/Isotactic-polypropylene-polymer-chain-methyl-monomers-CH-3-linked-to-CH-CH-2-chain_fig4_305618882

Polypropylen ist dem Polyethylen in der Witterungsbeständigkeit, trotz Witterungsstabilisation, unterlegen. Auch nach Entfernen der Zündquelle brennt es mit schwach leuchtender Flamme weiter (Baur et al. 2007:473).

Herstellung

Die Herstellung von Polypropylen erfolgt größtenteils mit Hilfe des bereits in den 1950-er Jahren entwickelten Ziegler/Natta Verfahren. Hierbei polymerisiert Propengas an in Kohlenwasserstoffen aufgeschwemmten Katalysatoren in einer Niederdruck-Fällung (Baur et al. 2007:470, Elsner et al. 2012:214).

Anwendungen

Nicht nur durch seine Eigenschaften, sondern auch aufgrund des niedrigen Preises, haben sich die Anwendungsmöglichkeiten für das Polypropylen in den letzten Jahren stark gesteigert. Für den jeweiligen Bedarfsfall kann es individuell angepasst werden. Starre und robuste Teile für die Automobilbranche, Gehäuse für Haushaltsgroßgeräte wie zum Beispiel Waschmaschinen oder Gartenmöbel, aber auch weiche Fasern wie sie in Baby-Windeln Anwendung finden. Nicht nur die Härte des Materials kann „eingestellt“ werden, Eigenschaften wie beispielsweise die Hitzebeständigkeit können ebenfalls variiert werden (Elsner et al. 2012:239f).

2.2.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Das Anwendungs- und Verarbeitungsspektrum von Polyvinylchlorid ist von allen Thermoplasten am variabelsten, aus diesem Grund ist es, mit ca. 32 Mio. t/a, der am dritthäufigsten verarbeitete Kunststoff (Elsner et al. 2012:282).

Aufbau, Eigenschaften

Die Strukturformel des Polyvinylchlorids ist in Abb. 8 dargestellt. Es entspricht einer Wiederholung von CH₂ und CHCl Ketten.

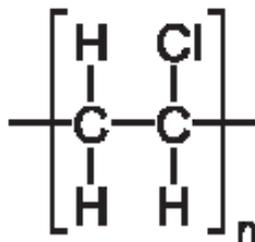


Abbildung 8: PVC- Polymer. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Polyvinylchlorid.svg>

Wie auch beim Polypropylen ist beim Polyvinylchlorid zwischen drei verschiedenen Strukturen, abhängig von der Anordnung des Cl-Atoms im Polymer, zu unterscheiden. Bei röntgenologischen Untersuchungen von PVC zeigte sich, dass die Makromoleküle vorwiegend ataktisch angeordnet sind und sich dazwischen kurze syndiotaktische Abschnitte befinden (siehe Abb. 9) (Elsner et al. 2012:284).

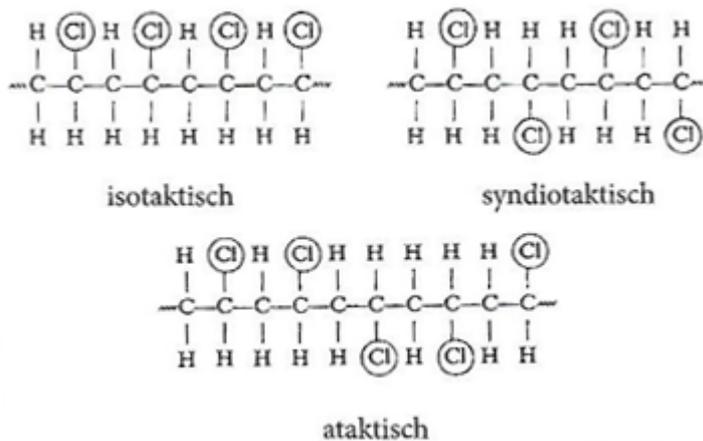


Abbildung 9: Polyvinylchlorid Polymer (Elsner et al. 2012:284).

Grundsätzlich muss zwischen zwei Arten von PVC unterschieden werden:

Hart-PVC besitzt folgende Eigenschaften:

- „Hohe mechanische Festigkeit, Steifheit und Härte,
- in nicht modifizierter Form schlagempfindlich in der Kälte,
- ungefüllt durchscheinend bis transparent (je nach Herstellverfahren),
- gute elektrische Eigenschaften im Niederspannungs- und Niederfrequenzbereich,
- hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien,
- selbstverlöschend nach Entfernen der Zündquelle“ (Elsner et al. 2012:293).

Die Eigenschaften von Weich-PVC sind wie folgt:

- „In weiten Grenzen einstellbare Flexibilität,
- Zähigkeit je nach Weichmacherart, sehr temperaturabhängig,
- Durchscheinend bis transparent,
- Gute elektrische Eigenschaften im Niederspannungs- und Niederfrequenzbereich,
- Die Beständigkeit gegen Chemikalien ist rezept- und sehr temperaturabhängig“ (Elsner et al. 2012:293).

Herstellung

Für die Produktion von PVC werden zu etwa 43 % Erdöl und 57 % Steinsalz verwendet. Es gibt drei vorrangige Polymerisationsverfahren zur Herstellung (Elsner et al. 2012:283).

- Emulsionspolymerisation,
- Suspensionspolymerisation und
- Massepolymerisation (Elsner et al. 2012:283).

Anwendung

Hart PVC (PVC-U) wird zu Rohrleitungen, Fenster- und Türrahmen und Fasern verarbeitet. Des Weiteren sind Folien, Bodenbeläge und Apparate für die chemische Industrie Anwendungsgebiete (Baur et al. 2007:494, Elsner et al. 2012:321).

Für Kabelummantelungen, Dichtungen, Sohlen und Isolierfolien wird Weich PVC (PVC-P) verwendet. Schläuche, Griffe, Tischdecken und Schutzanzüge bestehen auch zumeist aus dieser Art PVC (Baur et al. 2007:494, Elsner et al. 2012:321).

2.2.4 Polystyrol (PS)

Aufbau Eigenschaften

Das Polystyrol-Polymer besteht aus einem CH₂ und einem CH Molekül mit anhängendem Benzol (siehe Abb. 10).

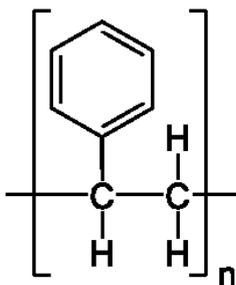


Abbildung 10: Polystyrol Polymer. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Polystyrene.svg>

Spezielle Eigenschaften von Polystyrol sind:

- „Steifheit und Härte (jedoch vor allem bei den leichtfließenden Typen verbunden mit Sprödigkeit und Zerbrechlichkeit),
- Wasserhelle Transparenz,
- Sehr gute elektrische und dielektrische Eigenschaften,
- Geringe Wasseraufnahmen
- Brillante Oberfläche,
- Hohe Maßbeständigkeit,
- Sehr gute Verarbeitbarkeit,
- Begrenzte Chemikalienbeständigkeit gegen organische Produkte (außer einigen Ölen und Fetten),
- Neigung zur Spannungsrissbildung,

- *Betonte Abhängigkeit der Eigenschaften spritzgegossener Formteile von Artikelgestalt, Art und Lage de Anschnitts sowie den Verarbeitungsparametern“* (Elsner et al. 2012:371).

Herstellung

Bedeutende Herstellverfahren von Polystyrol sind heutzutage:

- Kontinuierliche Massepolymerisation und
- Suspensionspolymerisation (Elsner et al. 2012:371).

Das in den praktischen Versuchen verwendete PS-HI (high impact) erhält man durch Zugabe von etwa 5 bis 15 % Synthekautschuk. Die Festigkeit und Steifigkeit wird dadurch zwar vermindert, jedoch werden die Spannungsrisssbeständigkeit und die Schlagzähigkeit, vor allem bei niedrigen Temperaturen erhöht (Baur et al. 2007:487).

Anwendung

Polystyrol hat wie die meisten Arten von Kunststoffen ein breites Anwendungsspektrum. Styrolpolymerisate werden vorwiegend im Spritzguss verwendet. Die wichtigsten Verbrauchsbranchen sind die Verpackungs-, Haushalts-, Bau-, Spielzeug-, Elektronik- und Elektroindustrie (Elsner et al. 2012:387, Baur et al. 2007:485).

Im Verpackungsbereich werden Dessertverpackungen, Einweggeschirr, Fleischverpackungen, Kaltgetränkebecher, Deckel für Verpackungsbehälter oder auch Blister hergestellt (Elsner et al. 2012:387f).

In der Anwendung als Wärmedämmung im Baubereich zu großen Teilen auf extrudiertes und expandiertes Polystyrol gesetzt wird. Hierzu wird das Polystyrol aufgeschäumt.

Im Haushaltsbereich kommt Polystyrol zur Anwendung als Wäscheklammern, WC-Spülkästen, Kleiderbügel, Kühlschränke, Duschkabinenwände oder Badezimmerschränke (Elsner et al. 2012:387).

Für die Elektro- und Elektronikindustrie werden Gehäuse für Fernseher, Monitore oder Radios hergestellt, aber auch Leuchtabdeckungen, Lautsprechergehäuse und Fotozubehör (Elsner et al. 2012:387).

In den letzten Jahren wurden sogenannte 3D-Drucker auch für private Anwender erschwinglich. Das PS-HI wird in solchen Druckern aufgeschmolzen und kann danach in jede beliebige Form gedruckt werden.

2.2.5 Polyethylenterephthalat (PET)

Herstellung

PET gehört zur Gruppe der Polyalkylenterephthalate. Die Herstellung von PET erfolgt zunehmend aus hochreiner Therephthalatsäure. Durch einen linearen Aufbau der Kettenmoleküle wird ein Gefüge mit etwa 30 – 40 % Kristallinität gebildet. Diese kann noch verringert werden, wodurch glasklare Produkte entstehen können (Elsner et al. 2012:785).

Anwendung

Für PET gibt es derzeit vier große Anwendungsgebiete. Etwa zwei Drittel der Produktion entfallen auf die Faserherstellung, ca. 30 % sind Verpackungen, der Rest wird für die Herstellung von Folien und Spezialanwendungen benutzt. In Westeuropa betrug der Verbrauch an PET im Jahr 2012 etwa 2,7 Mio. t. Damit liegt es an fünfter Stelle der Thermoplaste (Elsner et al. 2012:786).

Aufbau Eigenschaften

Die komplexe Strukturformel von PET ist aus Abb. 11 ersichtlich.

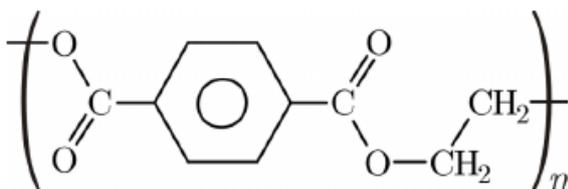


Abbildung 11: Polyethylenterephthalat Polymer. https://www.researchgate.net/figure/The-repeating-unit-of-PET-polymer-A-PET-monomer-is-formed-from-the-condensation-of_fig1_233730718

Die Farbe von PET kann von amorph-transparent bis hin zu weiß reichen. Die Chemikalienbeständigkeit von PET ist generell gut, jedoch zerstören Phenole und starke Säuren und Laugen die Struktur (Elsner et al. 2012:787).

2.2.6 Thermoplastisches Polyurethan (TPU)

Herstellung

Thermoplastische Polyurethan-Elastomere sind bereits seit den 1950-er Jahren bekannt. Sie sind Polyaddukte aus Polyisocyanaten und Polyolen. Der spezielle Aufbau der Makromoleküle hat das gummiähnliche Verhalten zur Folge (Elsner et al. 2012:1190).

Anwendung

Anwendung finden Thermoplastische Polyurethane vor allem im Automobilbau als Dichtungen, Schlauchummantelungen oder Lager. Im Maschinenbau werden sie als Dichtungen, Zahnriemen, Schläuche oder Manschetten verwendet. Weitere Verwendung findet dieser Kunststoff als Hammerköpfe, Skischuhe, Kabelummantelung oder im medizinischen Bereich als Herzklappen und Infusionsschläuche (Elsner et al. 2012:1198).

Aufbau Eigenschaften

Eigenschaften die diesen Werkstoff auszeichnen sind:

- „hohe Zugfestigkeit und Reißdehnung,
- hohe Flexibilität – auch bei tiefen Temperaturen,
- hohe Dauergebrauchstemperatur,
- geringe bleibende Verformung bei statischer und dynamischer Beanspruchung,
- günstiges Reibungs- und Verschleißverhalten,
- hohe Weiterreißfestigkeit,
- hohes Dämpfungsvermögen,
- hohe Beständigkeit gegen Öle, Fette und viele Lösemittel,
- hohe Beständigkeit gegen energiereiche und UV-Strahlung,
- frei von Weichmacher,
- Sondertypen sind witterungs- und verrottungsbeständig“ (Elsner et al. 2012:1190).

Eine zusammenfassende Übersicht der Dichten, Einsatzgebiete etc. der erwähnten Kunststoffe ist in den beiden nachfolgenden Tab. 3 und 4 aufgelistet.

Tabelle 3: Eigenschaften Thermoplaste (Martens 2011:165).

Thermoplaste	Dichte g/cm ³	Schmelz- temperatur °C	Farbe/ Festigkeit	Verwendungsgebiete
PE, Polyethylen	0,92... 0,96	110...140	Milchig-trüb, transparent; halb-steif	Verpackungsfolien, Behälter, Kanister, Rohre, Maschinenteile
PP, Polypropylen	0,90... 0,92	160	Weiß, opak; steif	Folien, Haushaltsgeräte, PKW-Teile, Behälter
PVC, Polyvinyl- chlorid (56,7% Cl)	1,2... 1,4	120...160	PVC-U: opak; steif hart PVC-P: transparent; weich, flexibel, elastisch	PVC—U: Rohre, Tafeln, Profile PVC-P: Bahnen, Folien, Kabelisolation, Schläuche, Dichtungen
PS, Polystyrol (PS- E (EPS))	1,05	150	Glasklar; hart, spröde, geschäumt- weich	Spritzgussteile, Gehäuse, Dämm-, Isolier-, Verpackungsmaterial

PET, Polyethylen-terephthalat	1,35... 1,4	250...260	Weiß, transparent bis glasklar; steif, zäh	Getränkeflaschen, Fasern, Folien, technische Funktionsteile
-------------------------------	----------------	-----------	-----------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------

Tabelle 4: Eigenschaften Elastomer (TPU) (Martens 2011:165, Baur et al. 2007:618).

Elastomer	Dichte g/cm ³	Gebrauchs- temperatur °C	Verwendungsgebiete
Thermoplastische Polyurethan- Elastomere, TPU	1,1... 1,3	110...140	Dichtungen, Schläuche, Falten- bälge, Membranen, Kabel- mäntel, Schuhsohlen

2.2.7 Landfill Mining

Im Zuge des sogenannten Landfill Mining, dem geordneten Rückbau von Deponien um die darin gelagerten Rohstoffe, wie beispielsweise Metalle oder heizwertreiche Fraktionen nutzbar zu machen, besteht die Möglichkeit, dass viele bereits deponierte Kunststoffe wieder einer Verwertung zugeführt werden. Die Abfälle werden abgegraben, aufbereitet und einer thermischen, unter bestimmten Umständen sogar einer stofflichen Verwertung zugeführt. Die große Heterogenität dieser Fraktionen ist durch die Lagerung und den mehrmaligen Transport gegeben. Verschmutzungen aller Art können ebenfalls an den Kunststoffen anhaften (Homepage AVAW Leoben, <http://avaw.unileoben.ac.at/de/>, 30.10.2018).

2.3 Recycling von Kunststoffen

Grundsätzlich können gemäß Abbildung 12 vier verschiedene Recyclingkreisläufe unterschieden werden. Der Primärkreislauf besteht in der Verwertung von bei der Produktion anfallenden Abfällen, welche zumeist sofort wieder in die Herstellung einfließen. Daher wird es auch als innerbetriebliches Recycling bezeichnet (Michaeli 2010:223).

Der Sekundärkreislauf beschreibt die erneute Verwendung eines nach dem erstmaligen Gebrauchs eigentlich zu Abfall gewordenem Gegenstand. Ein allseits bekanntes Beispiel hierfür ist die Wiederverwendung von Pfandflaschen (Michaeli 2010:223).

Im Tertiärkreislauf wird ein verwendetes Produkt nach dessen Lebenszyklus und erfolgter Aufbereitung in die Produktion rückgeführt und zu neuen Produkten verarbeitet. Um beispielhaft bei den Pfandflaschen zu bleiben, werden diese gesammelt und werden in einer Glashütte erneut aufgeschmolzen und wieder zu Glaskörpern verarbeitet (Michaeli 2010:223).

Im vierten Kreislauf werden die Produkte nach dem Gebrauch direkt zu Rohstoffen aufbereitet und in der Produktion wiedereingesetzt (Michaeli 2010:224).

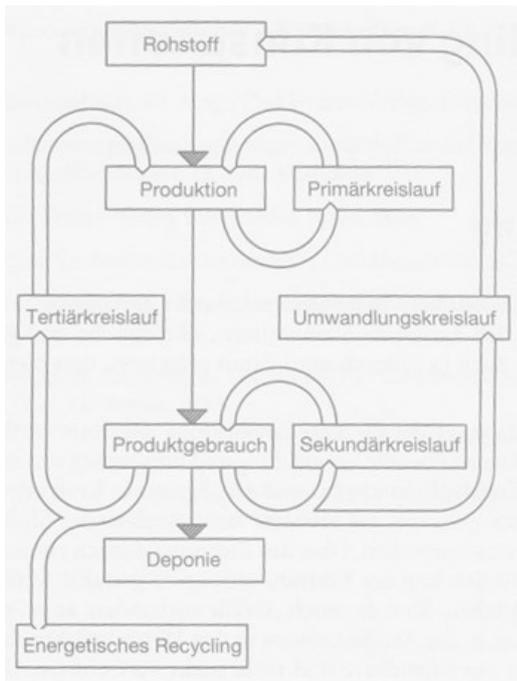


Abbildung 12: Recyclingkreisläufe (Michaeli 2010:224).

2.3.1 Aufbereitung vor Sortierung

Die typischen Aufbereitungsschritte beim Recyclieren von Kunststoffen sind nach der Sammlung zumeist die Zerkleinerung, Reinigung, Trennung, Trocknung und eine Agglomeration welche zur Erhöhung der Schüttdichte und somit der Transportfähigkeit führt. (Michaeli, 2010:226)

Die meisten Kunststoffe lassen sich nur stofflich wiederverwenden, wenn sie äußerst Sortenrein vorliegen, da sich ansonsten bei der Vermischung von Kunststoffen zwei getrennte Phasen bilden können. Zu einem weiteren Problem können die verschiedenen Verarbeitungstemperaturen der Kunststoffe führen. Auskunft über die Mischbarkeit von Kunststoffen gibt Tab. 5 (Michaeli 2010:227).

Tabelle 5: Verträglichkeit verschiedener Thermoplaste (Michaeli 2010:228).

	PS	PVC	PP	PE-LD	PE-HD	PET
PS	1					
PVC	6	1				
PP	6	6	1			
PE-LD	6	6	6	1		
PE-HD	6	6	6	1	1	
PET	5	6	6	6	6	1

1 = gut mischbar, 6 = schlecht mischbar

2.3.2 Werkstoffliches Recycling

Von werkstofflichem Recycling ist die Rede, wenn die Erzeugung von neuen Produkten aus Produktionsabfällen ohne wesentliche Veränderung der Molekülstruktur geschieht, zumeist durch Einschmelzen. Aufgrund des chemischen Aufbaus ist dies vorwiegend für Thermoplaste möglich. Duroplaste oder Elastomere müssen dagegen chemisch aufgespalten oder thermisch verwertet werden. In Einzelfällen ist eine werkstoffliche Verwertung möglich. Dabei werden die Stoffe gemahlen und als kleine Partikel dem neuen Produkt zugeführt, was jedoch häufig zu Änderungen in den Werkstoffeigenschaften führt (Michaeli 2010:227).

Aber auch bei Thermoplasten ist eine Verschlechterung der Produktqualität nach der Wiederverwendung von Material erkennbar. Faktoren dafür können Feuchtigkeit, hohe Temperaturen oder Oxidation durch Sauerstoff während der Produktion sein. Aber auch Einflussfaktoren während des Lebenszyklus spielen eine Rolle (Michaeli 2010:227).

2.3.3 Stoffliches Recycling

Rohstoffliches Recycling erfolgt zumeist, wenn die Kunststoffabfälle zu stark vermischt sind oder auf Grund von zu starker Verschmutzung die werkstoffliche Wiederverwendung nicht mehr möglich ist. Für einige Kunststoffe ist eine chemische Aufspaltung der Polymerkette in die jeweiligen Monomere möglich. Bei diesen sogenannten solvolytischen Verfahren werden niedermolekulare Substanzen wie Glykol oder Wasser zugegeben, dadurch verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung der Monomere. Beispiele für diese Verfahren sind die Glykolyse, Hydrolyse oder auch die Methanolyse (Michaeli, 2010:230f).

Weitere Verfahren zur rohstofflichen Wiederverwendung von Kunststoffen sind die Pyrolyse, die Hydrierung und die Vergasung. Welches der Verfahren Anwendung findet, ist vom Kunststoffabfall abhängig. Diese Verwertungsverfahren sind nur in Kombination mit weiteren Produktionsschritten sinnvoll, daher nutzen sie ausschließlich Rohstoffhersteller oder die petrochemische Industrie (Michaeli 2010:230f).

2.3.4 Energetische Nutzung

Wenn ein werkstoffliches oder stoffliches Recycling von Kunststoffen nicht mehr möglich oder wirtschaftlich nicht vertretbar ist, besteht die Möglichkeit der thermischen Verwertung. In Abfallverbrennungsanlagen oder Mitverbrennungsanlagen kann der hohe Heizwert von Kunststoffen, siehe Tabelle 6, zur Erzeugung von elektrischer Energie oder Fernwärme genutzt werden. Auch in der Zementindustrie finden Kunststoffabfälle als Brennstoff Verwendung (Michaeli 2010:231f).

Tabelle 6: Heizwerte verschiedener Materialien (Elsner et al. 2012:110).

Material	Heizwert H_u [Mj/kg]
PP (unverstärkt)	44
PE (unverstärkt)	43.3
PS	40
PVC	18 – 26
Duroplaste (allgemein)	20
Erd- /Heizöl	42
Steinkohle	29 – 30
Holz	15 – 17
Papier	13 – 15
Hausmüll	8,5

2.4 Sensorgestützte Sortierung

Im Folgenden wird die Thematik der sensorgestützten Sortierung behandelt. Dazu wird der Aufbau eines Sortierstandes dargestellt und es werden mögliche Sensoren vorgestellt, wobei abschließend auf die verwendete Nahinfrarottechnik eingegangen wird.

2.4.1 Entwicklung der sensorgestützten Sortierung

Erste, einfache Sortiersysteme wurden bereits in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Für die Trennung von mineralischen Rohstoffen wurden radiometrische und induktive aber auch Farbsensoren eingesetzt. Die Durchsätze waren zu dieser Zeit noch sehr gering. Die moderne, sensorgestützte Sortierung ist das Resultat der Weiterentwicklung der Handauslese von Stoffströmen. Seit der Entwicklung von Computern und digitalen Bildverarbeitungstechniken gewann die sensorgestützte Sortierung immer mehr an Bedeutung (Wotruba 2008).

In der Abfallwirtschaft, wo Arbeiter an einem Förderband standen und den Abfallstrom nach verschiedenen visuellen Kriterien wie Form, Größe, Farbe oder Helligkeit der Teile sortierten, wurden diese durch hochmoderne, computergestützte Sensoren abgelöst. Zur Identifikation wird der Stoffstrom nach visuellen, elektromagnetischen oder spektralen Gesichtspunkten analysiert. Auch die Röntgentransmissions- und die Röntgenfluoreszenztechnik finden hier Anwendung. Die meisten dieser Sensoren analysieren lediglich die Oberfläche der zu untersuchenden Teile, daher ist die Anwendung für beschichtete Teile fehlerhaft. Weiters müssen die Oberflächen eventuell gereinigt werden, um das Sortierergebnis zu verbessern (Martens 2011:32).

2.4.2 Möglichkeiten des Aufbaus eines sensorgestützten Sortierstandes

Grundsätzlich besteht eine Sortieranlage aus mehreren Komponenten. Ein Fördermittel, welches die Teile separiert und den Sensoren zuführt, den je nach Ausstattung und

Ansprüchen verschiedenen Sensoren zur Erkennung der gewünschten Materialeigenschaften, eine softwaregestützte Recheneinheit, die die von den Sensoren erfassten Daten auswertet und eine Vorrichtung zur mechanischen Trennung des Aufgabegutes (Pretz & Julius 2008, Kranert & Cord-Landwehr 2010:175).

Schwingförderer

Zur Vereinzelung der Objekte wird im Allgemeinen ein sogenannter Schwingförderer verwendet. Das Funktionsprinzip ist simpel. Ein Rohr oder eine Rinne wird in Schwingung versetzt. Die dabei auftretenden Kräfte wirken auf das Fördergut und bewirken somit die Bewegung in eine Richtung. Eine positive Eigenschaft dieser Förderer ist, insofern das Material gut rieselt, dass der Stoffstrom gleichmäßig wird. Weitere Bezeichnungen sind Dosier- oder Vibrationsrinnen (Wolter et al. 1997, 33).

Varianten von Sortierständen

Grundsätzlich können zwei Arten von sensorgestützten Sortierständen auf Grund der Zubringung des Materials unterschieden werden. Bei der ersten Ausführung, die in Abb. 13 dargestellt ist, führt der Schwingförderer das Aufgabegut direkt an eine Schurre heran, die es anschließend im freien Fall, an den Sensoren vorbei, hinunterrutscht. Am Ende der Schurre erfolgt die Ausbringung des Materials. Diese, durch weniger bewegliche Teile, robustere Bauart der Zuführung trifft auf die für diese Masterarbeit verwendete Sortieranlage des AVAW zu (Pretz & Julius 2008).

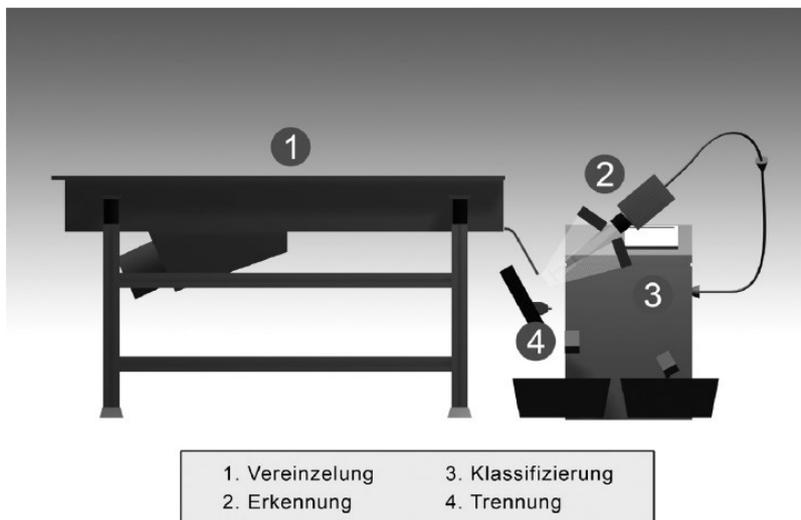


Abbildung 13: Prinzip Rutschen- oder Schurrensortierer (Pretz & Julius 2008).

In Abb. 14 ist die zweite Möglichkeit dargestellt, welche im industriellen Einsatz, aufgrund der höheren Durchsätze, in der Abfallwirtschaft häufiger angewendet wird. Die Teile werden mit Hilfe einer Vibrationsrinne separiert auf die gesamte Breite eines Förderbandes aufgebracht,

welches sie unter den Sensoren durchführt. Die Trennung erfolgt in beiden Fällen mittels Druckluft aus einer Düsenleiste (Pretz & Julius 2008).

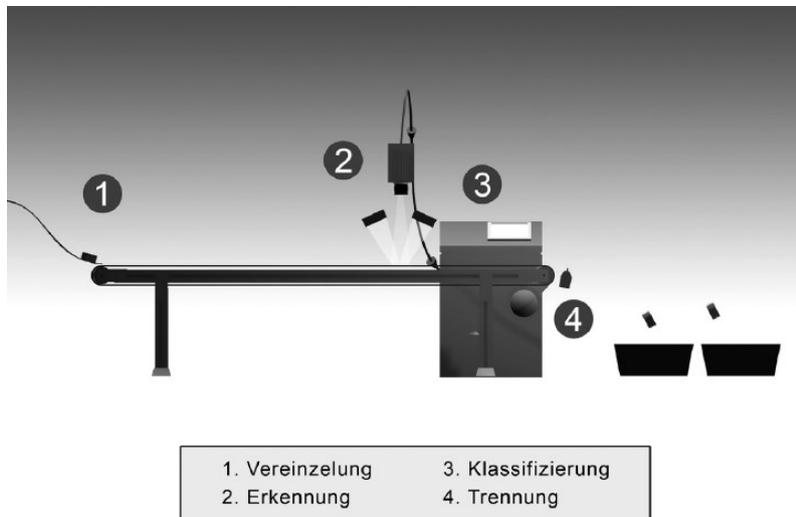


Abbildung 14: Prinzip Bandsortierer (Pretz & Julius 2008).

Nachstehend sind einige Hersteller von Sortieranlagen für Recyclingmaterial aufgelistet:

- Tomra <https://www.tomra.com/de-de>
- Steinert <https://steinertglobal.com/de/>
- Binder & Co <https://www.binder-co.at/>
- BTW Binder (redwave) <http://www.btw-binder.com/>
- Sesotec <https://www.sesotec.com/emea/de>
- IMRO Maschinenbau GmbH <http://www.imro-maschinenbau.de/de/home.html>
- Pellenc <http://www.pellencst.com/de/home-2/>

2.4.3 Die eingesetzten Sensortypen

Im Folgenden wird auf gängige Sensoren und deren Funktion eingegangen. In Tab. 7 sind diese aufgelistet, inklusive den Trennkriterien und Beispielen für die Anwendung. Da die Nahinfrarottechnik in dieser Arbeit Anwendung findet, wird auf diese später im Detail eingegangen.

Die Funktion der Sensoren, die in der sensorgestützten oder auch berührungslosen Sensorik verwendet werden, folgt zumeist demselben Prinzip. Ein Emitter sendet elektromagnetische Strahlung aus, die auf ein Objekt trifft und dadurch beeinflusst wird. Die reflektierte und ggf. veränderte Strahlung wird darauffolgend von einem Detektor gemessen. Anwendung in der sensorgestützten Sortierung finden zumeist folgende Arten der Sensoren (Pretz & Julius 2008):

Tabelle 7: Sensorsysteme (Kranert & Cord-Landwehr 2010:175).

Sortiermaschinen	Sensorik	Trennkriterien	Beispiele für Einsatzgebiet
Farbsortierer	Farbzeilenkamera	Farbe, Transparenz, Glanz, geom. Abmessungen	Sortierung von Altglas, Keramik, Steinen, Porzellan, Kunststoffen, PET, Altpapier
Nahinfrarotsortierer	NIR-Sensor	Lichtadsorption, spektrale Verteilung	Sortierung von Getränkekartons, Kunststoffen, PVC, Papier, Holz
Metallsortierer	Induktiver Sensor (Spulensystem)	Elektrische Leitfähigkeit	Abtrennung aller Metalle, selektive Sortierung von Edelstahl
Röntgensortierer	Röntgenzeilen-sensor	Stoffdichte, geometrische Abmessungen	Abtrennung von Steinen, Glas, Metallen, Holz, PVC, Elastomeren

Sensoren können im Hinblick auf die Art der gewonnenen Informationen eingeteilt werden. Hierzu unterscheidet man zwischen Sensoren die auf Grund der Oberfläche der Objekte eine Klassierung durchführen wie zum Beispiel Farbzeilenkameras, NIR-Sensoren oder Röntgenfluoreszenzsensoren und Sensoren die unabhängig vom Aussehen der Objekte die inneren Eigenschaften analysieren. Dies sind induktive Sensoren und Röntgentransmissionsensoren (Wotruba 2008).

Abb. 15 ist eine Übersicht über die Arten der Strahlungen und deren Wellenlängenbereich. Für die Sortierung werden vorwiegend die Wellenlängenbereiche der Röntgenstrahlen, des sichtbaren Lichts und der Infrarotstrahlung verwendet (Pretz & Julius 2008).

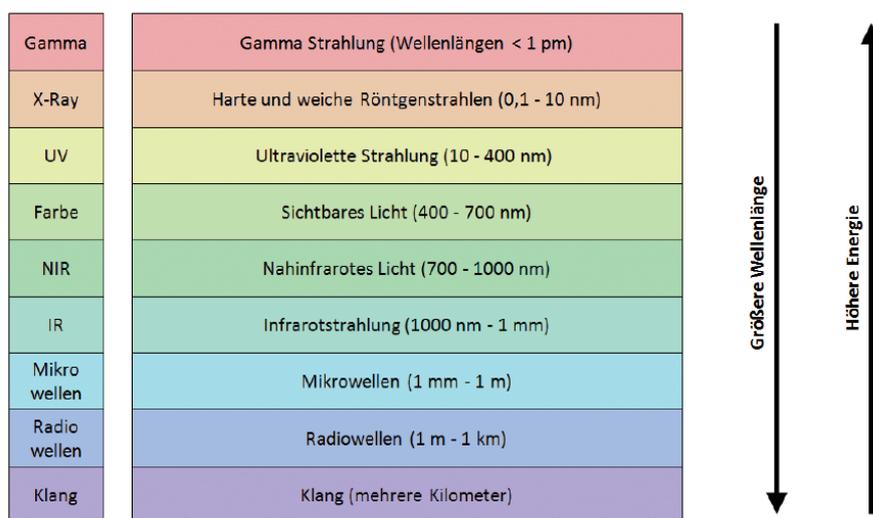


Abbildung 15: Übersicht elektromagnetische Wellen (Pretz & Julius 2008).

VIS Sensor/ Farbsensor

Farbsensoren oder auch visuelle Spektroskopie (VIS) bezeichnet, werden vor allem in der Sortierung von Altglas und Kunststoffen angewendet, aber auch zur Erkennung von

Porzellan und Steinen. Sie arbeiten in dem Wellenlängenbereich des für den Menschen sichtbaren Lichts, siehe Abb. 11, zwischen 400 und 700 nm. Die optimale Beleuchtung des Detektionsbereichs ist, wie auch in der Nahinfrarot-Spektroskopie essentiell. Die zu analysierenden Objekte durchwandern den Bereich und reflektieren einen Teil der Strahlung. Diese Reflektion wird von dem Detektor erfasst und an die Recheneinheit weitergeleitet. Dort werden die gewonnenen Daten mit hinterlegten Werten verglichen und somit zugeordnet (Pretz & Julius 2008, Gundupalli et al. 2017).

Induktiver Sensor

Diese Art der Sensorik wird vorwiegend für die Identifikation von Metallen verwendet, welche nicht bereits durch einen vorgeschalteten Magnetabscheider ausgebracht wurden. Durch die Anbringung von elektrischen Spulen unter der Schurre oder dem Förderband, wird ein elektromagnetisches Feld aufgebaut. Metallische Objekte verursachen bei der Überquerung des Detektionsbereiches Schwankungen des Feldes und werden dadurch erkannt (Pretz & Julius 2008, Beel, 2017).

Röntgentransmissions Sensor

Diese Technik erlaubt es die Dichte von Objekten zu analysieren und sie anhand dieser zu trennen. Eine Röntgenröhre wird dazu als Strahlungsquelle über dem Förderband eines Bandsortierers angebracht. Die emittierte Röntgenstrahlung durchquert die zu analysierenden Partikel auf dem Band und wird von den Detektoren gemessen. Auch in diesem Fall werden die ermittelten Daten an eine Auswerteeinheit geleitet, welche eine Zuordnung durchführt. Anwendung findet diese Technik bei der Erkennung von Kunststoffen oder Holz und der Trennung von verschiedenen Leicht- und Schwermetallen (Pretz & Julius 2008, Gundupalli et al. 2017, Beel 2017).

Röntgenfluoreszenz Sensor

Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz erfolgt eine Bestimmung der Stoffart der Proben. Im Gegensatz zur Röntgentransmission, bei der Emitter und Detektor auf verschiedenen Seiten der zu untersuchenden Objekte angebracht sind, befinden sie sich bei der Röntgenfluoreszenz auf derselben Seite. Die vom Emitter ausgesendete Röntgenstrahlung regt die Elektronen der Oberflächenatome zu Schalensprüngen an. Dadurch entsteht eine für jedes Element einzigartige Fluoreszenz. Diese Rückstrahlung wird vom Detektor erkannt und an die Recheneinheit weitergeleitet, welche eine Zuordnung des jeweiligen Objekts durchführt. Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz können einzelne Kunststoffarten erkannt oder verschiedene Metalle voneinander getrennt werden (Gundupalli et al. 2017, Beel 2017).

Nahinfrarot Sensor

Für Nahinfrarotsensoren welche in der Abfallwirtschaft zur Sortierung eingesetzt werden, wird der spektrale Bereich von Wellenlängen zwischen etwa 800 und 2400 nm herangezogen. Diese Technik arbeitet mit dem Prinzip der Strahlungsreflexion

und -transmission. Bei der Bestrahlung von Objekten im Infrarotbereich treten bei bestimmten Wellenlängen Schwingungen der Moleküle auf. Die nicht von den Materialien absorbierten Strahlen in verschiedenen Wellenlängen werden reflektiert und können mit Hilfe eines Detektors wahrgenommen werden. Jede Materialart erlangt dadurch einen für sie einzigartigen „Fingerabdruck“, welcher sie klar von anderen Materialien unterscheidet. Das Aufgabegut wird mittels Förderband oder einer Schurre unter den angebrachten Sensoren durchgeführt, wobei Eigenschaften wie Form, Größe, Materialart und Position gespeichert werden. Die gewonnenen Daten werden in Echtzeit verarbeitet, wodurch ein großer Durchsatz an Material möglich ist (Kreindl 2010).

Vorteile NIRS

Durch die Nahinfrarottechnik sind Einsparungen hinsichtlich Zeit und Kosten der Sortierung möglich. Dies wird durch einen voll automatisierten Ablauf in Echtzeit, mit dem hohe Reinheitsgrade erzielbar sind und durch den die Nachsortierung durch zusätzliche Arbeitskräfte überflüssig wird, gewährleistet (Wotruba 2008).

Durch konstant steigende Rechenleistungen von Computern ist die immense Datenmenge in Echtzeit verarbeitbar. Aus diesem Grund sind hohe Durchsätze möglich. Die verwendete Software ist zumeist lernfähig und mit einigen Mausklicks umstellbar, wodurch auf sich ändernde Anforderungen bezüglich der Sortierung schnell reagiert werden kann (Wotruba 2008).

Da die Nahinfrarot Technik sich der Spektroskopie bedient können auch Teile voneinander getrennt werden, welche sich nach visuellen Kriterien beispielsweise farblich sehr ähnlich sind. Auch das Kriterium der Dichte wird hierbei nicht beachtet. Durch hochauflösende Sensoren und präzise eingestellte Austragungseinheiten können nun Teile in neuen Korngrößenbereichen getrennt werden (Wotruba 2008).

Nachteile NIRS

Ein großer Nachteil ist die verstärkte Verwendung von beschichteten oder lackierten Materialien. Da die Nahinfrarotspektroskopie lediglich die Oberfläche der Proben untersucht kommt es zu fehlerhaften Erkennungen (Martens 2011:32).

Schwarze und dunkle Materialien sind für die NIR-Sensoren noch immer ein Problem. Die dunklen Oberflächen reflektieren kein klares Spektrum und sind somit von den Sensoren nicht detektierbar (Beel 2017).

Da die Nahinfrarot-Technik hohe Durchsätze ermöglicht, kann dies zu Problemen im Sortierprozess führen. Um hohe Durchsätze zu gewährleisten ist eine hohe Belegungsdichte auf dem Förderband nötig. Da es jedoch unter keinen Umständen zu einer Überlagerung der Teile kommen darf, da dies zu Fehlanswürfen führt, ist die gleichzeitige Vereinzelung der Objekte essentiell. Des Weiteren ist die Genauigkeit der Austragung der Teile durch die Druckluftdüsen nicht immer gegeben. Vor allem flache und leichte Teile folgen nicht immer

der theoretischen Flugkurve oder werden durch Luftverwirbelungen abgefälscht (Wotruba 2008).

Stand der Technik

Zu den neuesten Entwicklungen im Bereich der Sortierung in der Abfallwirtschaft gehören sogenannte Hyper Spectral Imaging (HSI) Sensoren. Diese verfügen über eine höhere spektrale und örtliche Auflösung als traditionelle Sensoren. Anwendung finden diese Sensoren auch in der Nahrungsmitteltechnologie (López-Maestresalas et al. 2016).

Da die Anforderungen an die Sortiertechnik immer komplexer werden, reicht zumeist ein Sensor nicht mehr aus um die gestellten Aufgaben zu bewältigen. Aus diesem Grund werden verschiedene Sensoren kombiniert um die Trennleistung der Anlagen noch zu erhöhen. Beispiele hierfür sind. (Martens 2011:33).

- *„Farbzeilenkamera + elektromagnetischer Sensor: Sortierung von Mischmetallen in Einzelfractionen (Kupfer, Messing, graue Metalle, Rückgewinnung von legiertem Stahl); Sortierung von Elektroschrott (Leiterplatten, Kupfer);*
- *Elektromagnetischer Sensor + NIR-Sensor: Kunststoffsortierung, Metallabtrennung, Gewinnung isolierter Cu-Kabel;*
- *NIR-Sensor + VIS Sensor: Getränkekartons, Kunststoffsorten (PE, PP, PS, PET, ABS), Entfernung von Papier, Papiersorten, Entfernung von Metallen, Holzreinigung“ (Martens 2011:33).*

Im Bereich der schwarzen Kunststoffe gibt es noch Forschungsbedarf. Die Analyse der chemischen Zusammensetzung durch eine Kombination von HSI und MIRS (Mittel-Infrarot-Spektroskopie) könnte in diesem Bereich neue Möglichkeiten eröffnen (Beel 2017).

3 Praktischer Teil

In diesem Kapitel wird zunächst der generelle Aufbau des Sortierstands des AVAW beschrieben. Die einzelnen Komponenten, die in der verwendeten Sortieranlage Anwendung finden, werden betrachtet. Danach erfolgt eine Übersicht und Beschreibung des verwendeten Programms zur Auswertung der Spektren, dem Helios Optimizer des Herstellers EVK.

Nach der Abhandlung der Hard- und Software, wird mit den praktischen Versuchen fortgesetzt.

3.1 Übersicht Sortierstand

In Abb. 16 ist der für die Versuche verwendete Sortierstand des AVAW zu erkennen.



Abbildung 16: Sortierstand AVAW.

3.1.1 Geräteteile

Schwingförderer

Für die Zubringung zur Schurre und die Vereinzelung der Teile ist ein Schwingförderer zuständig. In Abb. 17 ist neben diesem auch der vorgeschaltete Aufgabetrichter erkennbar.



Abbildung 17: Aufgabetrichter inkl. Schwingförderer.

Spektraler Sensor

Für eine optimale Funktion des spektralen Sensors muss das Detektionsfeld ideal ausgeleuchtet sein. Dafür sorgen die in Abb. 18 zu erkennenden Halogen-Lampen. Der Sensor ist links oben platziert.



Abbildung 18: Spektraler Sensor.

Induktiver Sensor

Abb. 19 zeigt die Glasschurre des Sortierstandes. Die Leiste mit den elektromagnetischen Spulen, die den induktiven Sensor bilden, ist quer zur Materialflussrichtung hinter der Glasscheibe angebracht.



Abbildung 19: Schurre Sortierer.

Druckluft Austragsleiste

Am unteren Ende der Glasschurre, den Sensoren nachgeschaltet, befindet sich die in Abb. 20 sichtbare mechanische Auswurfanlage. Diese besteht aus Düsen, welche die detektierten Objekte mittels Druckluft vom Materialstrom trennen.



Abbildung 20: Druckluft- Austragsleiste.

Recheneinheit

Die immense Datenmenge muss in Echtzeit verarbeitet werden um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Die Auswerteeinheit, die dies bewerkstelligt, ist in Abb. 21 zu sehen.



Abbildung 21: Recheneinheit.

3.1.2 Helios Optimizer

Die Software, die zur Visualisierung der Daten verwendet wurde, ist der Helios Optimizer des steirischen Herstellers EVK mit Firmensitz in Raaba bei Graz.

In dieser können die durch den Sensor erhaltenen Aufnahmen geladen werden. Anschließend ist es möglich verschiedene Spektren zu visualisieren. Dazu werden einzelne Pixel oder eine Gruppe aus Pixeln ausgewählt und einem Stoff zugeordnet. Das Programm erstellt einen Mittelwert für die gesamte Auswahl des jeweiligen Stoffes. Es können des weiteren Schwellenwerte, die die Abweichung vom Referenzspektrum angeben, eingestellt werden. Mit größerem Schwellwert steigt die Anzahl der zugeordneten Pixel, jedoch führt er dementsprechend eher zu falschen Zuweisungen. Die Spektren können in verschiedene Bereiche eingeteilt werden, danach ist es möglich die Wertigkeit der einzelnen Bereiche zu definieren, um jene mit mehr Signifikanz hervorzuheben.

Da die erste Ableitung der Spektren üblicherweise viel stabiler gegen Schwankungen der Beleuchtung und Oberflächenbeschaffenheit der Proben ist, wird in der Praxis diese zumeist zur Klassifizierung herangezogen. Daher wurde auch im Rahmen dieser Arbeit die Erkennung auf diese ausgelegt. Um die Unterschiede in den Kurven besser sichtbar zu machen ist es möglich eine Normierung der Y-Achse durchzuführen, dadurch werden die Kurven von den Minima bis zu den Maxima geweitet. (Gilli E., 31.10.2018)

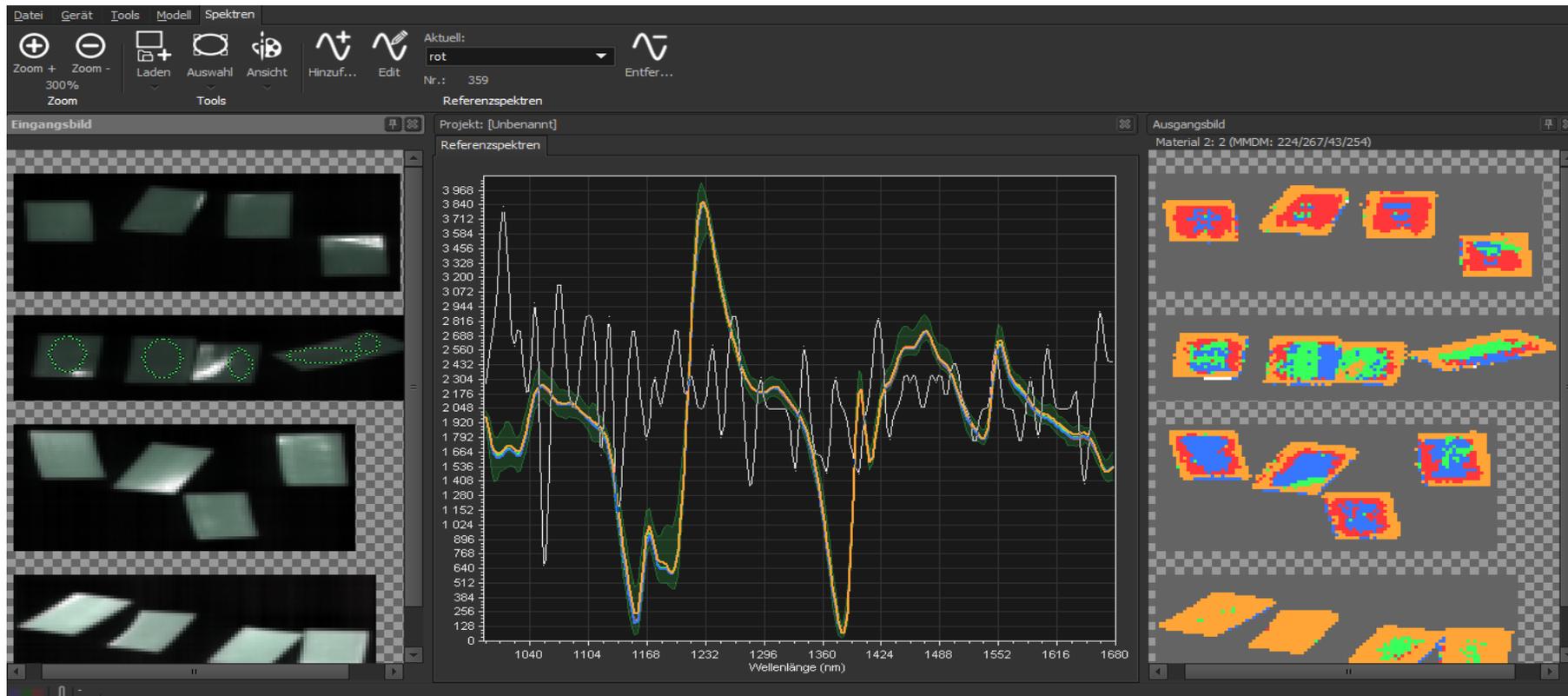


Abbildung 22: Benutzeroberfläche Helios Optimizer

In Abb. 22 ist die Benutzeroberfläche des verwendeten Programms abgebildet. Im linken Teil sind die vom Sensor abgelichteten Originalaufnahmen, im mittleren Segment die aktuell eingespeicherten Spektren und rechts sind die den jeweiligen Spektren zugeordneten Pixel der Aufnahmen zu erkennen. In diesem speziellen Fall liegen die Spektren sehr nahe beieinander, was auch das „bunte“ Ergebnis erklärt. Zur Demonstration wurden hier vier Aufnahmen von rotem PE-LD verwendet. Die weiße Kurve spiegelt das Spektrum des Pixels wider, auf dem sich der Mauszeiger aktuell befindet, in diesem Fall ist dies ein undefiniertes Hintergrundrauschen. Die jeweiligen Kurven sind ein Mittelwert aus allen zugeordneten Pixeln. Aus diesen erfolgt die rechts abgebildete, farbliche Zuordnung zu den einzelnen Spektren.

3.2 Spektren der Kunststoffe

Die verwendeten Kunststoffstücke sind in großen Mengen am Lehrstuhl des AVAW vorrätig, da sich diverse, laufende Arbeiten in verschiedenen Ausmaßen und Anwendungen mit ihnen beschäftigen.

Vor Beginn aller Aufnahmen wurden zwei Schritte durchgeführt, um die Gleichmäßigkeit der Untersuchungen zu gewährleisten.

- Da viele verschiedene Versuche zur Trennung von Materialien parallel an dem Sortierer durchgeführt wurden, unter anderem wurde auch Bauschutt getrennt, wobei eine starke Staubfreisetzung unvermeidlich war, fand eine Reinigung, im Speziellen im Bereich des Detektionsfeldes auf der Glasschurre statt.
- Anschließend wurde zur Kalibrierung der Sensoren ein Weißabgleich durchgeführt.

Nachdem dieses Procedere abgearbeitet war, konnte mit der Durchführung der eigentlichen Versuche begonnen werden.

3.2.1 Rohspektren ohne Einflüsse

Die in der heutigen Gesellschaft meist verwendeten Kunststoffe, vorwiegend Thermoplaste, wurden untersucht. Im Detail sind dies folgende acht Kunststoffsorten (siehe Abb. 23):



Abbildung 23: Übersicht Kunststoffe

- PE-LD (rot),
- PE-HD (grau),
- PE-LLD (türkis),
- PP (lila),
- PVC (klar, rechts),

- PET (klar, links),
- PS-HI (weiß),
- TPU (gelb).

Zu Beginn wurden die Oberflächenspektren der Kunststoffe ohne äußere Einflüsse betrachtet. Dazu wurden die Objekte so wie sie vorhanden waren über den NIR-Sensor gebracht und die Aufnahmen ausgewertet.

3.2.2 Unterschiede Oberfläche glatt/rau

Die unbehandelten Kunststoffe haben allesamt eine glatte, glänzende Oberfläche. Somit wurden als erster und einfachster Schritt die Teile mit Hilfe eines Exzentrerschleifgeräts angeraut, da sich die Reflexion von sowohl sichtbarem, als auch infrarotem Licht deutlich mit der Oberflächenstruktur ändert (siehe Abb. 24).



Abbildung 24: Gegenüberstellung glatt/rau, links PP, rechts PVC.

3.2.3 Simulation der Reinigung der Kunststoffe (Wasser, Spülmittel, Seife)

Aufbereitete Kunststoffe erfahren häufig vor der Sortierung eine Reinigung um anhaftende Verschmutzungen, die einerseits das Sortierergebnis beeinflussen könnten, andererseits im Recyclingprozess unerwünscht sind, zu beseitigen. Im Rahmen dieser Säuberung werden sowohl Wasser als auch Reinigungsmittel eingesetzt. Es ist möglich, dass Rückstände dieses Verfahrensschrittes auf den Kunststoffteilen anhaften und somit Einfluss auf die Spektrenerkennung der einzelnen Teile haben.

Um das Spektrum von reinem Wasser zu gewinnen, wurden mit Hilfe von Glasplatten, da Nahinfrarot nicht auf Glas reagiert und somit keinen Einfluss hat, und Klebeband-Schalen gebaut, in die ein definierter Füllstand eines flüssigen Mediums eingebracht werden konnte.

Diese Schalen fanden später nochmals Anwendung in der Spektrengewinnung von Frittieröl, handelsüblichem Benzin und Diesel.

Die Spektren von Handseife und Spülmittel wurden durch das großzügige Auftragen auf diese Glasplättchen ermittelt.

Zur Ermittlung des Einflusses von Wasser auf die Kunststoffe wurden erneut Schalen, siehe Abb.25, mittels Klebeband und den Probeteilen hergestellt. Danach konnten diese mit einem definierten Füllstand über die Sensoren geführt werden.



Abbildung 25: Schalen für Flüssigkeitsfüllstände.

Die Auswirkung von Spülmittel wurde durch großzügiges Auftragen auf die Proben ermittelt. Der direkte Einfluss von Seife auf die Proben wurde nicht getestet. Lediglich das Spektrum wurde der Vollständigkeit halber ermittelt.

3.2.4 Einflussfaktor petrochemische Flüssigkeiten (Öl, Benzin, Diesel)

Kunststoffe und Produkte aus der Petrochemie, wie in vorliegendem Fall Frittieröl, Benzin und Diesel, kommen immer wieder in Berührung. Vor allem im Bereich des Landfill Mining ist diese Art der Verschmutzungen keine Seltenheit, daher wurde deren Auswirkung auf die Kunststoffe untersucht.

Nachdem die Grundspektren der drei verwendeten Flüssigkeiten gemäß Kapitel 3.2.3. bestimmt waren, konnten die Kunststoffe mit verschiedenen Schichtdicken benetzt werden, um so die unterschiedlichen Auswirkungen zu untersuchen.

Es wurden, wie schon zuvor mit Wasser, verschiedene Schichtdicken, unter Zuhilfenahme der mittels Klebeband hergestellten Schalen, siehe Abb. 25, von den drei Flüssigkeiten auf die Kunststoffteile aufgebracht. Danach erfolgte eine Untersuchung. Um die

Geruchsbelastung im Labor, vor allem durch die Benzin- und Dieseldämpfe, auf ein Minimum zu beschränken, wurde ein verschließbarer Müllsack an der Unterkante der Schurre befestigt, in welchen die Proben nach dem Durchwandern des Sensors fielen.

Im Zuge des Landfill Mining werden Deponien geöffnet, um die darin enthaltenen Ressourcen zu nutzen. Da in Deponien der Kontakt zwischen Kunststoffen und Ölen nicht vermeidbar ist, wurde dies im Rahmen der Arbeit simuliert. Daher wurden Kunststoffproben für 6 Monate in gewöhnliches Frittieröl eingelegt (Abb. 26) und anschließend untersucht.



Abbildung 26: In Frittieröl eingelegte Kunststoffe.

Benutztes Motoröl, welches durch den Gebrauch mit Ruß verunreinigt ist und daher zu einem Problem für die Infrarot-Sensoren werden kann, wurde auf die Objekte aufgebracht, siehe Abb. 27, und danach analysiert.



Abbildung 27: PS-HI Teile mit Altöl benetzt.

3.2.5 Einflussfaktor Alterung (Witterung, Temperatur)

Um eine Lagerung der Kunststoffe im Freien zu simulieren, den Zeitraum zwischen Sammlung und Sortierung, wurden die Teile für sechs Wochen der Witterung ausgesetzt. Dazu fand eine Fixierung auf einem Brett statt, welches anschließend am Dach des Umweltschutzgebäudes angebracht wurde (Abb. 28).



Abbildung 28: Vorbereitung für Witterung.

In verschiedenen Jahreszeiten haben die zu trennenden Kunststoffe verschiedene Temperaturen. Aus diesem Grund wurden die Objekte bei verschiedenen Temperaturen, nämlich bei -15 °C und 50 °C , untersucht. Dies entspricht den Temperaturextremen die in unseren Breiten vorkommen können. Zur Erwärmung wurde ein Trockenschrank, zur Kühlung eine Gefriertruhe eingesetzt.

Zur Simulation eines weiteren Temperaturextrems wurden die Proben auf deren Schmelztemperatur, siehe Tab. 3 in Kapitel 2, bzw. im Fall von TPU über die Gebrauchstemperatur, erhitzt und nach der Abkühlung abermals abgelichtet. Abb. 29 zeigt die Auswirkungen auf PVC.



Abbildung 29: Geschmolzene PVC-Proben.

3.2.6 Chemische Einflussfaktoren

Wie aus Tabelle 1 in Kapitel 2.1.4. ersichtlich ist, besitzen Kunststoffe eine generell gute Beständigkeit gegen verschiedenste Chemikalien. Dennoch fanden auch für diese Faktoren Untersuchungen statt. Die Kunststoffe wurden mit den jeweiligen Chemikalien bestrichen. Nach einer kurzen Einwirkzeit von etwa zwei Minuten erfolgte eine Reinigung der Proben mit Wasser. Die Teile wurden nach der Trocknung untersucht.

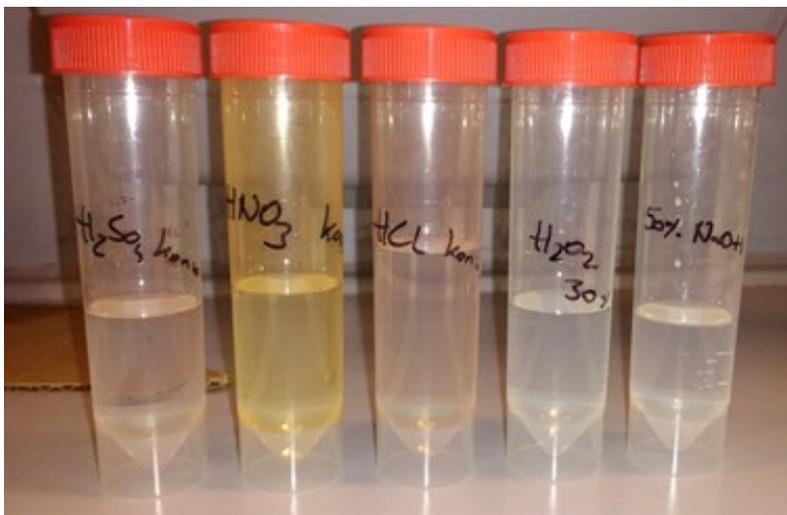


Abbildung 30: Verwendete Chemikalien.

- Konzentrierte Salzsäure HCl,
- Konzentrierte Salpetersäure HNO₃,
- Konzentrierte Schwefelsäure H₂SO₄,
- 50 % Natriumhydroxid NaOH und
- 30 % Wasserstoffperoxid H₂O₂.

3.2.7 Verschmutzung durch Anhaftungen

Sollten Proben aus dem Bereich des Landfill Mining sortiert werden, sind diese mit Verschmutzungen und Anhaftungen aller Art verunreinigt. Die chemischen Auswirkungen können daher sehr vielfältig sein, weshalb die möglichen Variablen zu umfangreich sind. Daher wurde nur untersucht inwieweit die Anhaftungen die Erkennung des darunterliegenden Trägermaterials beeinflussen. Spezielles Augenmerk liegt hier auf den Übergangsbereichen zwischen Trägermedium und Anhaftung. Der Bereich der Anhaftungen selbst ist für die Änderung des Spektrums irrelevant, da die Infrarotstrahlung diese nicht durchdringen kann, aber natürlich können Anhaftungen das Sortierergebnis durch Fehlausträge beeinflussen. Die Verschmutzungen besitzen ein individuelles Spektrum.

Die simulierte Anhaftung ist die getrocknete Feinfraktion von vorab sortiertem Material aus einer Deponie, welche zur besseren Haftung in Wasser aufgeweicht wurde. Diese wurde gem. Abb. 31 auf die Proben aufgetragen.



Abbildung 31: PE-LD Proben mit Anhaftungen.

4 Ergebnisse / Diskussion

Nun wird auf die gewonnenen Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 3 eingegangen.

Die gemäß dem, in Kapitel 3 beschriebenen, Vorgehen zur Gewinnung von Oberflächenspektren werden hier grafisch dargestellt und bewertet.

Da für jede der acht Kunststoffsorten zumeist alle Einflüsse angewandt wurden, sind die Kombinationsmöglichkeiten in der Auswertung beträchtlich. Daher werden bei gleichen oder ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Einflüsse die Auswirkungen auf einen Kunststoff exemplarisch dargestellt.

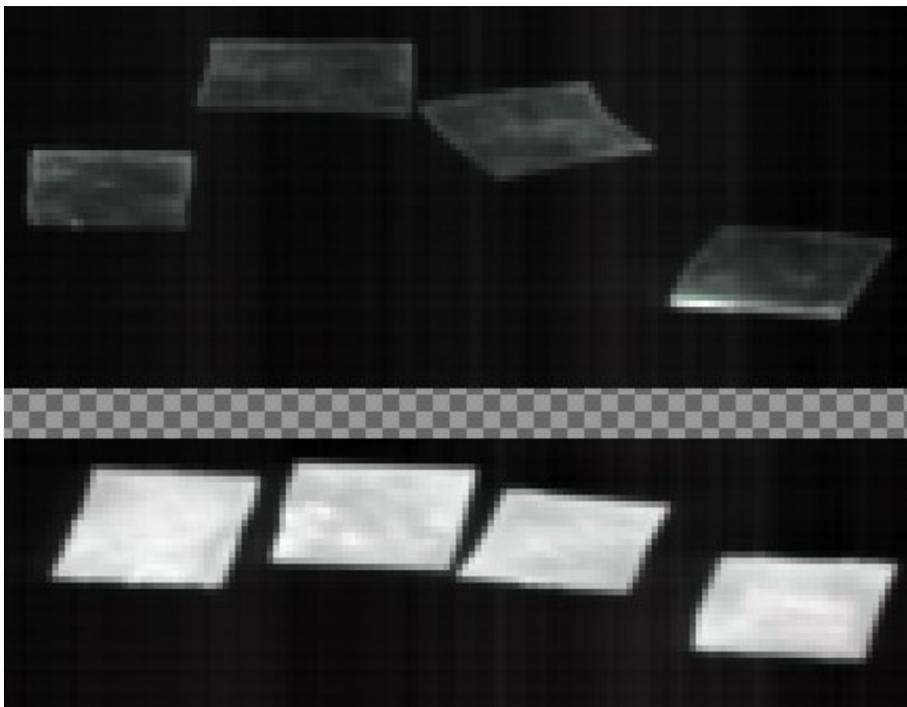


Abbildung 32: Aufnahmen von glattem (oben) und rauem (unten) PVC des Nah-Infrarot-Sensors.

In obiger Abb. 32 sind zwei Aufnahmen zu erkennen. Die erste Aufnahme zeigt glattes PVC, für die Zweite wurde die Oberfläche angeraut. Die Transparenz der PVC und PET Teile führt zu einer verminderten Rückstrahlung an den Infrarot-Sensor. Durch das Anrauen der Oberfläche wird die Reflektion der Strahlung erhöht, ein deutlicheres Spektrum wird an den Detektor zurückgeworfen und die Aufnahmen sind dadurch deutlicher.

4.1 Rohspektren und abgeleitete Spektren der Kunststoffe ohne Einflüsse

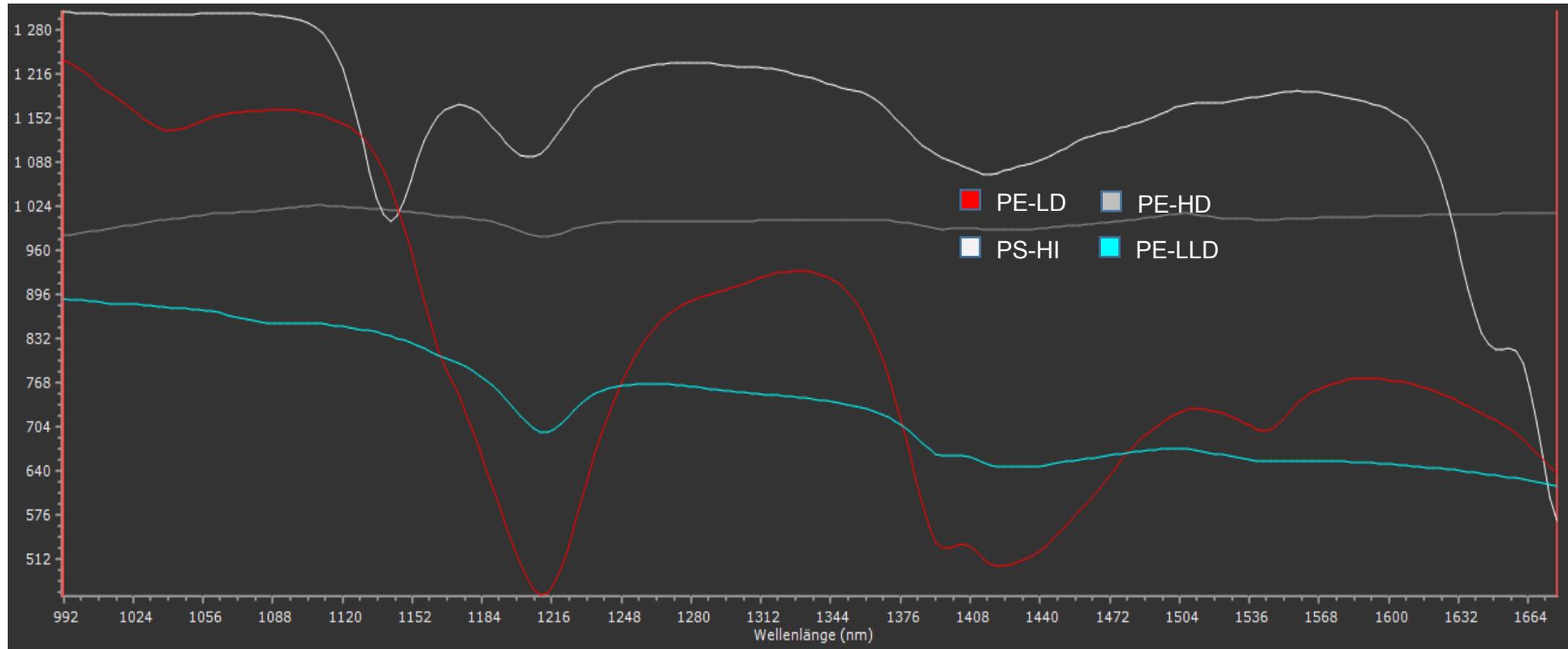


Abbildung 33: Rohspektren von PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI ohne Normierung.

Im verwendeten Helios Optimizer werden die Rohspektren der Partikeloberflächen erfasst (siehe Abb. 32). Die farbliche Zuordnung der Spektren ist in der jeweiligen Grafik angegeben. Die hier abgebildeten Kunststoffe sind PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI. Auf der X-Achse ist die Wellenlänge in nm angegeben, auf der Y-Achse die vom Detektor erfasste Intensität der reflektierten Strahlung. Hier wurde noch keine Normierung vorgenommen.

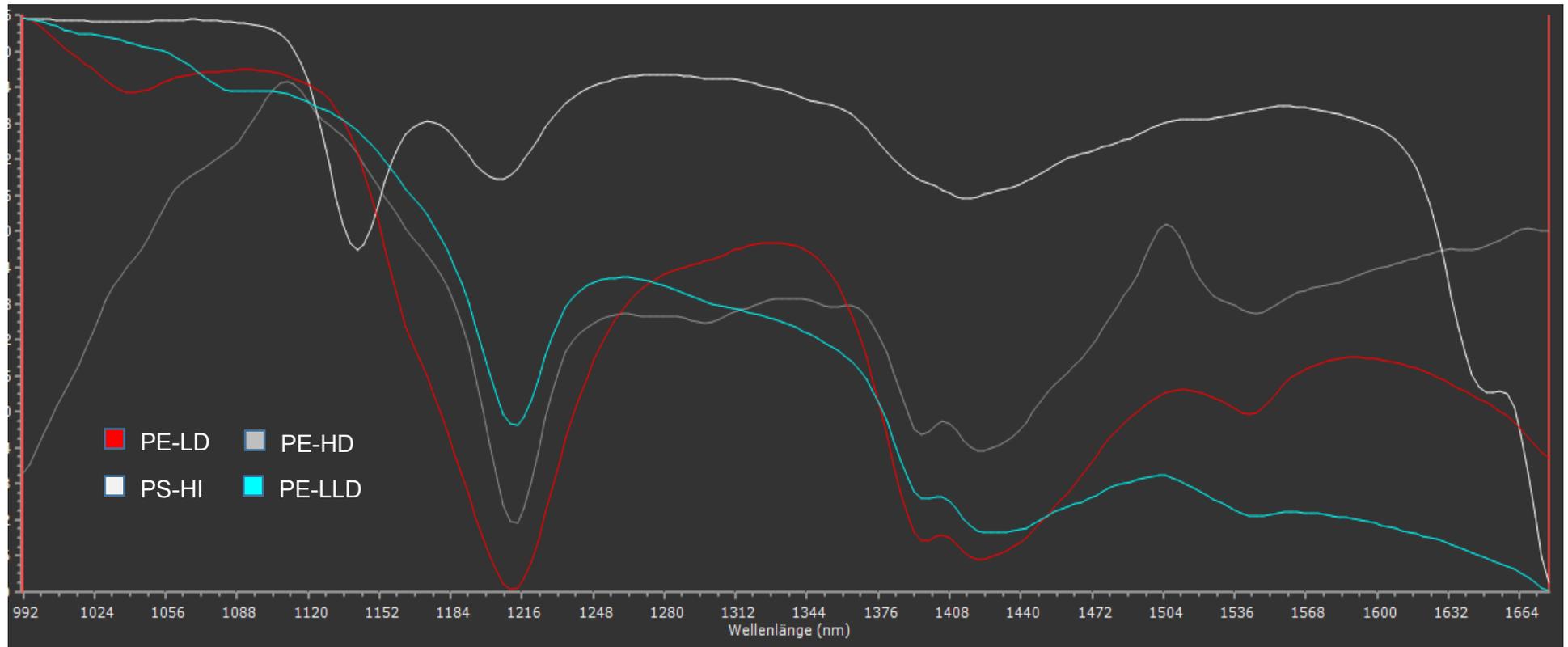


Abbildung 34: Rohspektren von PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI nach Normierung.

In Abb. 34 wurden die Spektren aus Abb. 33 einer Normierung unterzogen. Die Unterschiede sind vor allem bei Kurven, die vor der Normierung einen flachen Verlauf besitzen, erkennbar, z.B. PE-HD und PE-LLD. Bei PE-LD und PS-HI sind hingegen nur geringe Veränderungen erkennbar. Durch die Normierung ist die Skala der Y-Achse nicht mehr gültig.

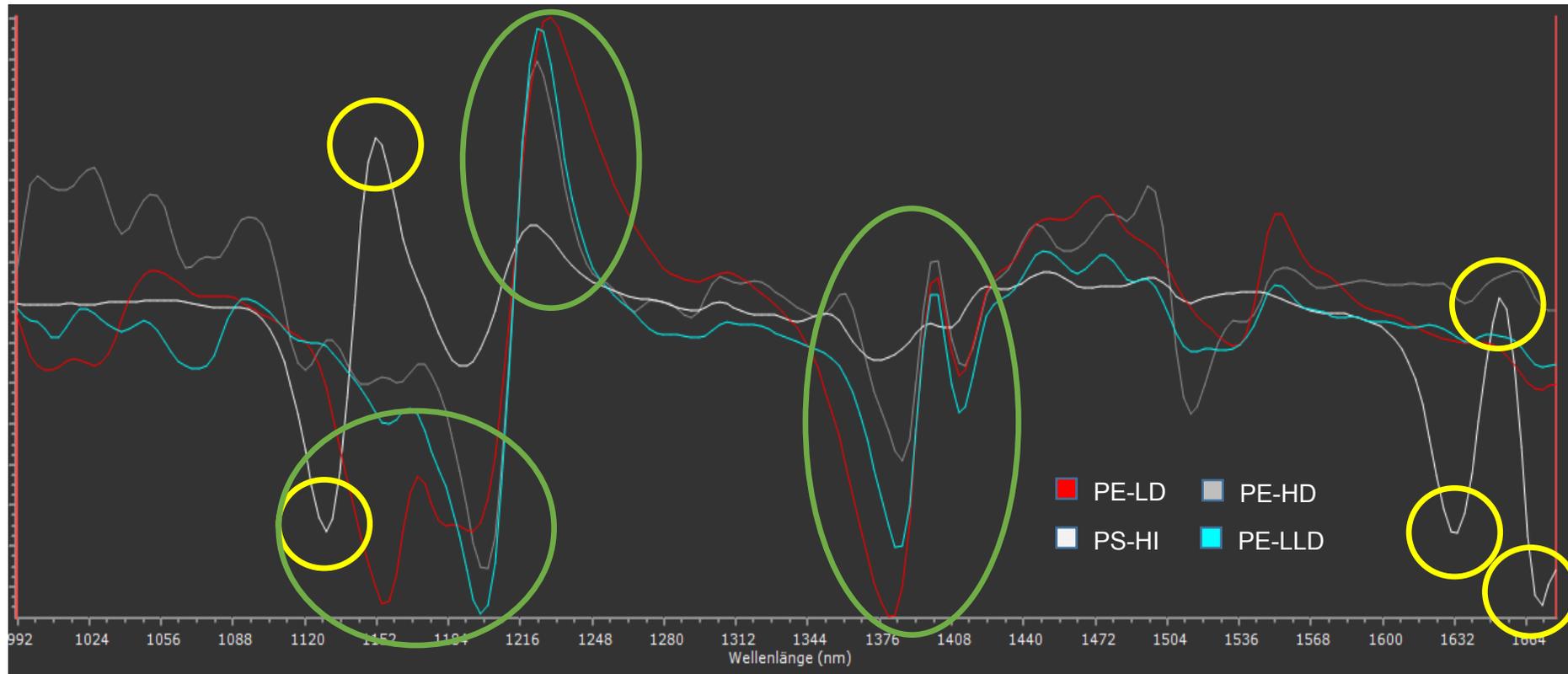


Abbildung 35: Abgeleitete Spektren von PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI nach Normierung.

In Abb. 35 sind die vier vorherigen Rohspektren in der ersten Ableitung dargestellt. Die Normierung wurde bereits durchgeführt. Die Extrema im Spektrum von PS-HI sind durch die gelben Markierungen hervorgehoben. Ähnlichkeiten in den Spektren von PE-LD, PE-HD und PE-LLD lassen sich bei den grünen Markierungen erkennen.

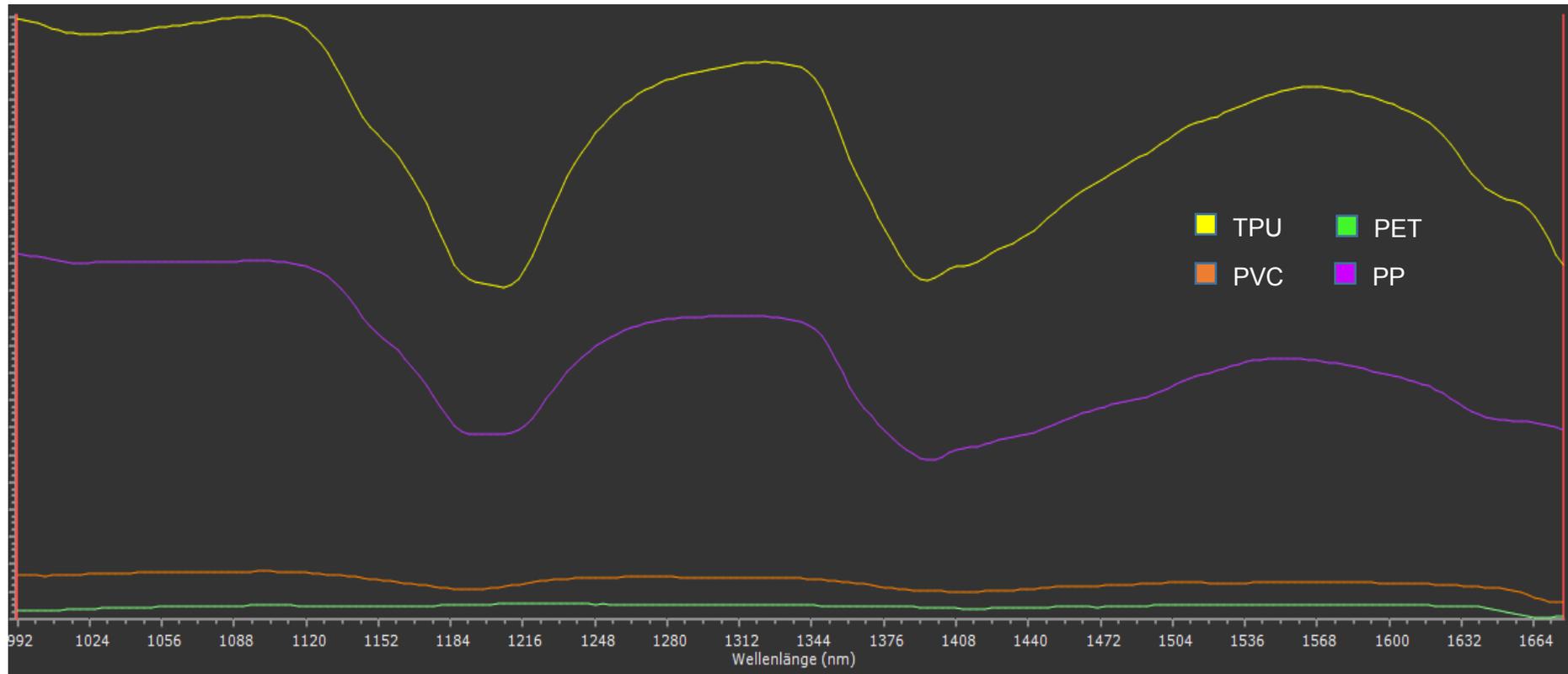


Abbildung 36: Rohspektren von TPU, PET, PVC und PP ohne Normierung

Hier sind die Rohspektren der restlichen vier Kunststoffe zu erkennen. Die Transparenz von PET und PVC wirkt sich stark auf die Intensität der reflektierten Strahlung aus. Dies erklärt die schwache Ausprägung des spektralen Verlaufs und die geringe Intensität der beiden Kurven.

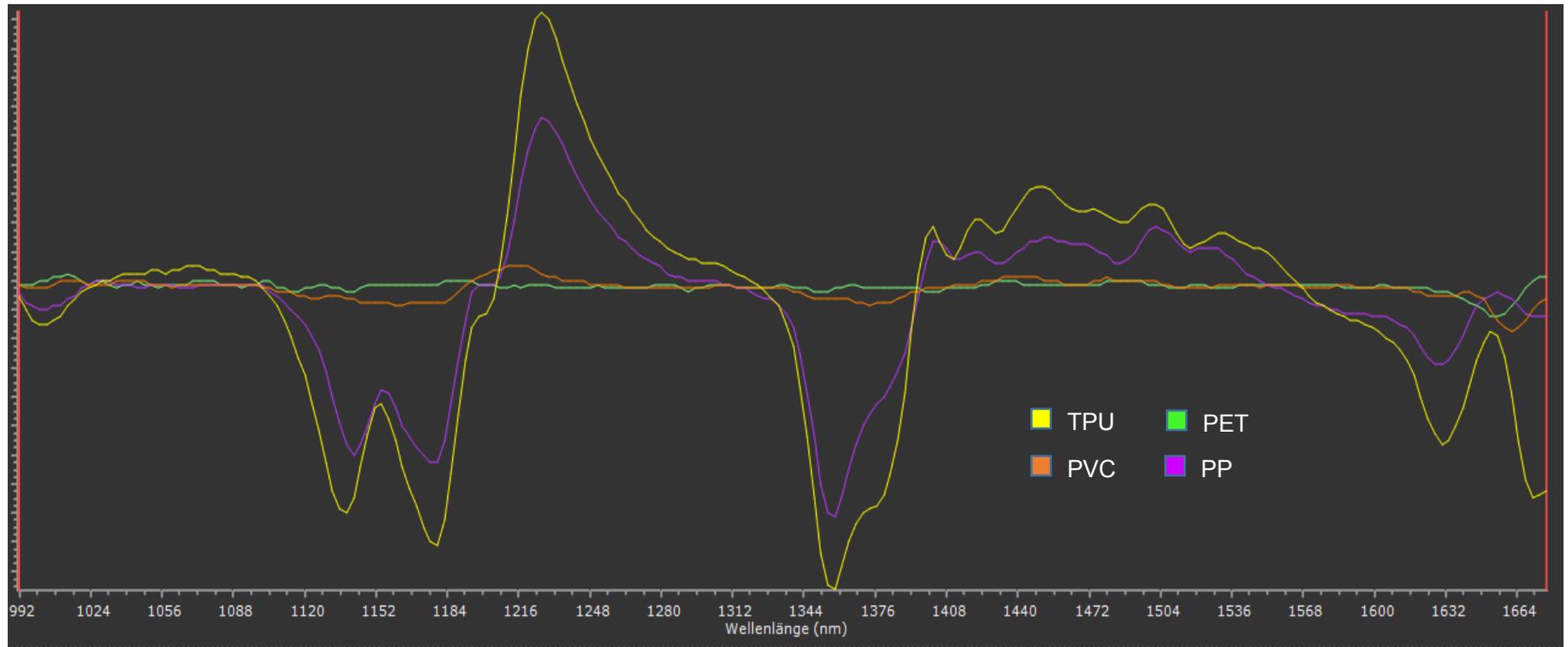


Abbildung 37: Abgeleitete Spektren von TPU, PET, PVC und PP ohne Normierung.

In Abb. 37 sind die abgeleiteten Kurven der Kunststoffe aus Abb. 36 zu sehen. Auch hier sind die schwachen Ausprägungen der Spektren von PVC und PET, auf Grund der Transparenz, erkennbar.

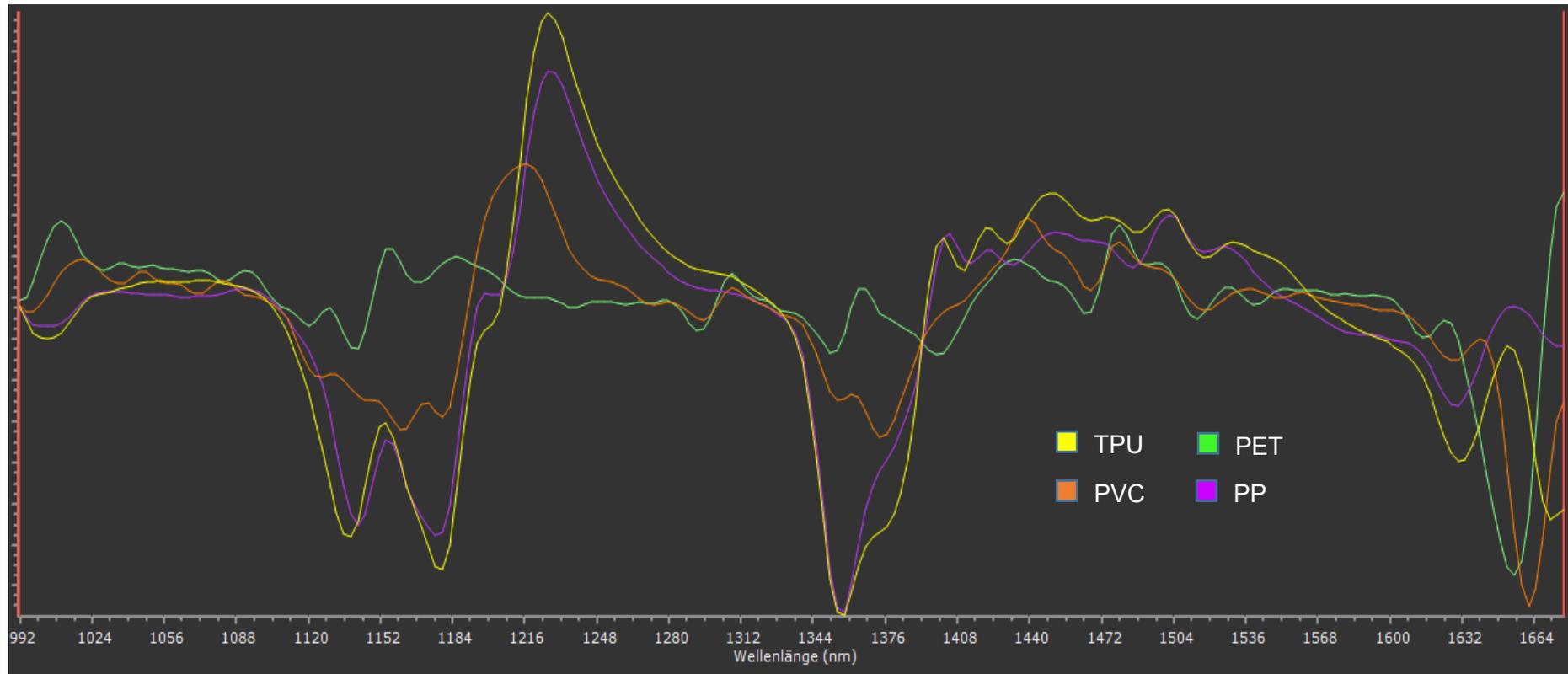


Abbildung 38: Abgeleitete Spektren von TPU, PET, PVC und PP nach Normierung.

In Abb. 38 sind die abgeleiteten Spektren der vier vorigen Kunststoffarten gezeigt. Zu erkennen ist die Ähnlichkeit der Kurven von PP und TPU. Das Spektrum von PET ist weitestgehend verrauscht. Erst der ausgeprägte Knick bei etwa 1600 nm ist für PET charakteristisch.

4.2 Spektren von Verunreinigungen ohne Kunststoffe

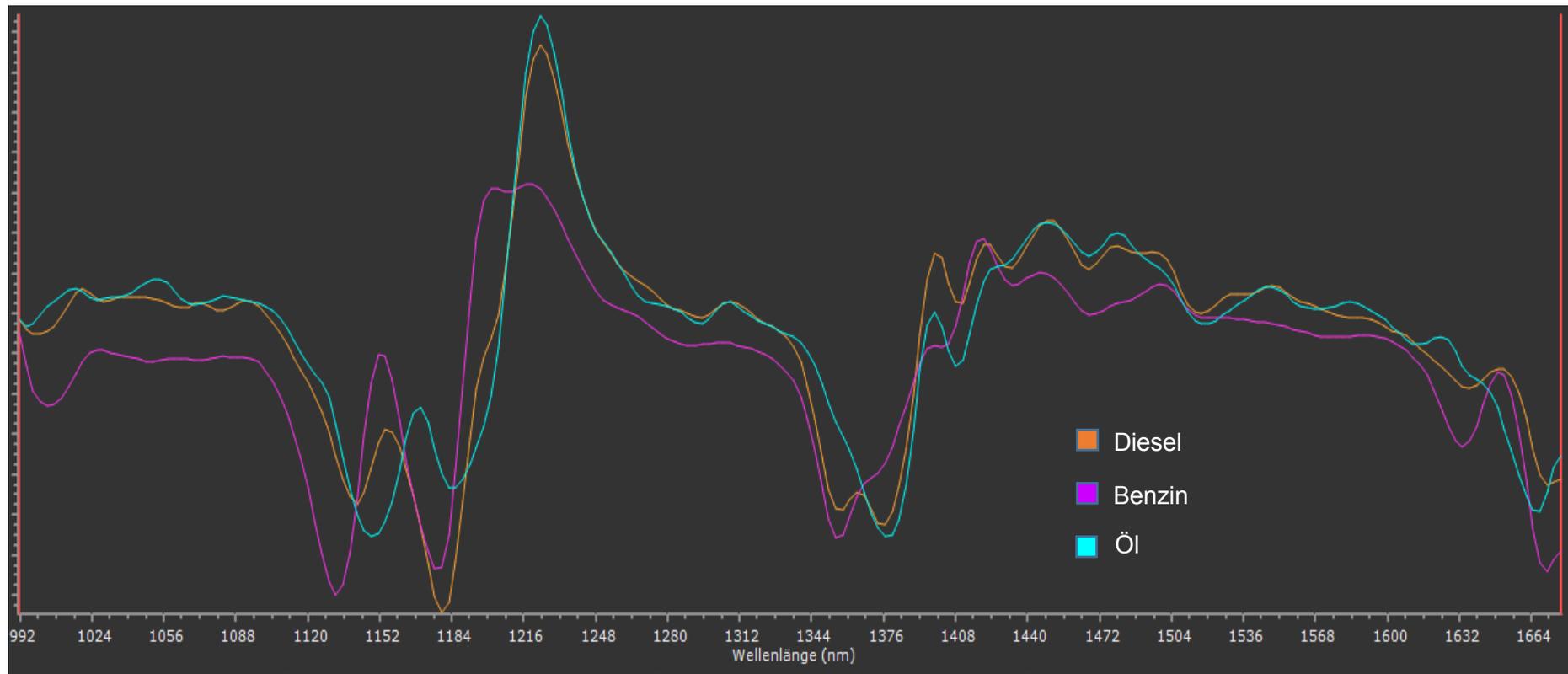


Abbildung 39: Abgeleitete Spektren von Diesel, Frittieröl und Benzin nach Normierung.

Die Spekten der drei petrochemischen Einflussfaktoren Diesel, Frittieröl und Benzin, sind in Abb. 39 zu sehen. Wie man sieht sind sich die Spekten von Diesel und Öl ähnlicher als die von Diesel und Benzin. Verglichen mit den abgeleiteten Spekten der Kunststoffe, herrscht zwischen TPU und Diesel und zwischen PE-LD und Öl große Ähnlichkeit.

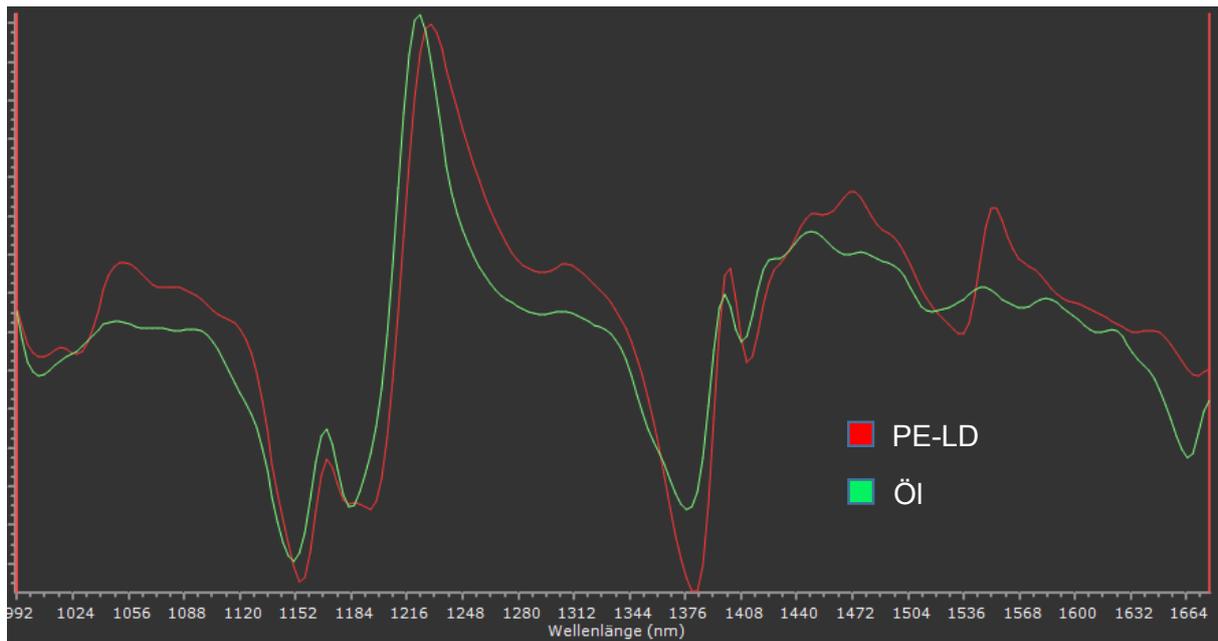


Abbildung 40: Abgeleitete Spektren von PE-LD und Frittieröl nach Normierung.

In Abb. 40 und 41 sind die Spektren von Frittieröl und Diesel und dazu die Spektren von PE-LD und TPU abgebildet. Die Ähnlichkeit ist vor allem durch die Ausprägung der Peaks erkennbar. Dies könnte auf einen ähnlichen molekularen Aufbau hindeuten.

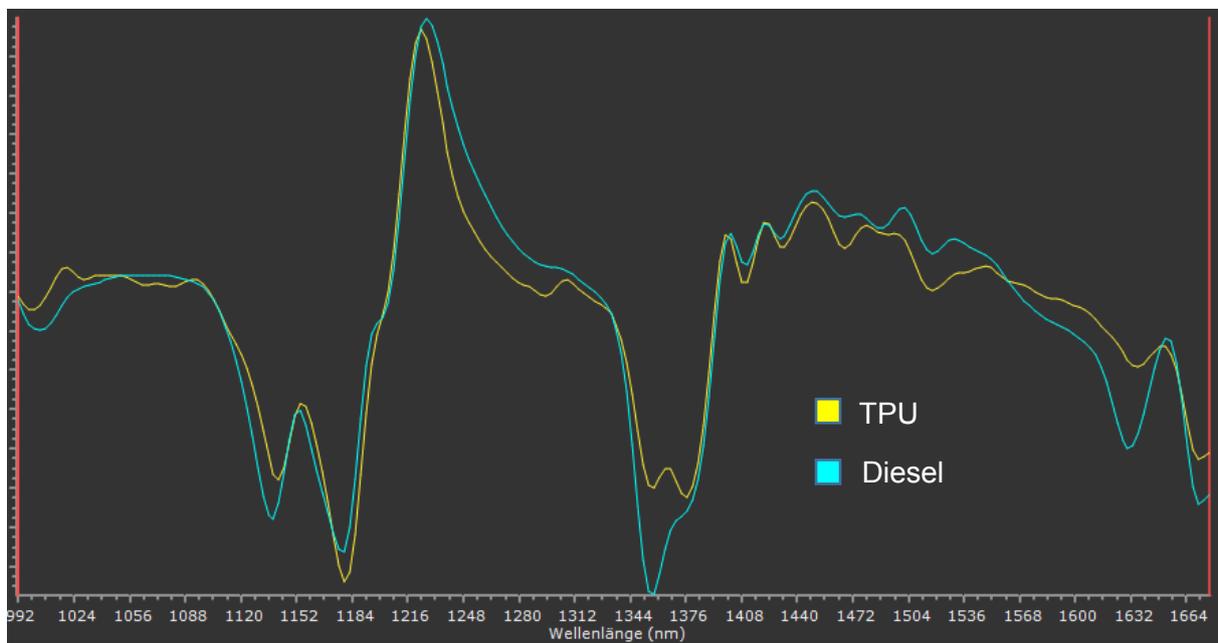


Abbildung 41: Abgeleitete Spektren von TPU und Diesel nach Normierung.

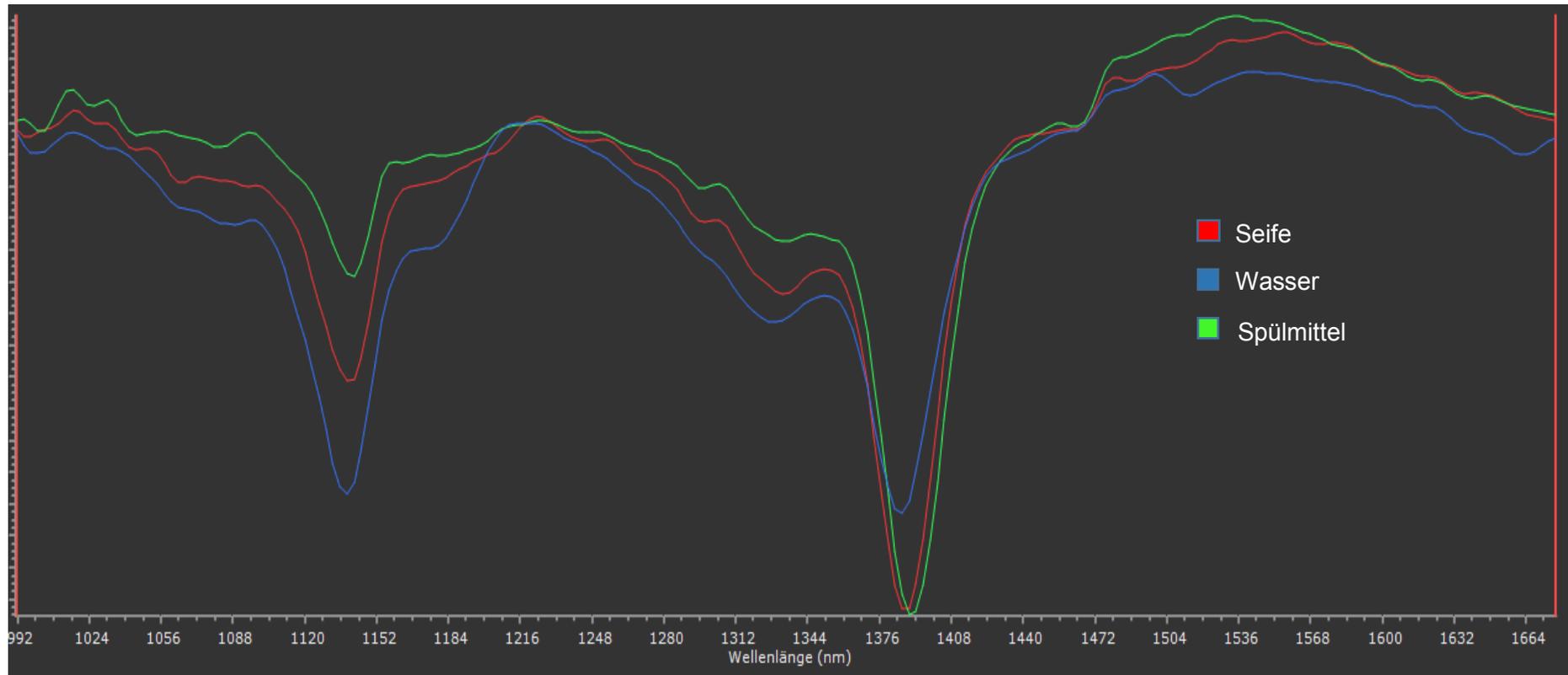


Abbildung 42: Abgeleitete Spektren von Seife, Spülmittel, Wasser nach Normierung.

In Abb. 42 sind die Spektren von Wasser, Seife und Spülmittel abgebildet. Da die Seife und das Spülmittel ebenfalls auf Wasserbasis sind, besitzen alle drei die typischen Peaks bei 1140 und 1390 nm.

4.3 Auswirkungen von verschiedenen äußeren Einflüssen

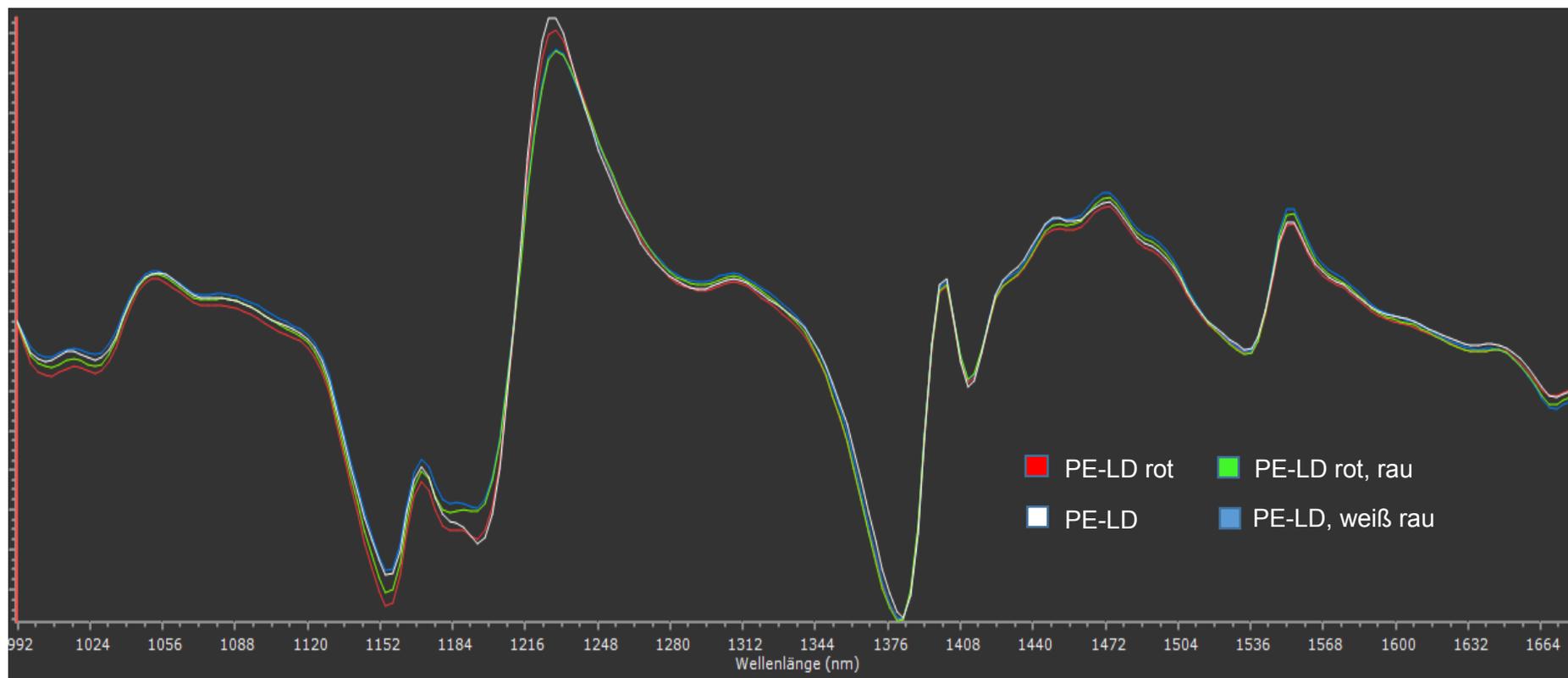


Abbildung 43: Abgeleitete Spektren von PE-LD in roter und weißer Farbe mit jeweils glatter und rauher Oberfläche nach Normierung.

Es wurden zwei verschiedene Arten von PE-LD verwendet. Einmal mit weißer und einmal mit roter Farbe. In Abb. 43 sind die Spektren beider Farben gegenüber gestellt. Des Weiteren wurden beide Arten mit rauhen Oberflächen abgebildet. Über die gesamte Länge des Spektrums laufen die vier Kurven beinahe parallel zueinander. Durch das Anrauen der Oberfläche ändert sich die Kurve nicht grundlegend, im Rohspektrum kommt es lediglich zu einer leichten Steigerung der Intensität. Auf der folgenden Seite sind noch zwei vergrößerte Abschnitte der Kurve abgebildet.

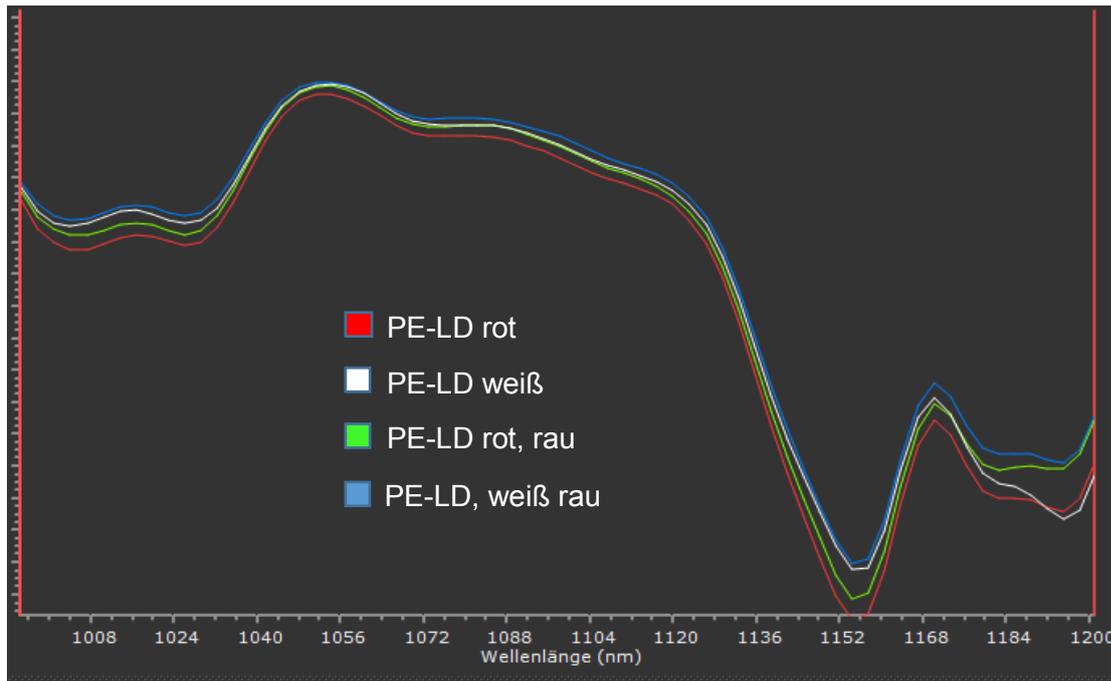


Abbildung 44: Detailaufnahme der vier PE-LD Proben im Bereich von 1000 bis 1200 nm nach Normierung.

Auf den Abbildungen dieser Seite (Abb. 44 + 45) sind die annähernd gleichen Verläufe der verschiedenen Kurven erkennbar. Die raue Oberfläche sorgt in diesen Bereichen vor allem an den Extrema bei beiden Sorten für eine leichte Hebung der Kurven.

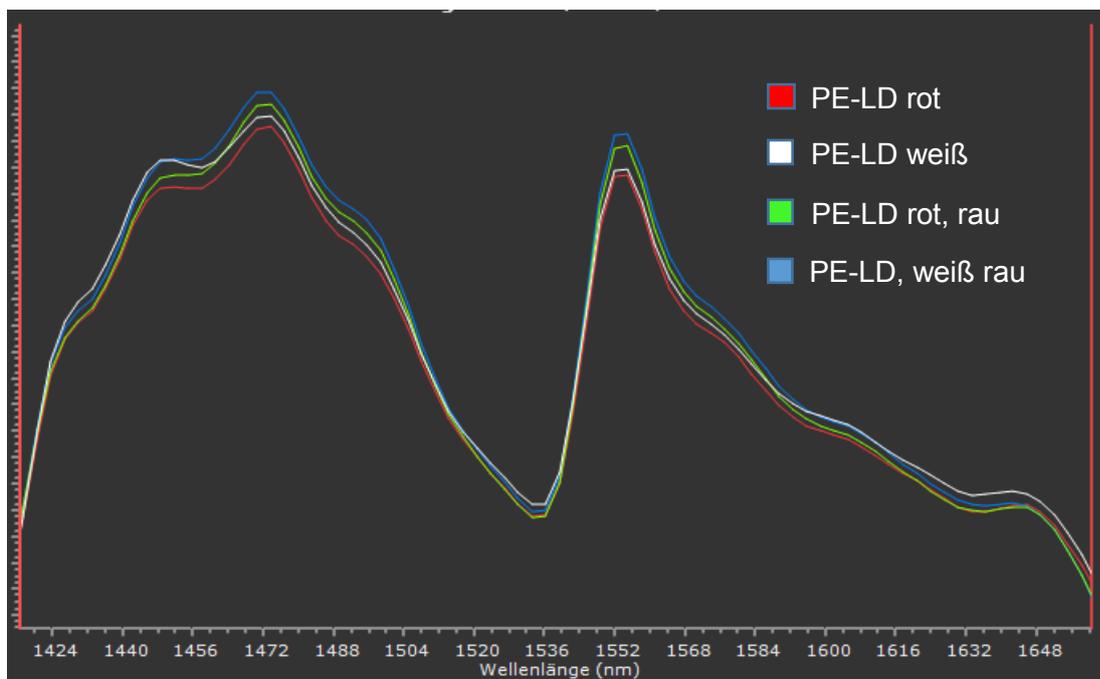


Abbildung 45: Detailaufnahme der vier PE-LD Proben im Bereich von 1400 bis 1700 nm nach Normierung.

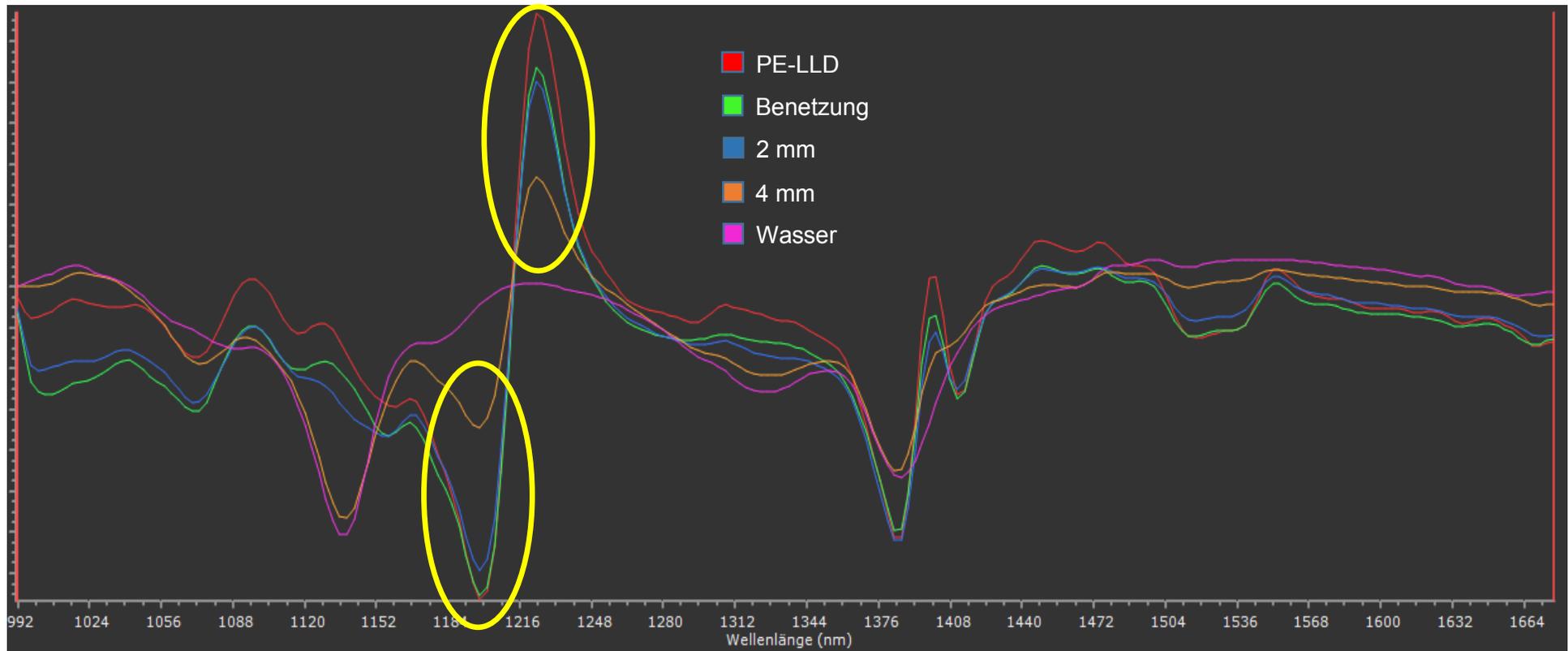


Abbildung 46: Abgeleitetes Spektrum von PE-LLD mit verschiedenen Schichtdicken von Wasser nach Normierung.

In Abb. 46 ist der Einfluss des Wassers erkennbar. Je dicker die Wasserschicht auf der Kunststoffprobe ist, desto stärker ist die Änderung auf die Kurve. Die gelb markierten Peaks werden gedämpft. Das Spektrum nähert sich dem des reinen Wassers immer weiter an. Durch das charakteristische Spektrum von dem darüber liegenden Wasser wird das Spektrum der Probe darunter überdeckt.

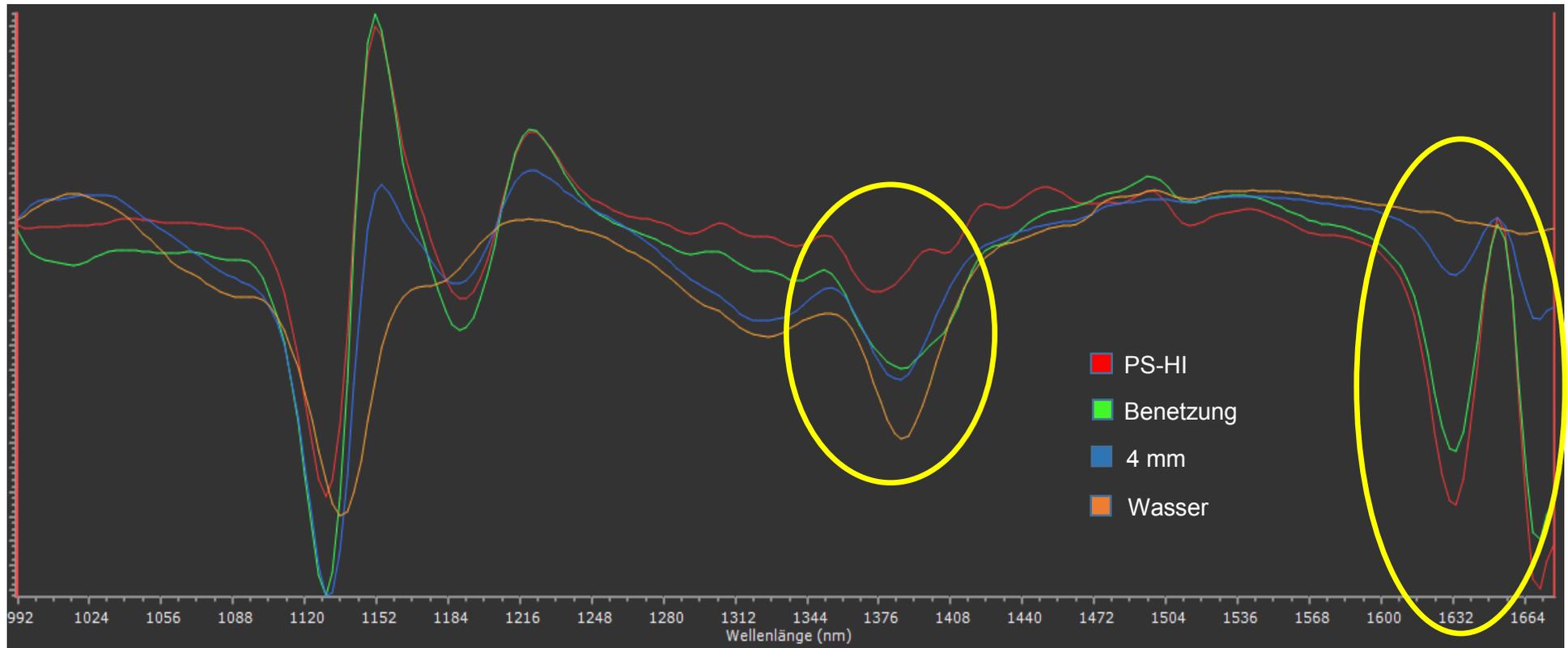


Abbildung 47: Abgeleitetes Spektrum von PS-HI mit rauer Oberfläche verschiedenen Schichtdicken von Wasser nach Normierung.

In Abb. 47 ist der Wassereinfluss wie schon in Abb. 46 erkennbar. Es zeigt sich wieder, je mehr Wasser auf die Probe aufgebracht wird, desto stärker nähert sich das Spektrum dem des Wassers an. In den gelb markierten Bereichen tritt die Änderung besonders hervor.

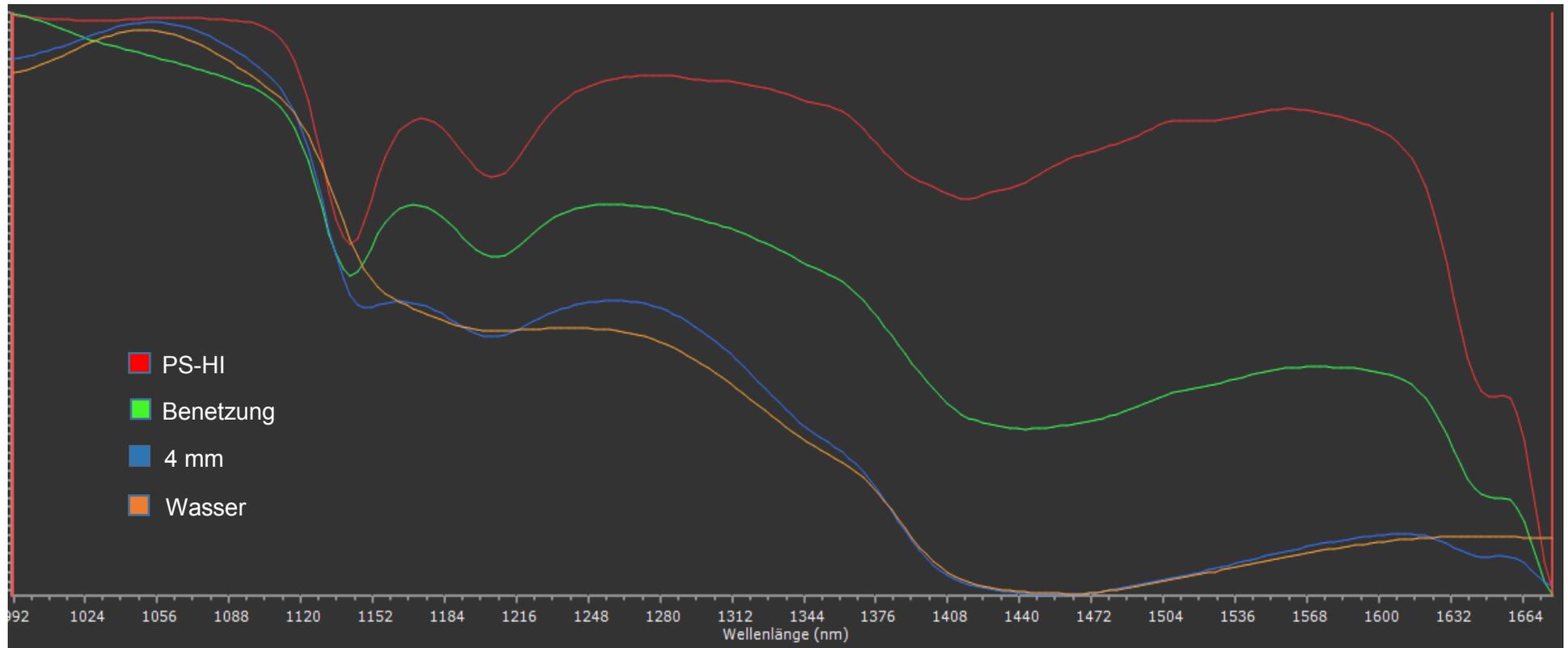


Abbildung 48: Rohspektrum von PS-HI mit rauer Oberfläche verschiedenen Schichtdicken von Wasser nach Normierung.

In Abb. 48 sind die Rohspektren der in Abb. 47 abgeleiteten Spektren zu erkennen. Hier sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Spektren klarer erkennbar. Die Wasserkurve ist gegenüber den PS-HI Spektren geglättet.

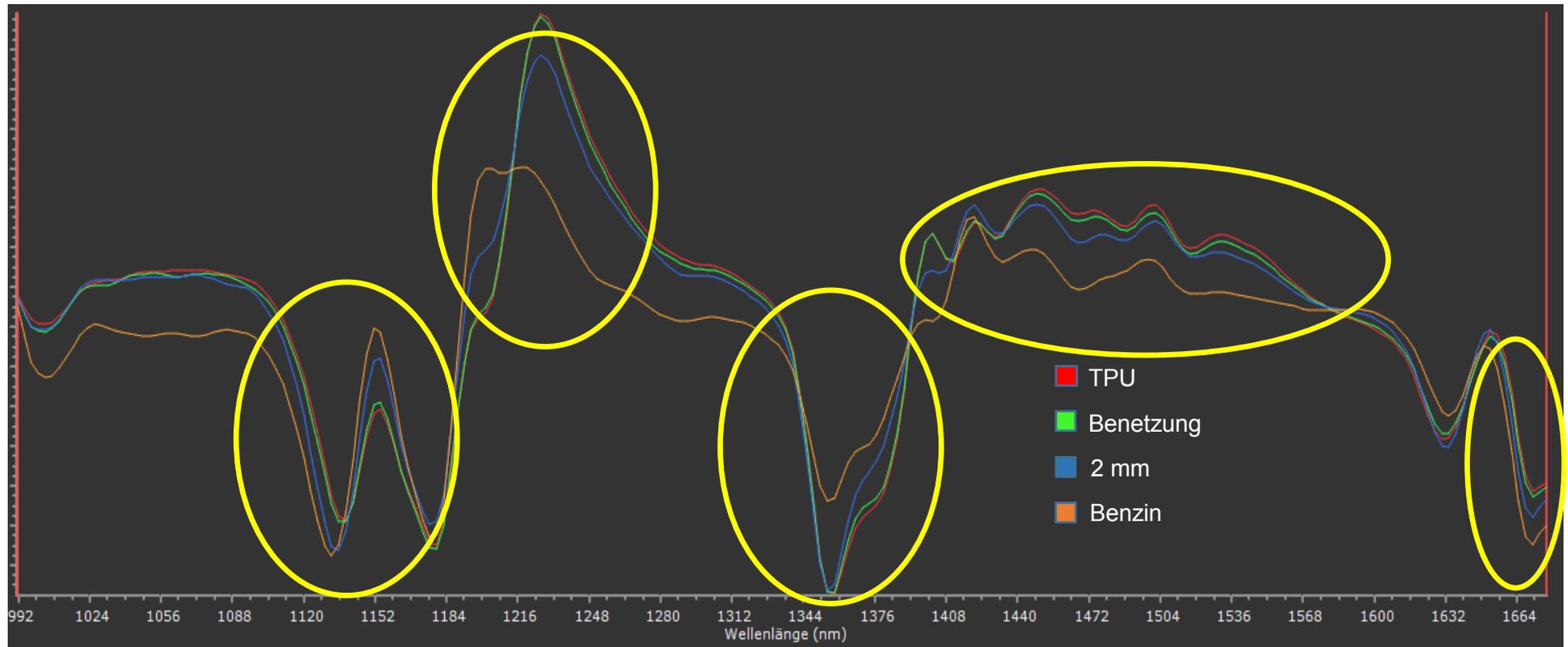


Abbildung 49: Abgeleitetes Spektrum von TPU mit verschiedenen Schichtdicken von Benzin nach Normierung.

In Abb. 49 ist der Einfluss von verschiedenen Benzinschichtdicken auf TPU abgebildet. Wie bei Wasser zeigt sich auch bei Benzin eine ähnliche Schlussfolgerung. Je dicker der Flüssigkeitsfilm auf der Kunststoffprobe ist, desto deutlicher ist die Änderung im Spektrum erkennbar. Die gelb markierten Bereiche zeigen die Bereiche der Beeinflussung.

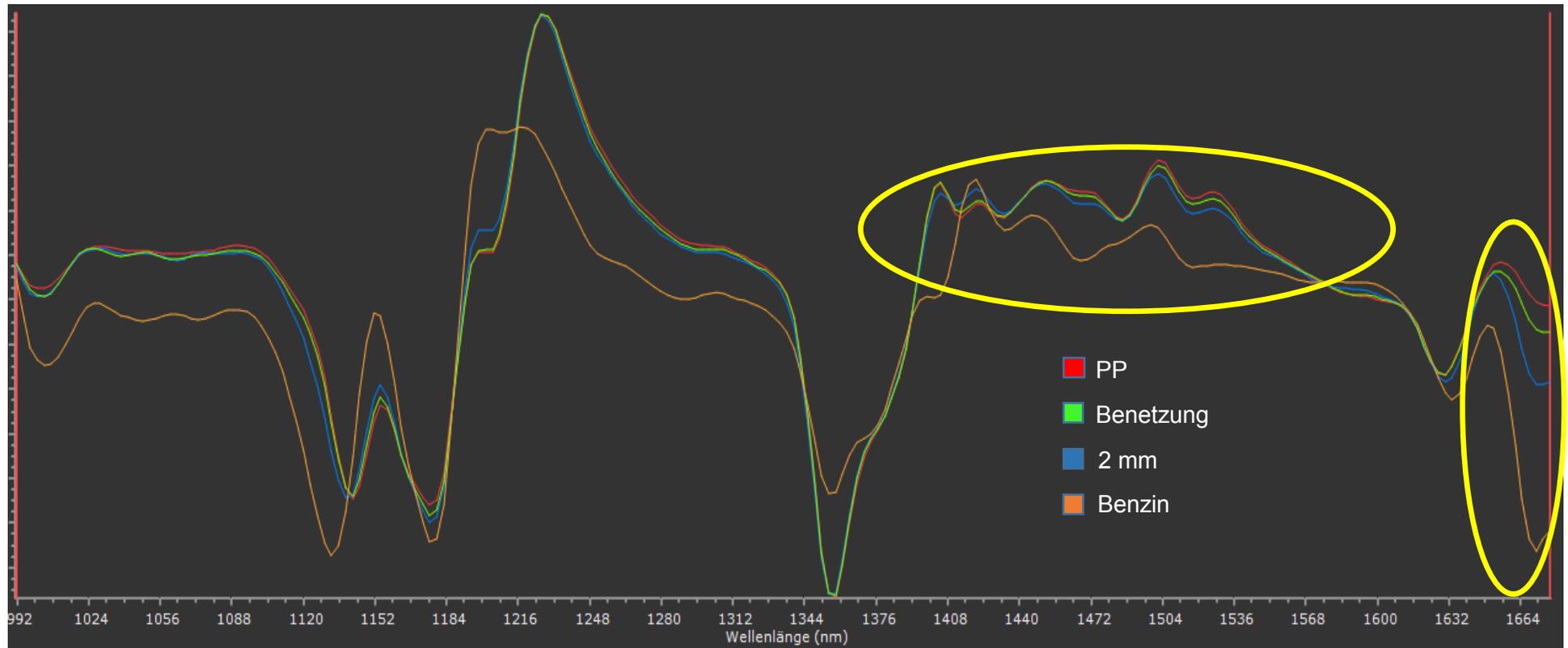


Abbildung 50: Abgeleitetes Spektrum von PP mit verschiedenen Schichtdicken von Benzin nach Normierung.

Die Spektren von PP und Benzin sind sich bereits ähnlich. In den gelben Markierungen sind die Unterschiede und die Annäherung hervorgehoben (siehe Abb. 50).

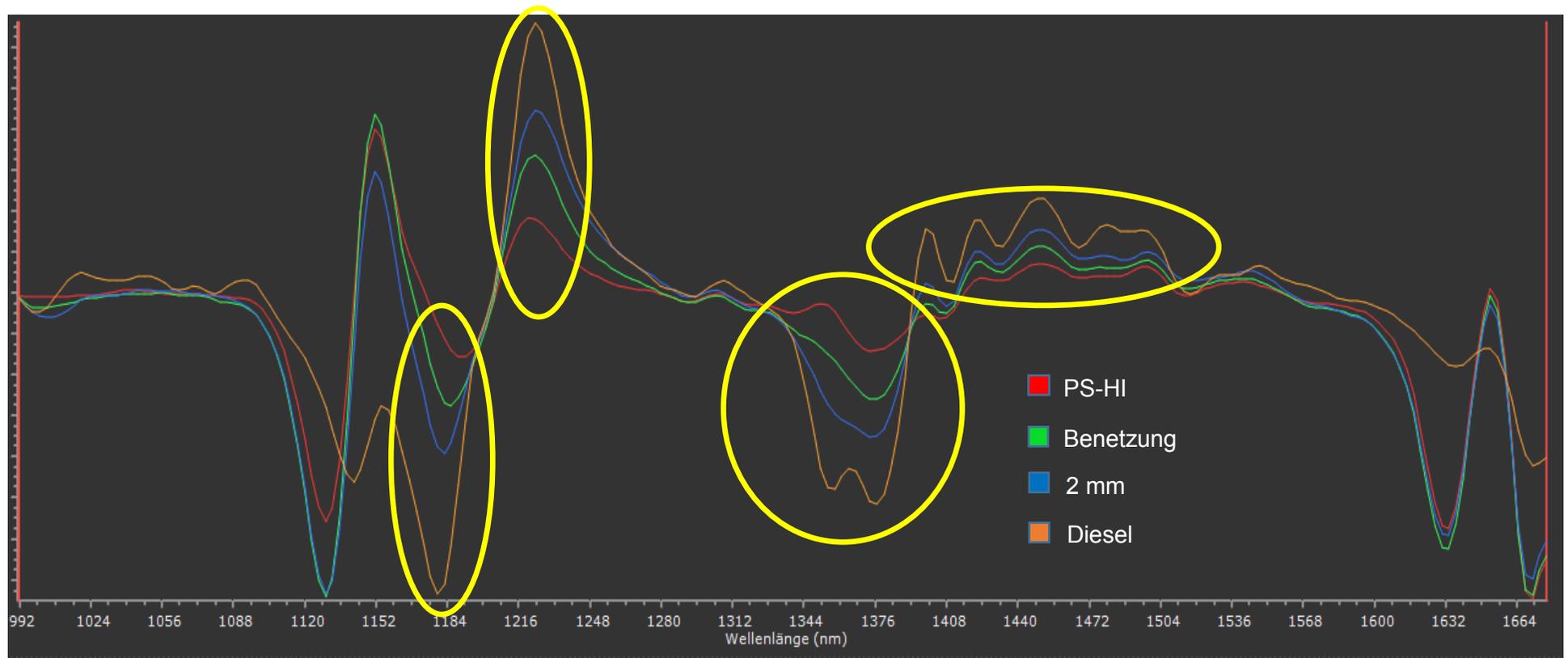


Abbildung 51: Abgeleitete Spektren von PS-HI mit verschiedenen Schichtdicken von Diesel nach Normierung.

Die Auswirkung der Schichtdicke von Diesel lässt sich in Abb. 51 erkennen. Je dicker die Dieselschicht auf den PS-HI Teilen ist desto mehr entfernt sich die Kurve von der PS-HI Kurve und nähert sich der Dieselschicht an. Die markanten Änderungen sind abermals gelb markiert.

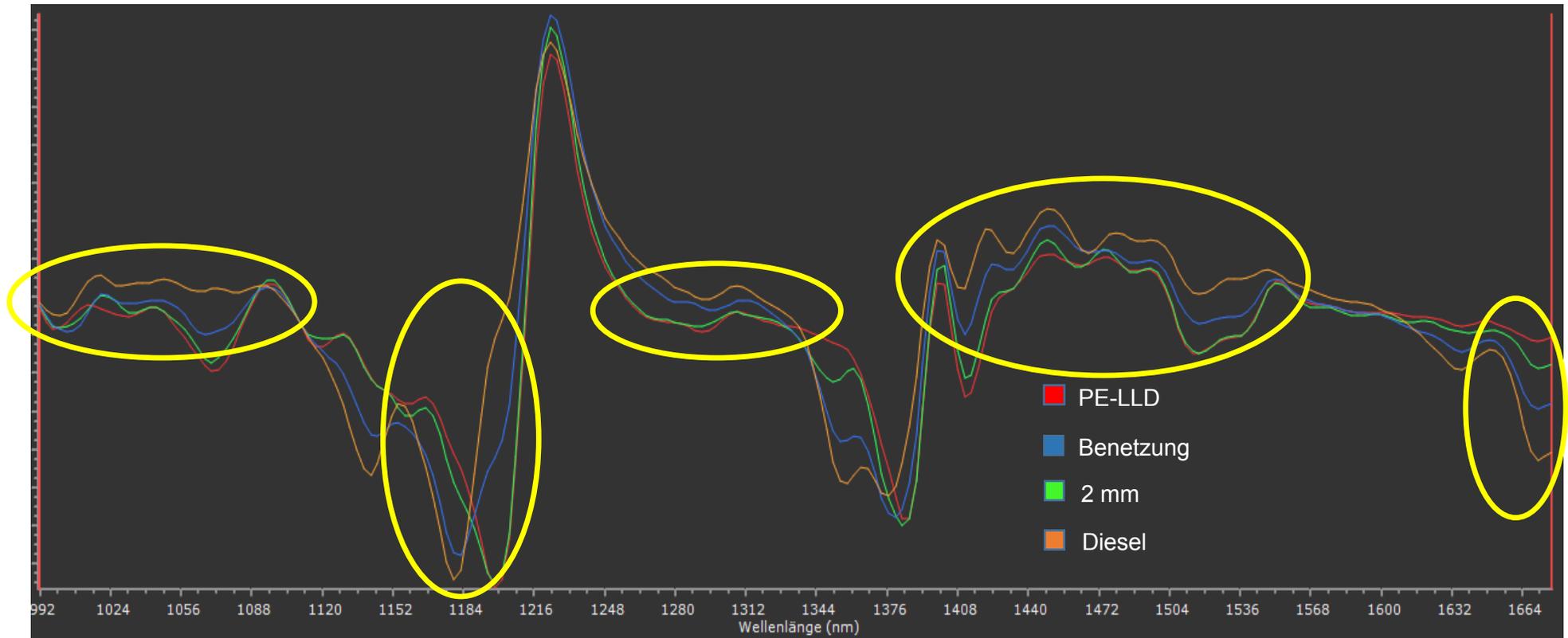


Abbildung 52: Abgeleitete Spektren von PE-LLD mit verschiedenen Schichtdicken von Diesel nach Normierung.

Die Spektren von PE-LLD und Diesel sind sich ähnlich. In Abb. 52 sind die Unterschiede durch gelbe Markierungen hervorgehoben.



Abbildung 53: Abgeleitetes Spektrum von PET mit verschiedenen Schichtdicken von Frittieröl nach Normierung.

Bei Frittieröl verhält sich die Änderung auf den Kunststoff gleich wie bei den vorangegangenen Flüssigkeiten. Bei größerer Schichtdicke wird die Änderung zum Ausgangsspektrum deutlicher. In Abb. 53 sind die Veränderungen zu erkennen.

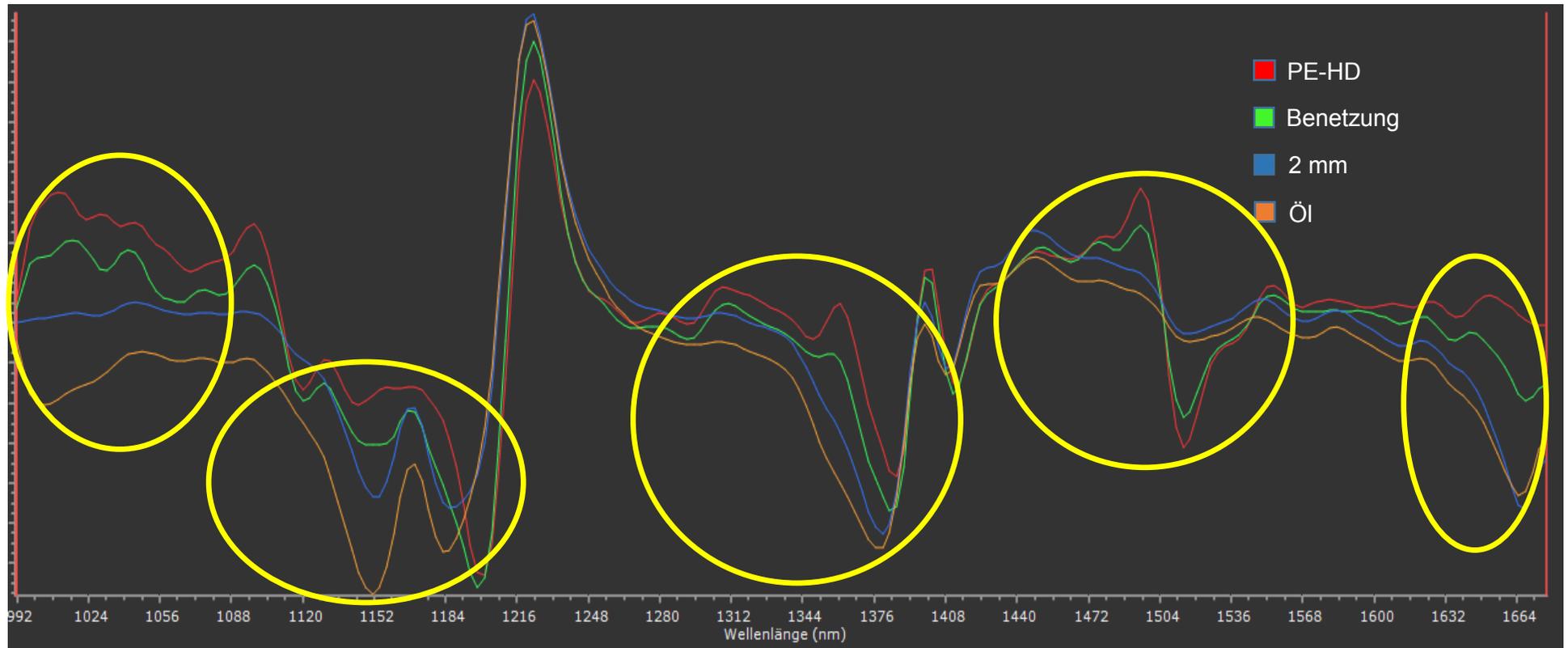


Abbildung 54: Abgeleitetes Spektrum von PE-HD mit verschiedenen Schichtdicken von Frittieröl nach Normierung.

Nicht nur bei PET (Abb. 53) bewirkt Öl eine Änderung der Kurve. Auch bei PE-HD (Abb. 54) sind Änderungen auszumachen. Die Bereiche der ausgeprägten Änderung sind über den gesamten Wellenlängenbereich zu erkennen und gelb markiert.

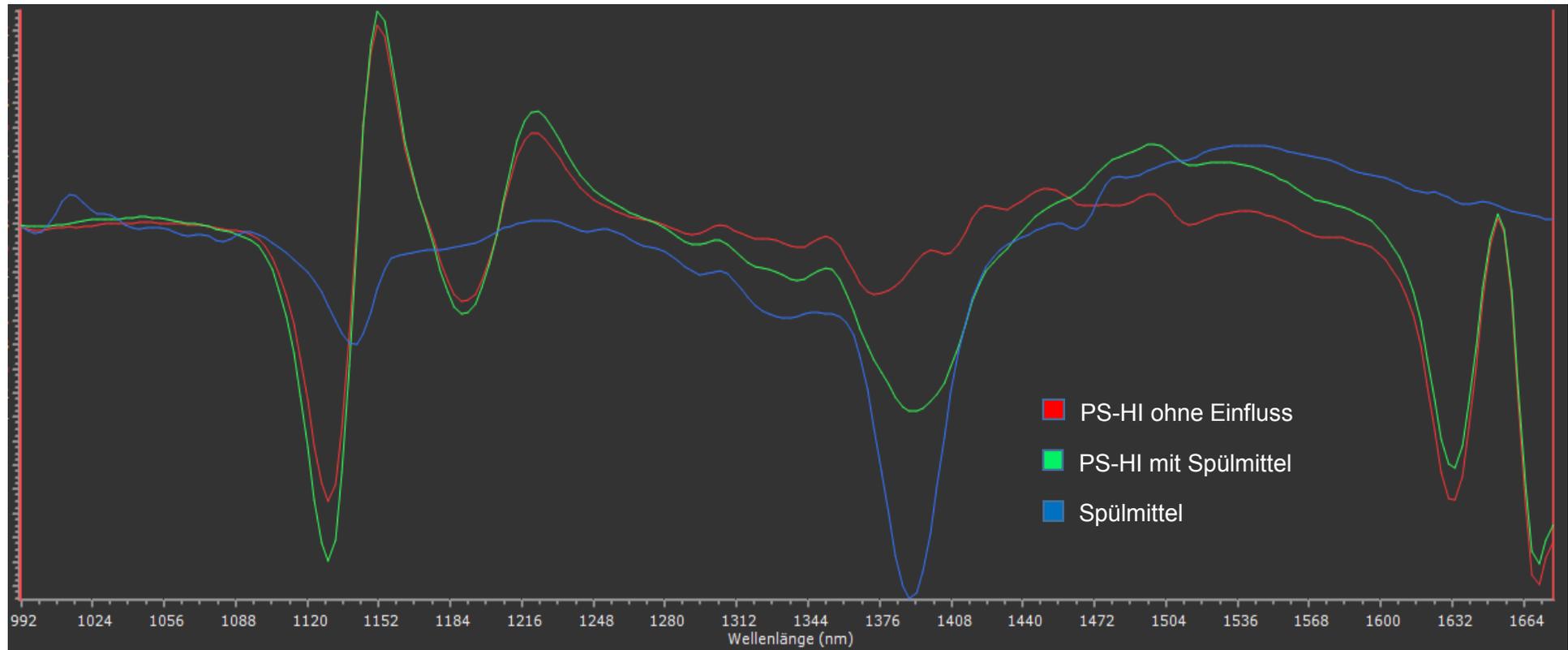


Abbildung 55: Abgeleitetes Spektrum von PS-HI mit Spülmitteleinfluss nach Normierung.

Abb. 55 zeigt die Veränderung durch das Auftragen von Spülmittel. Im Bereich des markanten Peaks von Spülmittel bei 1390 nm ist eine starke Veränderung des PS-HI Spektrums erkennbar. Es lässt sich vermuten, dass ähnlich wie bei den aufgetragenen Flüssigkeiten das Spektrum mit zunehmenden Schichtdicken ändert.

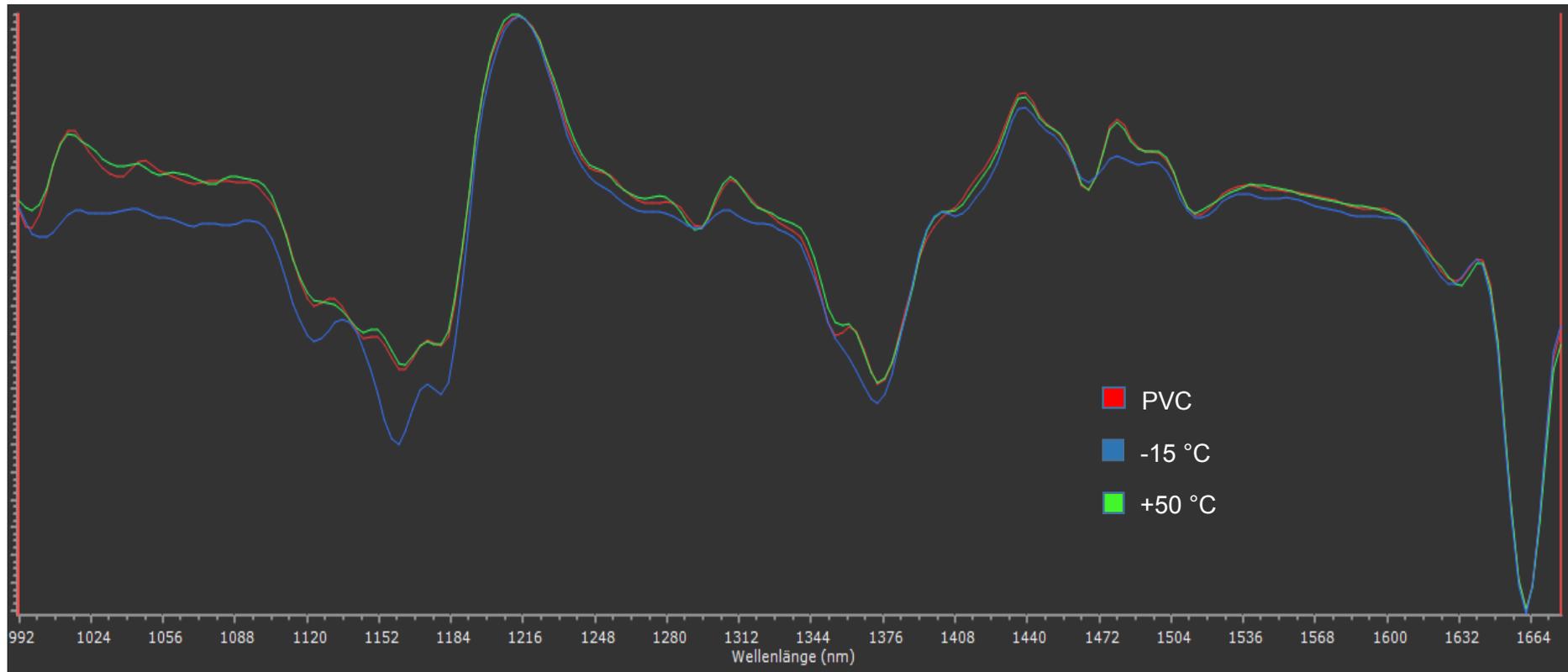


Abbildung 56: Abgeleitetes Spektrum von PVC bei verschiedenen Temperaturen nach Normierung.

Auf PVC haben, wie aus Abb. 56 zu entnehmen ist, niedrige Temperaturen größeren Einfluss als hohe. Vor allem die Peaks bei ca. 1150 und 1380 nm werden verstärkt. Da dies die charakteristischen Peaks für Wasser sind, wäre eine mögliche Erklärung, dass sich auf den kalten Oberflächen Kondenswasser gebildet hat, welches diese Veränderung bewirkt.

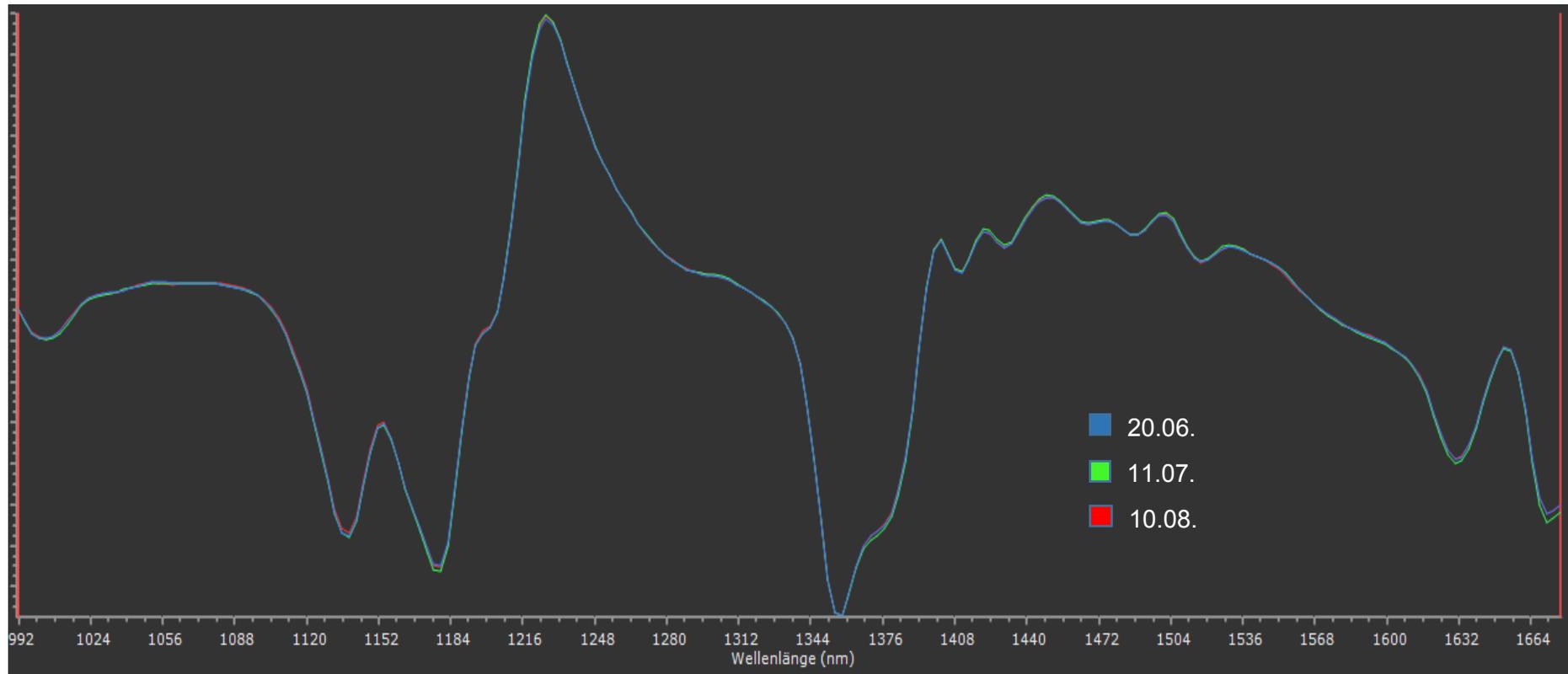


Abbildung 57: Abgeleitetes Spektrum von TPU bei verschiedenen Terminen nach Normierung.

Wie aus Abb. 57 hervorgeht, haben verschiedene Termine für TPU, wie auch auf die anderen Kunststoffarten, keine Auswirkungen. Etwaige Verschmutzungen beispielsweise durch Staub auf den Sensoren oder minimal geänderte Lichtverhältnisse führen in diesem Fall zu keinen Änderungen.

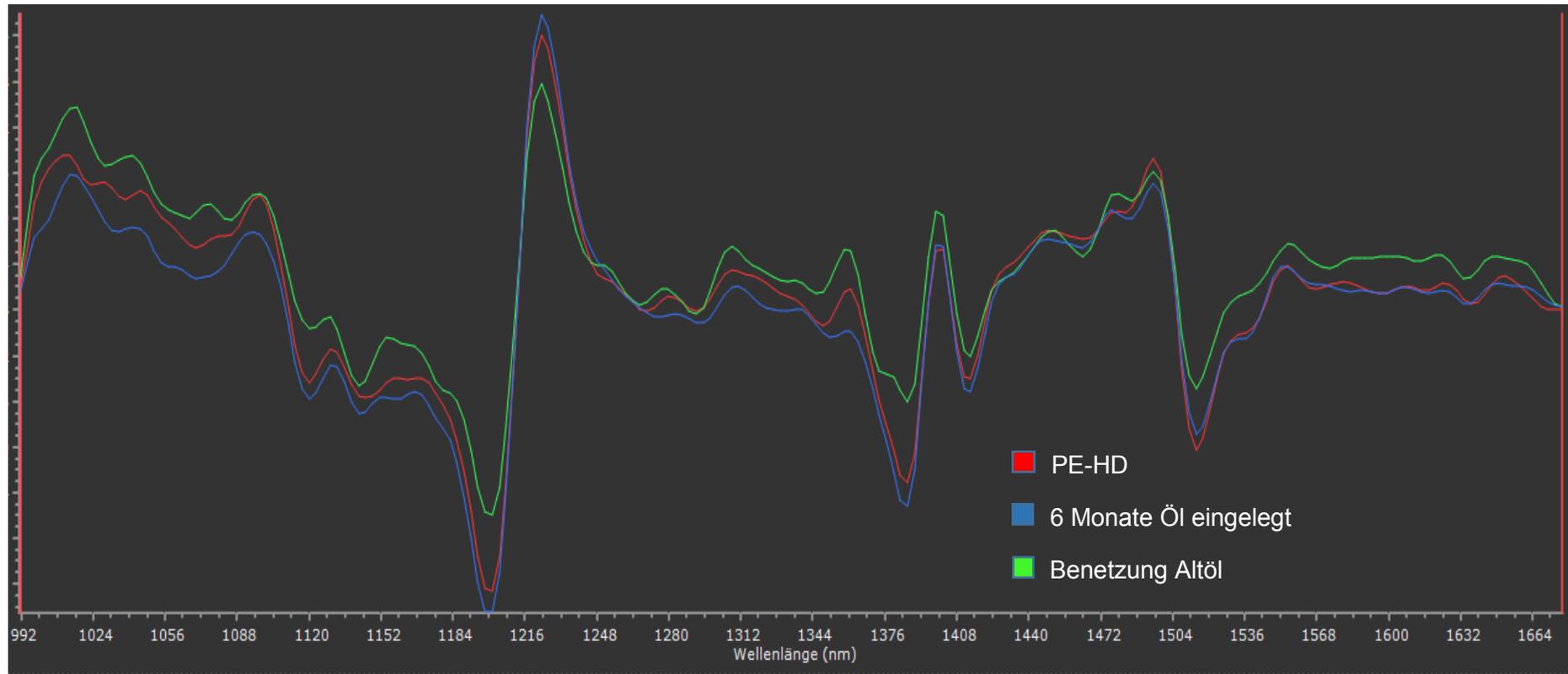


Abbildung 58: PE-HD unbehandelt, 6 Monate eingelegt und mit Altöl beschichtet.

Die Interpretation von PE-HD Proben gestaltet sich allgemein schwierig. Durch den flachen Verlauf des nicht normierten Rohspektrums wird die Kurve nach der Normierung äußerst stark verzerrt, wodurch die Schwankungsbreite dieses Kunststoffes gegenüber den anderen beträchtlich ist. Aus diesem Grund können auch verschiedene Aufnahmen von den gleichen Teilen bereits minimal voneinander abweichen. In diesem Fall ist in Abb. 58 jedoch der Unterschied auf den Einfluss des Altöls zurückzuführen. Da das durch Ruß geschwärzte Altöl die Reflexion des Lichts einschränkt, sind die Ausschläge abgeschwächt.

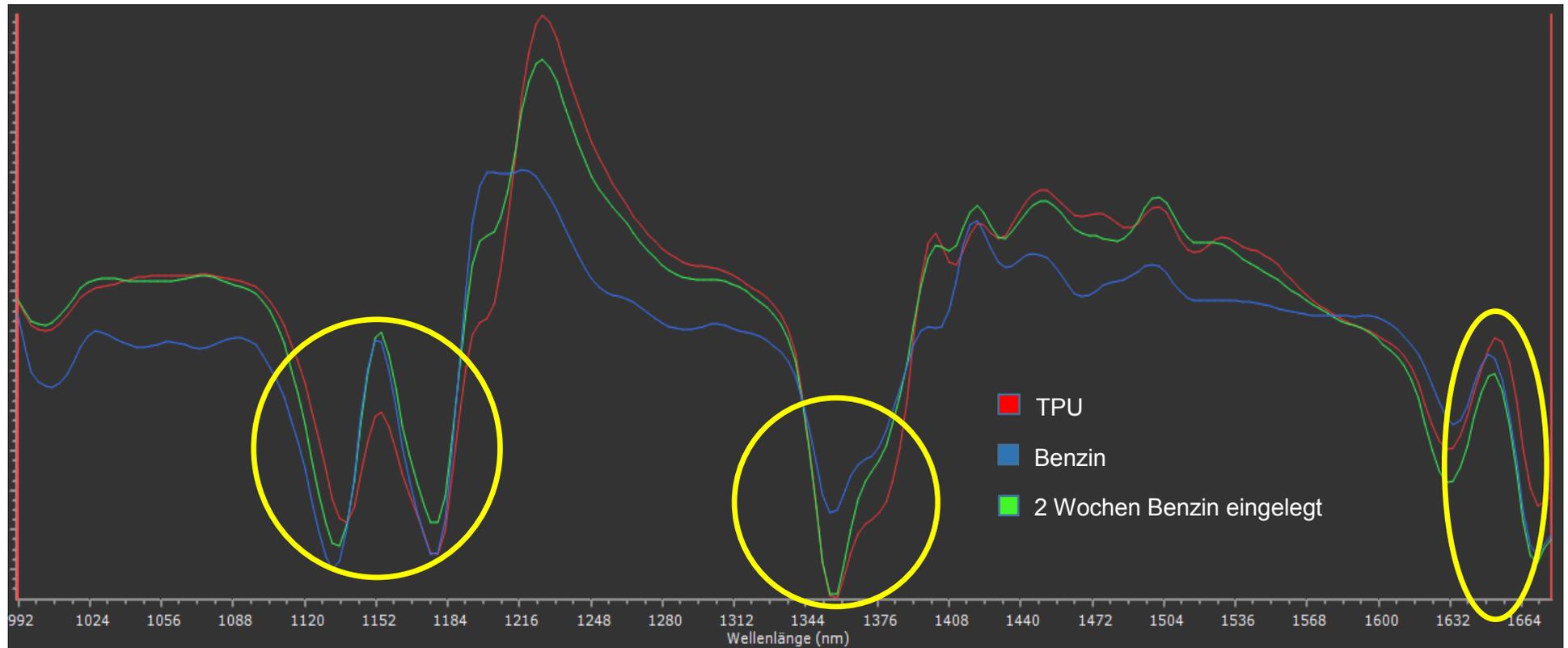


Abbildung 59: Abgeleitetes Spektrum von TPU, zwei Wochen in Benzin eingelegt und Benzin nach Normierung.

In den gelb markierten Bereichen in Abb. 59 ist eine Veränderung des TPU Spektrums hin zum Benzin Spektrums erkennbar. Eine Erklärung hierfür könnte die mögliche Aufnahme durch TPU während des Einlegens in Benzin sein.

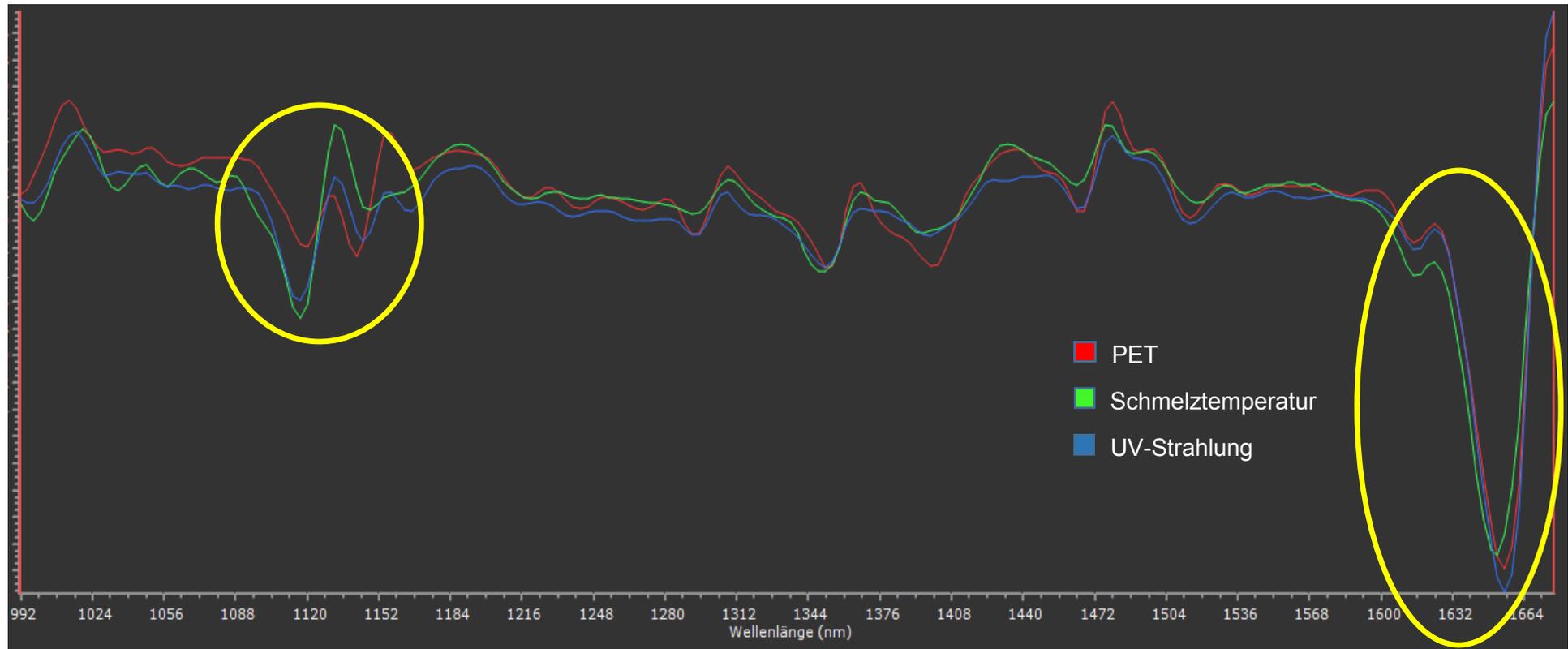


Abbildung 60: PET, ohne Einfluss, geschmolzen und UV-Strahlung ausgesetzt

Die Änderungen von sechs Wochen Witterungseinfluss und die Erwärmung über die Schmelztemperatur von PET sind in Abb. 60 abgebildet. Durch die schwache Ausprägung des Spektrums von PET, auf Grund der Transparenz, ist die Schwankung im Bereich bis ca. 1630 nm stark. Dies verstärkt sich durch die Normierung erheblich. Unterschiede sind dennoch in den gelben Bereichen erkennbar.

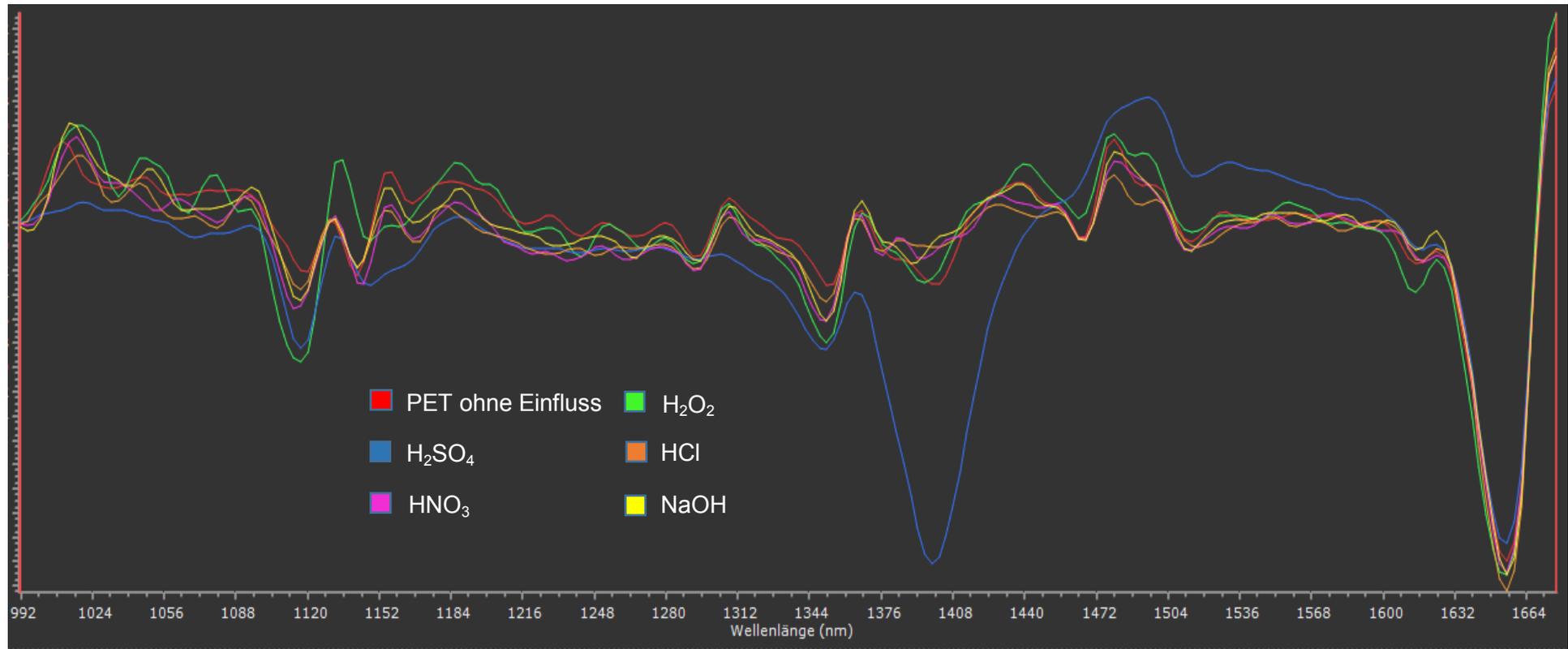


Abbildung 61: Abgeleitetes Spektrum von PET mit Chemikalieneinfluss nach Normierung.

Der Einfluss von verschiedenen Chemikalien auf PET ist in Abb. 61 erkennbar. Mit Ausnahme von H₂SO₄ sind keine gravierenden Einflüsse wahrzunehmen. Der Unterschied im Spektrum von Schwefelsäure könnte auf Wassereinfluss zurückzuführen sein, da der Peak des Ausschlags genau auf Wellenlänge des Wasserpeaks liegt. Eine Erklärung könnte sein, dass für das Auftragen der Chemikalien ein Pinsel verwendet wurde, der zwischen den einzelnen Chemikalien mit Wasser gereinigt wurde.

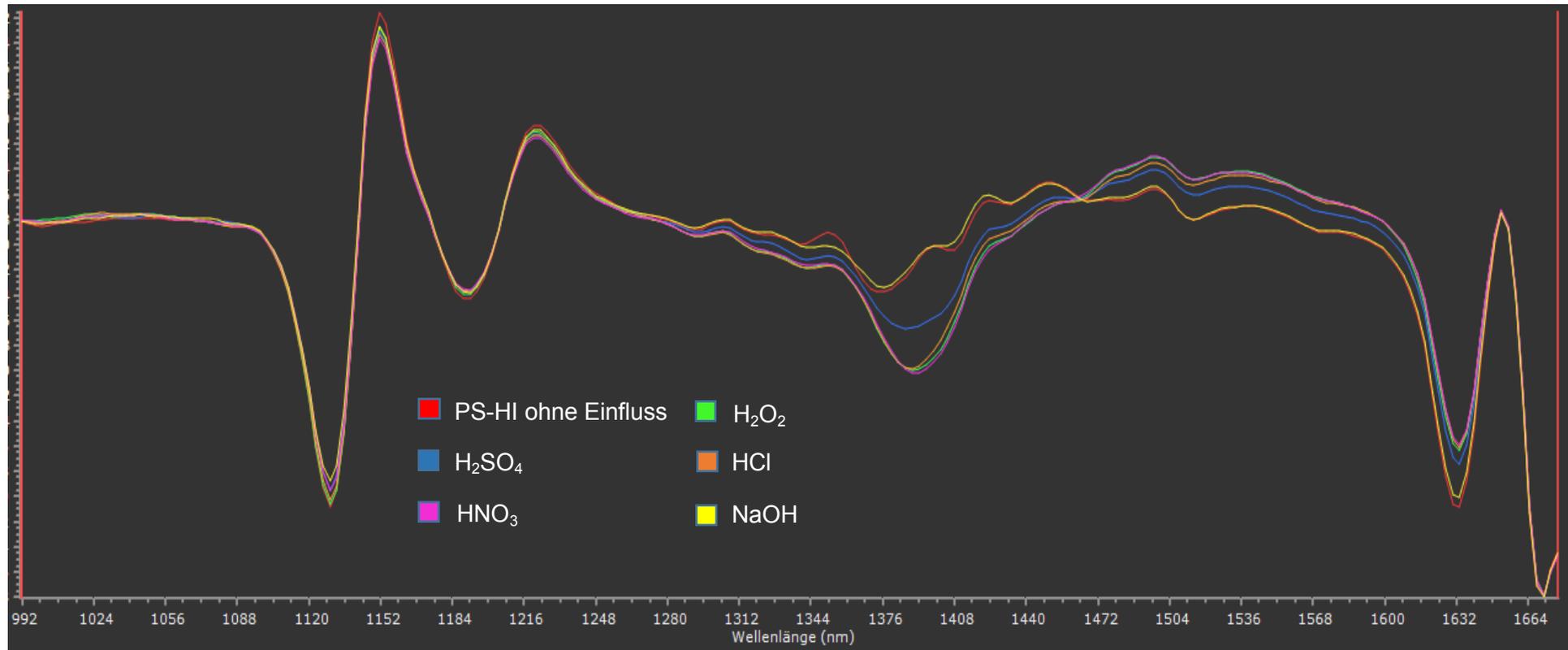


Abbildung 62: Abgeleitetes Spektrum von PS-HI mit Chemikalieneinfluss nach Normierung.

In Abb. 62 sind die Unterschiede des Chemikalieneinflusses auf PS-HI abgebildet. Wie bereits in Abb. 61 ist auch hier ein Unterschied bei der Wellenlänge des Wasserpeaks bei 1390 nm erkennbar. Auch hier könnte eine mögliche Erklärung die Reinigung des Pinsels mit Wasser sein, wodurch das Wasser in Kombination jeweils mit H₂SO₄, HCl, H₂O₂ und HNO₃ eine Einlagerung in der Oberfläche des Kunststoffes bewirkt hat.

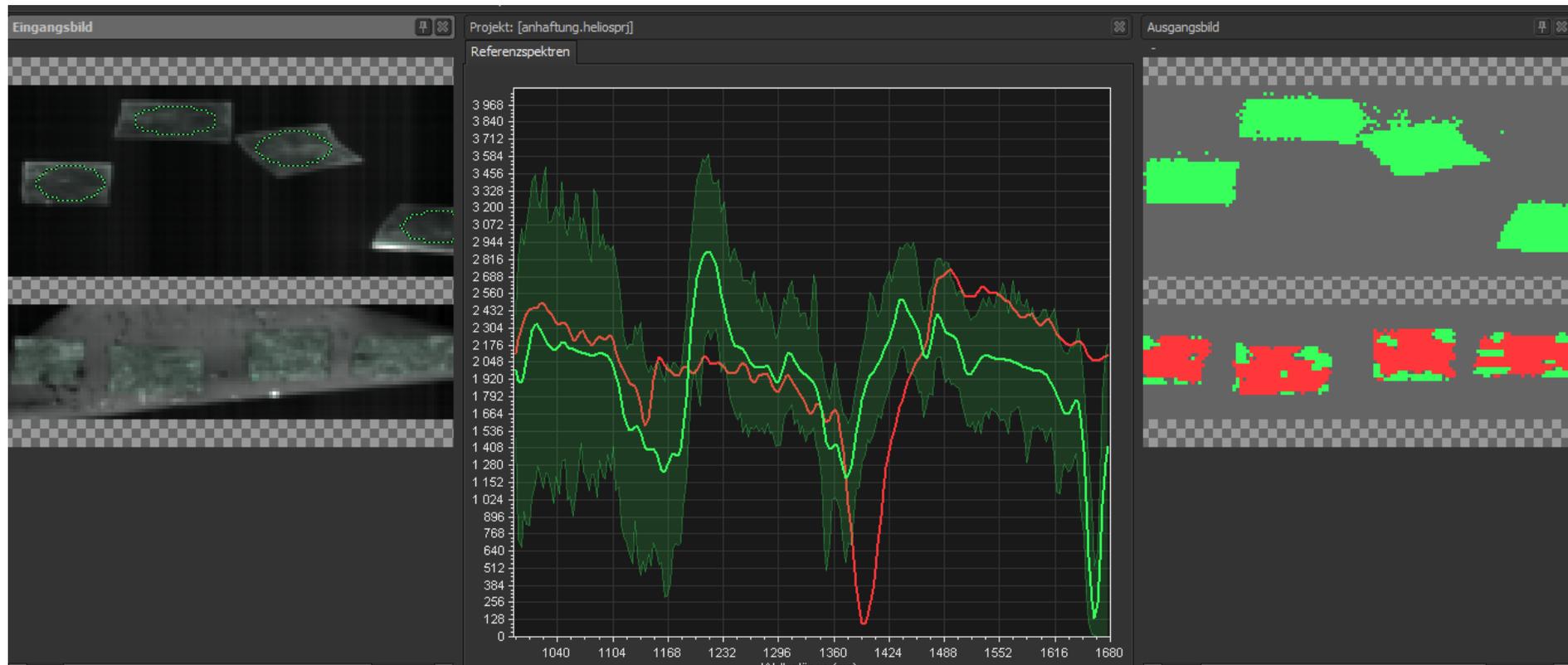


Abbildung 63: Benutzeroberfläche inkl. Auswertung Anhaftungen.

Die Benutzeroberfläche des verwendeten Programms zur Auswertung ist in Abb. 63 ersichtlich. Links sind die Originalaufnahmen die der Sensor an das Programm sendet, wobei auf der zweiten Aufnahme die anhaftenden Verschmutzungen zu erkennen sind. In der Mitte sind die beiden Spektren von PVC (grün) und der Verschmutzung (rot) abgebildet. Der grün schattierte Bereich zeigt die Schwankungsbreite der für PVC zugeordneten Spektren an. Die grüne Linie ist der Mittelwert des gespeicherten Referenzspektrums, der sich aus sämtlichen Pixeln ergibt. Auf der rechten Seite befinden sich die den jeweiligen Spektren zugeordneten Pixel des Eingangsbildes. Darauf sind die Verschmutzungen auf den Kunststoffteilen ersichtlich. Man erkennt die lückenhafte Zuteilung, dazwischen liegen die Verschmutzungen.

4.4 Fazit / Resümee

In Tab. 8 sind die Ergebnisse sämtlicher Versuche zusammengefasst. Der obere Teil wurde mit glatten Teilen, der untere mit rauen Teilen durchgeführt. Die Stärke der Abweichung bezieht sich dabei jeweils auf unveränderte Objekte. Das Bewertungsschema ist dabei rein subjektiv. Es wurden die beiden zu unterscheidenden Kurven bewertet und dadurch eine Gewichtung des Unterschiedes festgelegt.

Tabelle 8: Übersicht der untersuchten Einflussfaktoren.

Einfluss/ Kunststoffart	PE-LD	PE-HD	PE-LLD	PP	PVC	PET	HI-PS	TPU
Glatte Oberfläche								
Anderes Datum	1	2	1	1	2	2	1	1
Benetzung Wasser	3	4	3	3	4	4	3	3
2mm Wasserschichtdicke	3	6	4	4	4	5	4	4
4mm Wasserschichtdicke	4	6	6	6	6	6	6	6
+50 °C	1	3	2	1	1	2	1	2
-15 °C	1	2	1	2	3	2	1	1
Schmelztemperatur	1	2	1	1	2	2	1	1
Benetzung Spülmittel	2	n.u.	n.u.	2	n.u.	3	3	3
6 Wochen UV-Strahlung	1	2	1	1	2	2	n.u.	1
Benetzung Altöl	2	3	3	2	3	3	3	3
Benetzung Öl	2	2	1	2	3	4	3	2
2mm Ölschichtdicke	2	4	3	3	4	6	4	3
6 Monate Öl eingelegt	1	3	2	1	4	2	n.u.	2
2 Wochen Benzin eingelegt	2	2	2	2	3	3	gel.	3
H ₂ O ₂	1	2	n.u.	1	1	2	3	1
H ₂ SO ₄	1	2	n.u.	1	1	5	3	1
HCl	1	2	n.u.	1	1	2	3	1
HNO ₃	1	2	n.u.	1	1	2	3	1
NaOH	1	2	n.u.	1	1	2	1	1
Anhaftung Schmutz	1	1	n.u.	n.u.	1	n.u.	n.u.	1
Vergleich raue Oberfläche	2	2	2	1	2	3	1	2
Vergleich PE-LD rot/weiß	2	--	--	--	--	--	--	--
Raue Oberfläche								
Rau/Benetzung Wasser	3	4	4	3	3	4	3	3
Rau/4mm Wasserschichtdicke	5	6	6	5	5	6	4	5
Rau/Benetzung Benzin	2	4	3	2	3	3	3	2
Rau/2mm Benzinschichtdicke	3	5	5	3	5	5	4	3
Rau/Benetzung Diesel	2	2	3	2	3	2	4	1
Rau/2mm Dieselschichtdicke	3	3	5	3	5	5	5	2
Rau/+50°C	1	2	2	1	1	2	1	1
Rau/-15°C	1	2	1	2	1	2	1	1
n.u. ... nicht untersucht; gel. ... aufgelöst								
Intensität Einflussfaktor	1	2	3	4	5	6		

Zu erkennen ist, dass sämtliche Flüssigkeiten den stärksten Einfluss auf das Spektrum der Kunststoffe haben. Sowohl bei Wasser, als auch bei den petrochemischen Flüssigkeiten wie Frittieröl, Diesel und Benzin verstärkt sich der Effekt mit zunehmend aufgetragener

Schichtdicke. Bei Kunststoffen, deren Spektrum jener der Flüssigkeiten ähnlicher ist, ist dementsprechend die Veränderung geringer.

Temperaturänderungen und Witterungseinflüsse haben hingegen kaum eine Änderung zur Folge. Unterschiede bei Spektren die an verschiedenen Terminen aufgenommen wurden sind nicht vorhanden.

Die Unterschiede der Oberflächenrauheit spielen bei transparenten Kunststoffen eine größere Rolle als bei undurchsichtigen Objekten.

5 Zusammenfassung

In Kapitel 1 wird kurz in das Thema dieser Masterarbeit eingeführt, gefolgt von den Problemstellungen und der Zielsetzung der Arbeit.

Kapitel 2 liefert theoretische Grundlagen zu den Themen Kunststoffe und sensorgestützte Sortiertechnik. Nach einem historischen Überblick über die Entwicklung der Kunststoffe mit Produktionszahlen und Anwendungsgebieten folgt eine detaillierte Auflistung von einzigartigen und hervorstechenden Eigenschaften die Kunststoffe besitzen. Danach werden die drei grundlegenden Arten von Kunststoffen erläutert. Eine Übersicht über die Chemikalienbeständigkeit und die Witterungsbeständigkeit vervollständigt die allgemeinen Ausführungen. Die im praktischen Teil dieser Masterarbeit verwendeten Kunststoffarten werden alsdann vorgestellt und einzeln betrachtet. Vom molekularen Aufbau bis zu den Anwendungsmöglichkeiten werden Einzelheiten erläutert. Zum Abschluss des Themas Kunststoffe wird auf die Thematik des Kunststoffrecyclings eingegangen.

Im zweiten Teil von Kapitel 2 wird die sensorgestützte Sortiertechnik betrachtet. Auf einen Überblick über die Entwicklung zum heutigen Stand, folgt der mögliche Aufbau eines sensorgestützten Sortierstandes. Eine nähere Erläuterung der möglichen und meistverwendeten Sensorsysteme ist der nächste Punkt. Das Verfahren der verwendeten Nahinfrarot-Technik wird dazu genauer besprochen. Neben Vor- und Nachteilen dieser Methode wird der aktuelle Stand der Technik dargestellt.

Kapitel 3 beschäftigt sich zuerst mit dem Sortierstand des AVAW, der für die experimentelle Durchführung der Versuche dieser Arbeit verwendet wurde. Die einzelnen Komponenten werden kurz vorgestellt. Auch auf die verwendete Software, den Helios Optimizer, wird dazu eingegangen.

Anschließend werden die durchgeführten Versuche und die Gründe, warum diese durchgeführt wurden, erklärt. Sämtliche äußere Einflussfaktoren werden, zum besseren Verständnis mittels Bildern, dargestellt.

Die gewonnenen Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 3 werden danach in Kapitel 4 aufgezeigt. Hierzu werden die Spektren der folgenden acht Kunststoffe ohne äußere Einflüsse abgebildet:

- PE-LD,
- PE-HD,
- PE-LLD,
- PP,
- PVC,
- PET,
- PS-HI,
- TPU.

Die Spektren inklusive dem jeweiligen Einfluss werden mit den unveränderten verglichen und eine etwaige Veränderung dokumentiert und diskutiert. Da 29 verschiedene Einflussfaktoren auf die acht verwendeten Kunststoffe angewendet wurden, können dementsprechend nicht alle Kombinationen dargestellt werden. Aus diesem Grund wurden Einflüsse die größere Unterschiede zur Folge haben intensiver betrachtet als jene bei denen keine oder kaum Veränderung zu beobachten waren.

Das Endergebnis der Arbeit ist eine Tabelle, aus der die Auswirkung eines jeweiligen Einflusses auf jede Kunststoffart durch eine Bewertung von 1 bis 6 dargestellt ist.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., Schmachtenberg, E., 2011, Menges Werkstoffkunde, Kunststoffe.

Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T., 2012, Hans Domininghaus, Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen.

Baur, Brinkmann, Osswald, Schmachtenberg, 2007, Saechtling, Kunststoff Taschenbuch.

Michaeli, W., 2010, Einführung in die Kunststoffverarbeitung.

Kranert, M., Cord-Landwehr, K., 2010, Einführung in die Abfallwirtschaft.

Wolter, L., v.Marwick, J., Regel, K., Lackner, V., Schäfer, B., 1997, Kunststoff-Recycling, Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele.

Martens, H., 2011, Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis.

Kreindl G., 2010, Herausforderungen der NIR-Sortierung von gemischten Abfällen aus Industrie und Gewerbe. Tagungsband DepoTech 2010

Pretz T., Julius J., 2008, Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen. Österr. Wasser- und Abfallw. 60: 105-112

Wotruba H., 2008, Stand der Technik der sensorgestützten Sortierung, Berg Huettenmaenn Monatsheft 153: 221-224

Gundupalli SP., Hait S., Thakur A., 2017, A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. Waste management (New York, N.Y.) 60:1-18

Hendrik Beel (Hrsg.), 2017, Sortierung von schwarzen Kunststoffen nach ihrer Polymerklasse mit Hyperspectral-Imaging-Technologie. TK Verlag Karl Thóme-Kozmiensky, Neuruppin

López-Maestresalas A., Keresztes JC., Goodarzi M., Arazuri S., Jarén C., Saeys W., 2016, Non-destructive detection of blackspot in potatoes by Vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging. Food Control 70: 229-241

Homepage AVAW Leoben, http://avaw.unileoben.ac.at/de/forschung-ag_deponie_altlast_schlacke-abgeschlossene_projekte-landfill_mining/ , 30.10.2018

E-Mail von Hrn. DI Dr. Eduard Gilli von EVK, 31.10.2018

6.2 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
%	Prozent
µm	Mikrometer
Abb.	Abbildung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
Cl	Chlor
cm	Zentimeter
Cu	Kupfer
d.h.	das heißt
etc.	et cetera
g	Gramm
ggf.	gegebenenfalls
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HCl	Salzsäure
HNO ₃	Salpetersäure
K	Kelvin
m	Meter
Mio.	Millionen
MIRS	Mittelinfrarotspektroskopie
Mrd.	Milliarden
NaOH	Natriumhydroxid
NIR	Nahinfrarot
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
nm	Nanometer
PE-HD	Polyethylen high density
PE-LD	Polyethylen low density
PE-LLD	Polyethylen linear low density
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS-HI	Polysyrol high impact
PVC	Polyvinylchlorid
t	Tonnen
Tab.	Tabelle
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UV	Ultraviolett
VIS	Visuelle Spektroskopie
W	Watt

z.B. zum Beispiel

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen (Baur et al. 2007:767).....	12
Tabelle 2: Witterungsbeständigkeit von Kunststoffen (Baur et al. 2007:774).	13
Tabelle 3: Eigenschaften Thermoplaste (Martens 2011:165).....	23
Tabelle 4: Eigenschaften Elastomer (TPU) (Martens 2011:165, Baur et al. 2007:618).	24
Tabelle 5: Verträglichkeit verschiedener Thermoplaste (Michaeli 2010:228).	25
Tabelle 6: Heizwerte verschiedener Materialien (Elsner et al. 2012:110).....	27
Tabelle 7: Sensorsysteme (Kranert & Cord-Landwehr 2010:175).....	30
Tabelle 8: Übersicht der untersuchten Einflussfaktoren.....	76

6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Weltproduktion Rohstahl, Aluminium, Kunststoffe (Baur et al. 2007:3).....	6
Abbildung 2: Anwendungsgebiete Kunststoffe (Baur et al. 2007:4).	7
Abbildung 3: Energiebedarf für Herstellung (Menges et al. 2011:18).	10
Abbildung 4: Makromolekularer Aufbau verschiedener Polyethylene (Baur et al. 2007:16). .	14
Abbildung 5: Polyethylen Polymer. https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Polyethylene-repeat-2D-flat.png	14
Abbildung 6: Polyethylen Polymer mit Seitensträngen (Elsner et al. 2012:124).	16
Abbildung 7: Polypropylen Polymer. https://www.researchgate.net/figure/Isotactic-polypropylene-polymer-chain-methyl-monomers-CH-3-linked-to-CH-CH-2-chain_fig4_305618882	17
Abbildung 8: PVC- Polymer. https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Polyvinylchlorid.svg	18
Abbildung 9: Polyvinylchlorid Polymer (Elsner et al. 2012:284).	19
Abbildung 10: Polystyrol Polymer. https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Polystyrene.svg	20
Abbildung 11: Polyethylenterephthalat Polymer. https://www.researchgate.net/figure/The-repeating-unit-of-PET-polymer-A-PET-monomer-is-formed-from-the-condensation-of_fig1_233730718	22
Abbildung 12: Recyclingkreisläufe (Michaeli 2010:224).	25
Abbildung 13: Prinzip Rutschen- oder Schurrensortierer (Pretz & Julius 2008).	28
Abbildung 14: Prinzip Bandsortierer (Pretz & Julius 2008).....	29

Abbildung 15: Übersicht elektromagnetische Wellen (Pretz & Julius 2008).	30
Abbildung 16: Sortierstand AVAW.....	34
Abbildung 17: Aufgabetrichter inkl. Schwingförderer.	35
Abbildung 18: Spektraler Sensor.....	35
Abbildung 19: Schurre Sortierer.	36
Abbildung 20: Druckluft- Austragsleiste.....	36
Abbildung 21: Recheneinheit.....	37
Abbildung 22: Benutzeroberfläche Helios Optimizer.....	38
Abbildung 23: Übersicht Kunststoffe.....	39
Abbildung 24: Gegenüberstellung glatt/rau, links PP, rechts PVC.	40
Abbildung 25: Schalen für Flüssigkeitsfüllstände.....	41
Abbildung 26: In Frittieröl eingelegte Kunststoffe.....	42
Abbildung 27: PS-HI Teile mit Altöl benetzt.	42
Abbildung 28: Vorbereitung für Witterung.....	43
Abbildung 29: Geschmolzene PVC-Proben.....	44
Abbildung 30: Verwendete Chemikalien.....	44
Abbildung 31: PE-LD Proben mit Anhaftungen.....	45
Abbildung 32: Aufnahmen von glattem (oben) und rauem (unten) PVC des Nah-Infrarot-Sensors.....	46
Abbildung 33: Rohspektren von PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI ohne Normierung.....	47
Abbildung 34: Rohspektren von PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI nach Normierung.....	48
Abbildung 35: Abgeleitete Spektren von PE-LD, PE-HD, PE-LLD und PS-HI nach Normierung.	49
Abbildung 36: Rohspektren von TPU, PET, PVC und PP ohne Normierung.....	50
Abbildung 37: Abgeleitete Spektren von TPU, PET, PVC und PP ohne Normierung.	51
Abbildung 38: Abgeleitete Spektren von TPU, PET, PVC und PP nach Normierung.	52
Abbildung 39: Abgeleitete Spektren von Diesel, Frittieröl und Benzin nach Normierung.....	53
Abbildung 40: Abgeleitete Spektren von PE-LD und Frittieröl nach Normierung.	54
Abbildung 41: Abgeleitete Spektren von TPU und Diesel nach Normierung.	54
Abbildung 42: Abgeleitete Spektren von Seife, Spülmittel, Wasser nach Normierung.	55
Abbildung 43: Abgeleitete Spektren von PE-LD in roter und weißer Farbe mit jeweils glatter und rauher Oberfläche nach Normierung.	56

Abbildung 44: Detailaufnahme der vier PE-LD Proben im Bereich von 1000 bis 1200 nm nach Normierung.....	57
Abbildung 45: Detailaufnahme der vier PE-LD Proben im Bereich von 1400 bis 1700 nm nach Normierung.....	57
Abbildung 46: Abgeleitetes Spektrum von PE-LLD mit verschiedenen Schichtdicken von Wasser nach Normierung.....	58
Abbildung 47: Abgeleitetes Spektrum von PS-HI mit rauer Oberfläche verschiedenen Schichtdicken von Wasser nach Normierung.	59
Abbildung 48: Rohspektrum von PS-HI mit rauer Oberfläche verschiedenen Schichtdicken von Wasser nach Normierung.	60
Abbildung 49: Abgeleitetes Spektrum von TPU mit verschiedenen Schichtdicken von Benzin nach Normierung.....	61
Abbildung 50: Abgeleitetes Spektrum von PP mit verschiedenen Schichtdicken von Benzin nach Normierung.....	62
Abbildung 51: Abgeleitete Spektren von PS-HI mit verschiedenen Schichtdicken von Diesel nach Normierung.....	63
Abbildung 52: Abgeleitete Spektren von PE-LLD mit verschiedenen Schichtdicken von Diesel nach Normierung.....	64
Abbildung 53: Abgeleitetes Spektrum von PET mit verschiedenen Schichtdicken von Frittieröl nach Normierung.....	65
Abbildung 54: Abgeleitetes Spektrum von PE-HD mit verschiedenen Schichtdicken von Frittieröl nach Normierung.	66
Abbildung 55: Abgeleitetes Spektrum von PS-HI mit Spülmittleinfluss nach Normierung....	67
Abbildung 56: Abgeleitetes Spektrum von PVC bei verschiedenen Temperaturen nach Normierung.	68
Abbildung 57: Abgeleitetes Spektrum von TPU bei verschiedenen Terminen nach Normierung.	69
Abbildung 58: PE-HD unbehandelt, 6 Monate eingelegt und mit Altöl beschichtet.....	70
Abbildung 59: Abgeleitetes Spektrum von TPU, zwei Wochen in Benzin eingelegt und Benzin nach Normierung.....	71
Abbildung 60: PET, ohne Einfluss, geschmolzen und UV-Strahlung ausgesetzt	72
Abbildung 61: Abgeleitetes Spektrum von PET mit Chemikalieneinfluss nach Normierung. .	73
Abbildung 62: Abgeleitetes Spektrum von PS-HI mit Chemikalieneinfluss nach Normierung.	74
Abbildung 63: Benutzeroberfläche inkl. Auswertung Anhaftungen.....	75