

Unterscheidung von Kunststoffen im Allgemeinen und von markierten Kunststoffen im Besonderen

Bei der Wiederverwertung von Kunststoffen besteht die Aufgabe darin, die unterschiedlichen Kunststoffe sortenrein zu trennen. Dabei ist zu beachten, dass je nach Art der Wiederverwendung des Rezyklats sowohl nach Kunststoffart, Farbe aber auch nach vorangegangenem Einsatz zu trennen ist. So sollte beispielsweise verhindert werden, dass eine Kunststoffflasche, deren Inhalt aus Abflussreiniger-Chemikalien bestand zukünftig in der Matrix einer Kunststoffflasche für den Lebensmittelbereich wiederzufinden ist.

Sensorik zur Unterscheidung der Kunststoffarten sowie der Kunststofffarben

In der Kunststoffrecyclingindustrie werden bereits Sortiermaschinen zur Trennung von Kunststoffen nach Kunststoffart und Farbe eingesetzt. Hierbei wird in erster Linie geschreddertes Kunststoffmaterial bzw. Recyclingmaterial über ein breites Förderband, bzw. Förderband mit anschließender Rutsche, zugeführt. Mittels Linienscanner wird dann über die gesamte Breite kontrolliert, beim Linienscanner zur Unterscheidung von Kunststoffen handelt es sich dabei in der Regel um eine NIR-Kamera, die über die zu kontrollierende Breite in einem definierten Abstandsrastrer quer zur Transportrichtung des Recyclingguts Spektren aufzeichnet und anschließend auswertet. Als NIR - Beleuchtungsquellen dienen dabei Wolframlampen (Linienstrahler). Der im jeweiligen Breitensegment mittels spezifischem NIR-Spektrum erkannte Kunststoff wird dann anschließend über das zum Detektorsegment dazugehörige Blasluftsegment aussortiert. Zur Farbtrennung über die gesamte Fließband- bzw. Rutschenbreite wird eine Farbzeilenkamera in Verbindung mit einer Fluoreszenzlampe bzw. einer Weißlicht-LED-Zeile eingesetzt. Auch hierbei wird die gesamte Detektionsbreite in Segmentabschnitte unterteilt. Eine der Detektorzeile zugehörige Blasluftleiste übernimmt die Aussortierung.

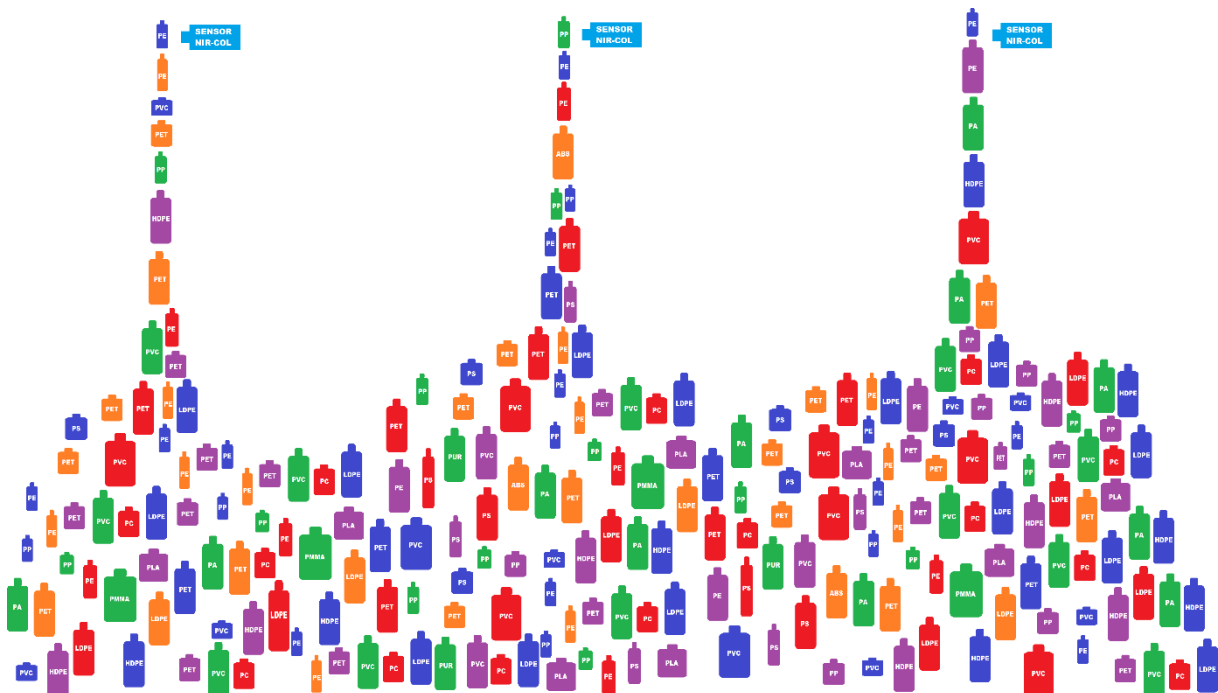


↑ NIR-Kamera der Firma TOMRA mit NIR-Beleuchtungseinheit

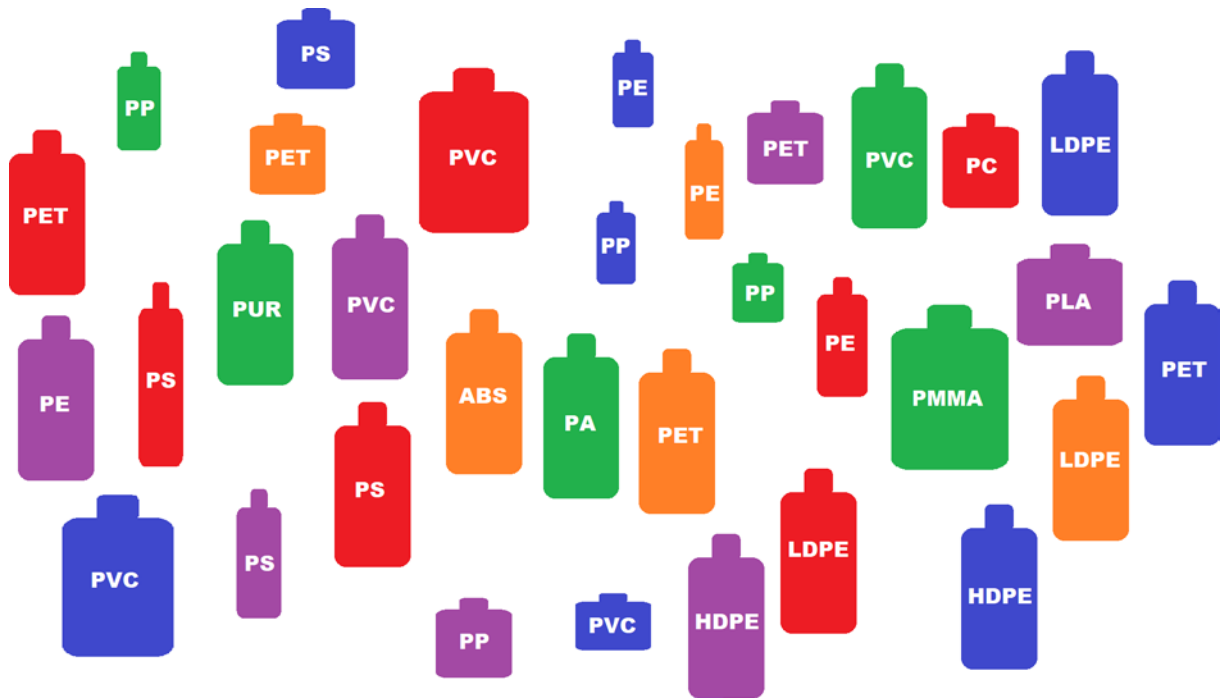


Zufuhr der Kunststoffflaschen über ein Förderband. Detektion der Flaschen über die gesamte Breite des Förderbandes. Linienförmige NIR-Beleuchtungseinheit sowie zeilenförmiger Detektionsbereich. Aussortierung der Flaschen über Blasluftleiste.

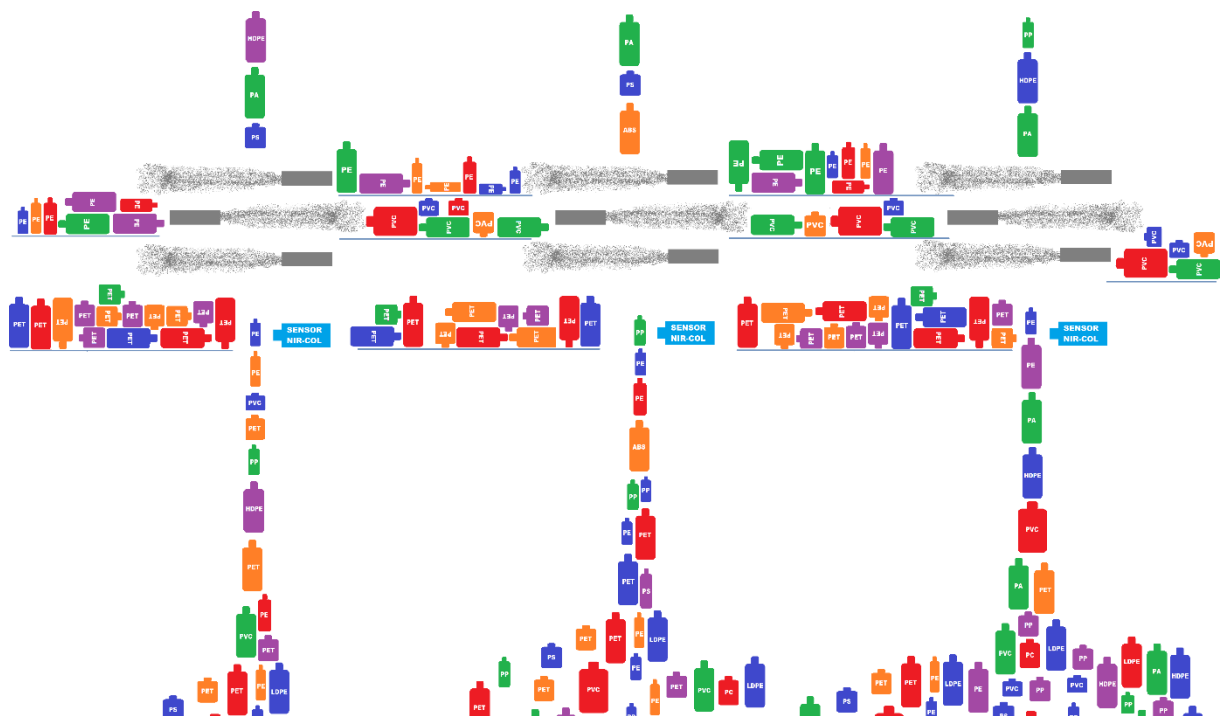
Im Gegensatz zu Glas kommt das Kunststoffrecyclinggut in der Regel in ganzen Stücken bei den Sortieranlagen an. Dadurch ergeben sich alternative Detektions- sowie Sortiermöglichkeiten, zumal NIR-Kamera basierende Systeme zum einen in der Anschaffung sehr kostenintensiv sind und zum anderen nicht an jedem Ort eingesetzt werden können. Beispielsweise müssen an den Rücknahmestationen in den Supermärkten die Plastikbehältnisse einzeln zugeführt werden, wodurch eine diskrete Detektion einzelner Objekte erforderlich ist. Das zu entsorgende Material kann hierbei mittels Rutsche der Detektoreinheit mit anschließender Ausblasvorrichtung zugeführt werden. Aber auch in den Recyclingbetrieben könnte diese Art der Detektion und Sortierung als wirtschaftliche Alternative dienen. Hierbei könnten mehrere dieser Detektions- und Sortierstränge parallel betrieben werden, um auf den nötigen Durchsatz zu kommen.

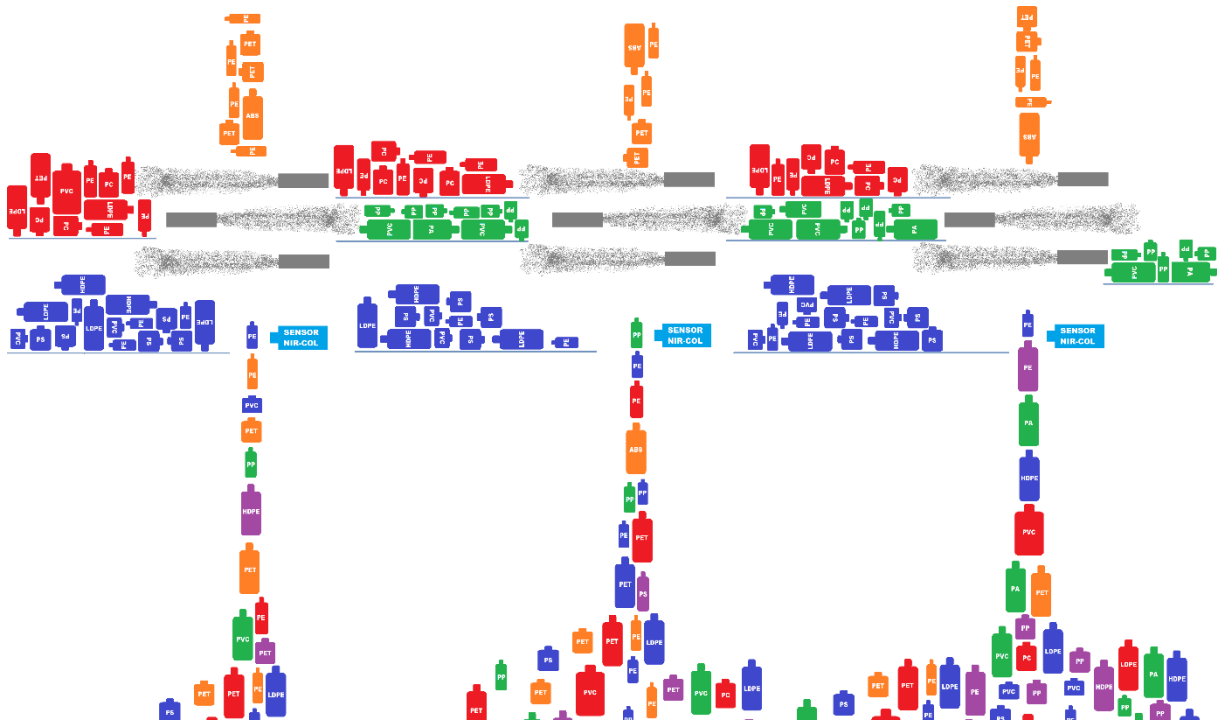


↑ Bildung mehrerer paralleler Sortierstränge



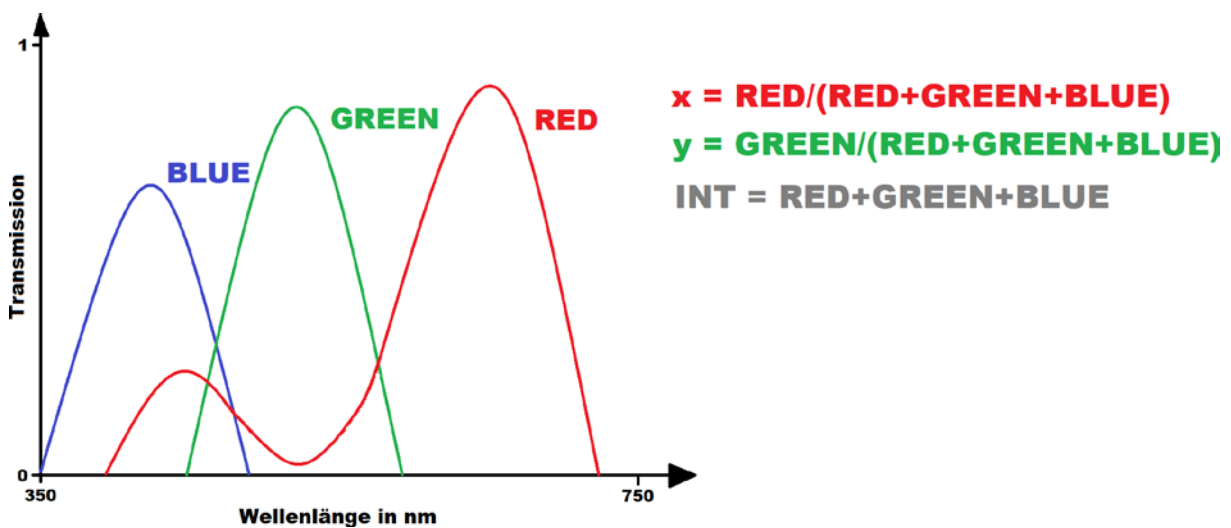
Das Recyclinggut besteht üblicherweise aus verschiedenen Kunststoffarten, Farben, unterschiedlicher Formen sowie Papier- oder Kunststoffetiketten auf den Objekten (beispielsweise auf Kunststoffflaschen). Eine Trennung der Flaschen sollte in erster Linie nach Kunststoffart erfolgen, zudem ist es in den meisten Fällen erforderlich, auch nach Farbe zu trennen.



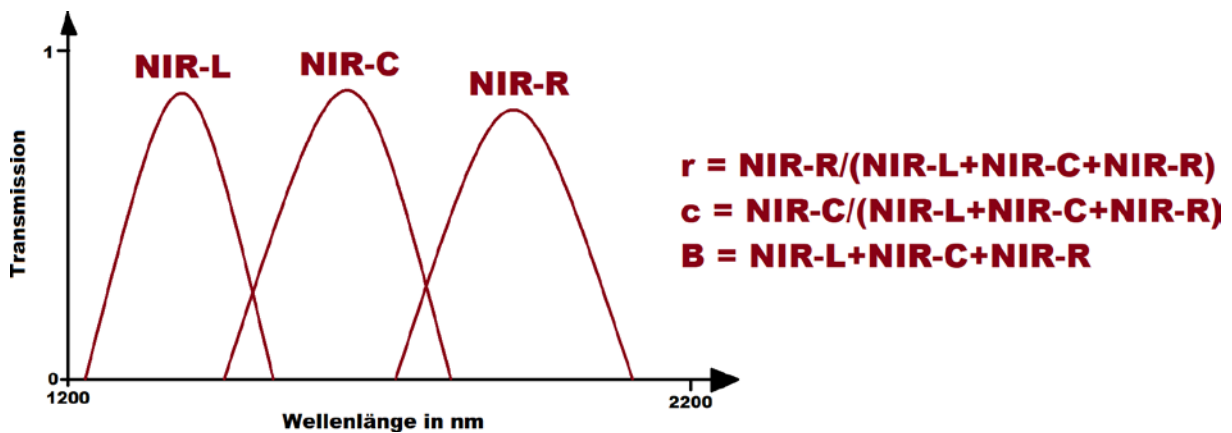


Dabei kann beispielsweise zunächst nach Farbe getrennt werden und anschließend jeweils nach Kunststoffart oder aber auch in umgekehrter Reihenfolge. Auch eine zeitgleiche Trennung nach Farbe und Kunststoffart wäre denkbar, allerdings erfordert das eine Reihe von nacheinander folgenden Blaslufteinheiten.

Während bei den NIR-Kameras eine Detektion der jeweiligen Plastikart mittels spektraler Auswertung im NIR-Bereich erfolgt, wird bei dem hier beschriebenen Verfahren die Kunststoffmatrix nach dem sog. Dreibereichsverfahren ermittelt. Nach dem Vorbild der Natur (menschliches Tagessehen basiert auf der Ermittlung des Farbwertes aus den sog. Fotorezeptoren (rot, grün und blau empfindliche Zäpfchen)) wird dieses Verfahren bereits zur Farbkontrolle (bei SI von RGB nach xyINT bzw. siM) bzw. zur Farbmessung (RGB bzw. XYZ nach xyY bzw. L*a*b*) erfolgreich eingesetzt.



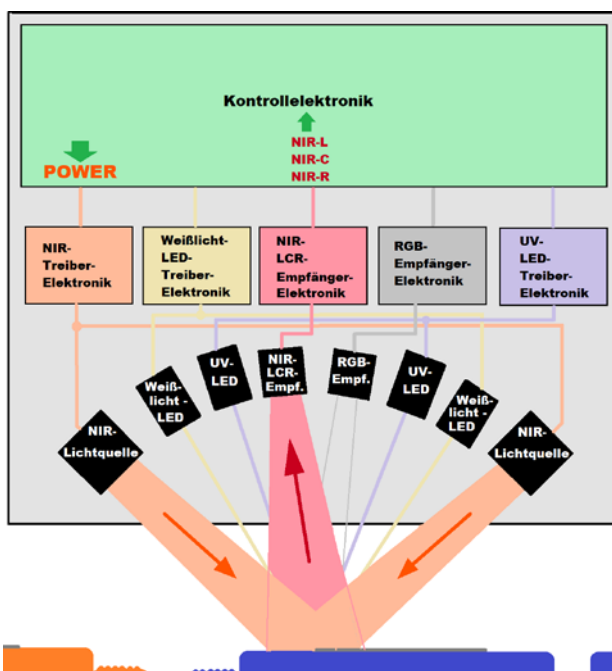
Hierbei wird der zur Erkennung der Kunststoffart erforderliche Wellenlängenbereich in Transmissionsbereiche (drei optische Fenster) unterteilt:



Nach den optischen Filtern folgt eine Konvertierung des jeweils empfangenen Lichtes in die drei Fotoströme NIR-L, NIR-C sowie NIR-R. Anschließend werden die „Rohsignale“ mittels gleicher Algorithmen wie sie bei der x,y,INT-Ermittlung angewendet werden, ermittelt. Empirische Untersuchungen haben ergeben, dass sich hierfür ein Wellenlängenbereich beginnend von typ. 1200nm bis 2200nm zur Unterscheidung der Kunststoffarten besonders eignet.

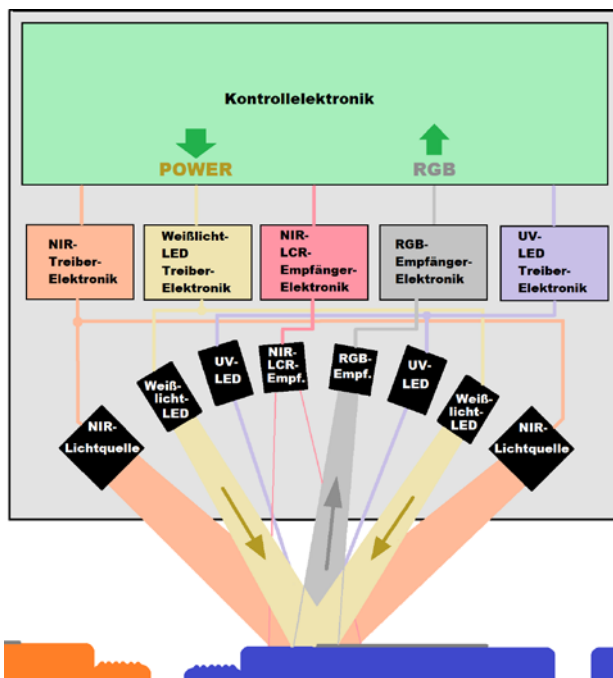
Damit eine quasi zeitgleiche Erkennung von Kunststoffart und Kunststofffarbe erfolgen kann, müssen vorzugsweise beide Detektorarten in ein System integriert werden. Das zur Auswertung erforderliche Licht stammt dabei von den im System integrierten Weißlichtquellen (Weißlicht-LEDs) sowie NIR-Lichtquellen. Zur besseren Detektion insbesondere von Papieretiketten sind des Weiteren auch UV-Lichtquellen vorgesehen:

Auswertung der NIR-Messwerte:



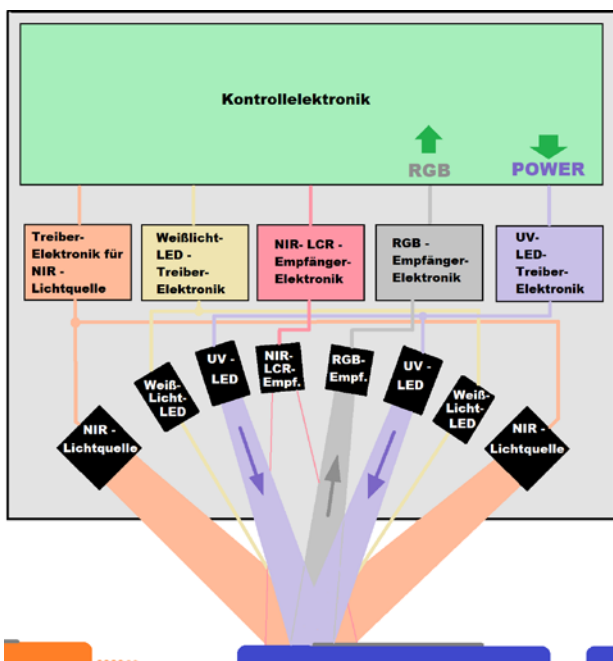
Neben den drei Lichtquellenarten für den UV-, VIS- (Weißlicht-) sowie NIR-Bereich und den beiden Detektoreinheiten für sichtbares und NIR-Licht ist im Sensorsystem des Weiteren noch die für den Betrieb bzw. die Auswertung erforderliche Treiberelektronik, Empfängerelektronik sowie Kontrollelektronik untergebracht. Bedingt durch die eingesetzte Lichtquellenart wird für den NIR-Bereich kontinuierliches Licht verwendet, während mit den vorhandenen UV- sowie Weißlicht-LEDs gepulst gearbeitet wird.

Auswertung der Farbwerte (RGB):



In diesem Modus werden zusätzlich zur NIR-Lichtquelle die Weißlicht-LEDs aktiviert (im Pulsbetrieb). Dabei werden die RGB-Daten unmittelbar vor dem Einschalten der Weißlicht-LEDs abgefragt und anschließend ein weiteres Mal bei aktiviertem Weißlicht. Durch Subtraktion beider RGB-Wertetriple ergibt sich hierbei ein fremdlichtunabhängiges Messergebnis.

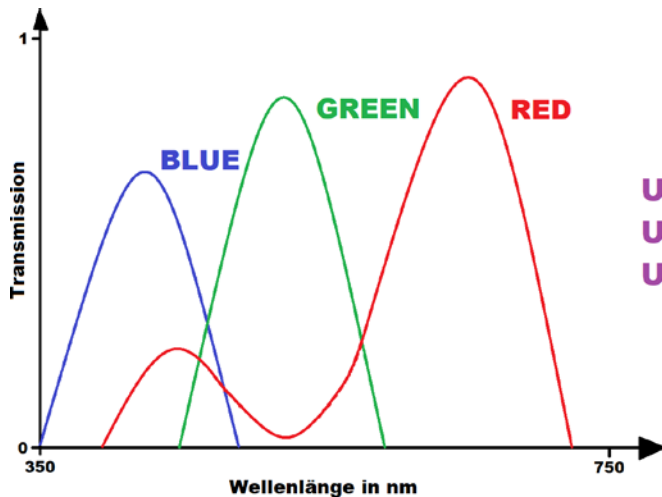
Auswertung der mittels Fluoreszenzlicht generierten Farbwerte (RGB):



Neben der NIR-Lichtquelle werden in diesem Modus UV-LEDs gepulst in Betrieb genommen. Analog zur Auswertemethode mit aktivierten Weißlicht-LEDs erfolgt auch hier eine fremdlichtunabhängige Auswertung. Dabei ist zu beachten, dass hierbei nur das in den sichtbaren Wellenlängenbereich mittels Fluoreszenz, beispielsweise herrührend von Papieretiketten, konvertierte Licht in der weiteren Auswertung Verwendung findet.

Papieretiketten sind in der Regel mit sog. Aufhellern versehen. Durch die Einwirkung von UV-Licht werden diese Aufheller zur Fluoreszenz im sichtbaren Bereich (mit einem signifikanten Maximum im blauen Wellenlängenbereich) angeregt. Bei der Auswertung der NIR-Daten würden die Papierabschnitte die Ermittlung der korrekten Kunststoffart negativ beeinträchtigen, weswegen dieser Abschnitt ignoriert wird.





$$UV-x = RED / (BLUE + GREEN + RED)$$

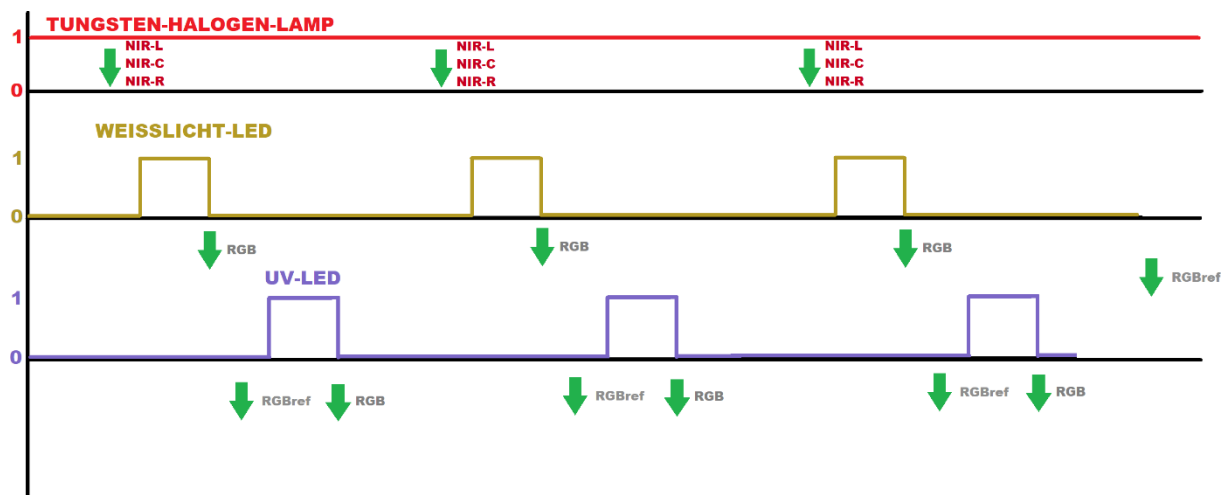
$$UV-y = GREEN / (BLUE + GREEN + RED)$$

$$UV-INT = BLUE + GREEN + RED$$

Das durch das UV-Licht mittels Aufheller in den sichtbaren Wellenlängenbereich konvertierte Licht wird anschließend vom RGB-Detektor der Kontrollelektronik zur Datenweiterverarbeitung übermittelt.

Zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Pulssequenzen:

Die Pulsfrequenz sowohl der Weißlicht-LEDs als auch der UV-LEDs liegt beispielsweise im kHz-Bereich. In Bezug zur Periodendauer (100%) beträgt die zeitliche Länge der Lichtpulse in etwa 20%. Weißlicht- und UV-Pulse sind dabei phasenverschoben, sodass sich keine gegenseitige Beeinträchtigung ergeben kann.



Signalatenermittlung und Datenauswertung in der Kontrollelektronik:

In der Kontrollelektronik erfolgt neben der gesamten Steuerung der Lichtquellen zudem die zeitsynchrone Auswertung der Rohdaten der beiden Empfängereinheiten. Nach Ermittlung der einzelnen „Farbräume“ werden die Daten in einer Tabelle zusammengefasst. Dort kann die Software dann nach entsprechenden Kriterien (der „Best Hit“-Methode sowie dem Gruppenmodus) eine Sortierung der Objekte nach Kunststoffart, Kunststofffarbe oder aber nach beiden Kriterien ermöglichen. Für ein entsprechendes Timing beispielsweise der Blasluftdüsenaktivierung muss softwaretechnisch Sorge getragen werden.

TYPE	1	2	3	4	5	...	59	60	61	62	63	64
UV-x												
UV-y												
UV-INT												
x												
y												
INT												
r												
c												
B												
C-GRP												
P-GRP												

Ein typisches Auswerteverfahren könnte folgendermaßen aussehen:

Einlernen:

Zunächst müssen die infrage kommenden Objektklassen eingelernt werden. Dazu werden entweder Erfahrungswerte verwendet, die in vorhergehenden Abläufen empirisch ermittelt worden sind, oder aber durch gezieltes Platzieren der einzelnen Objekte im korrekten Abstand und in der richtigen Position zur der Sensoroptik. Die einzelnen Objekte werden dann als Typen angelegt, jeder Typ erhält die Datentripel (UV-x,UV-y,UV-INT), (x,y,INT) sowie (r,c,B) ermittelt aus den Rohdaten der jeweiligen Empfangseinheiten. Anschließend lassen sich Kunststofffarbgruppen sowie Kunststoffartengruppen bilden. Je nach Parametrierung der Software wird nun in der kompletten Matrix nach dem besten Treffer (BEST HIT) gesucht, oder aber es erfolgt eine Suche nach dem besten Treffer nur innerhalb der Farbgruppe (C-GRP) oder innerhalb der Artgruppe (P-GRP).

Auswertevorgang:

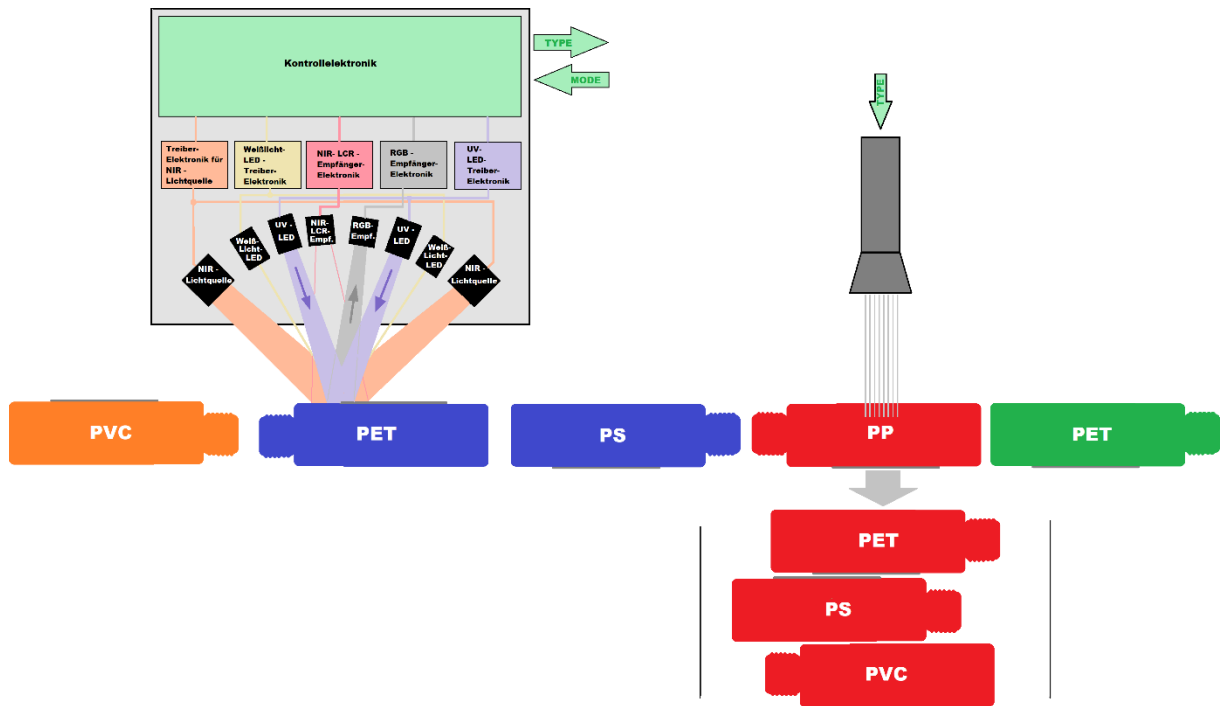
Während des normalen Betriebes erfolgt zunächst eine Detektion (Triggerung) eines Objektes (Selbsttriggerung). Das Triggern erfolgt dabei mittels des integrierten Farbsensors (in erster Linie über den Messwert INT); anschließend werden die drei Datentripel ermittelt und nach Beendigung des Triggervorganges nach dem Mehrheitsprinzip (Anzahl der meisten Treffer) und je nachdem ob und falls welche GRP- Funktion (C-GRP „on“ oder P-GRP „on“) aktiviert worden ist, erfolgt ein entsprechendes Aussortieren des jeweiligen Objektes:

Beispielsweise nach Farbe:

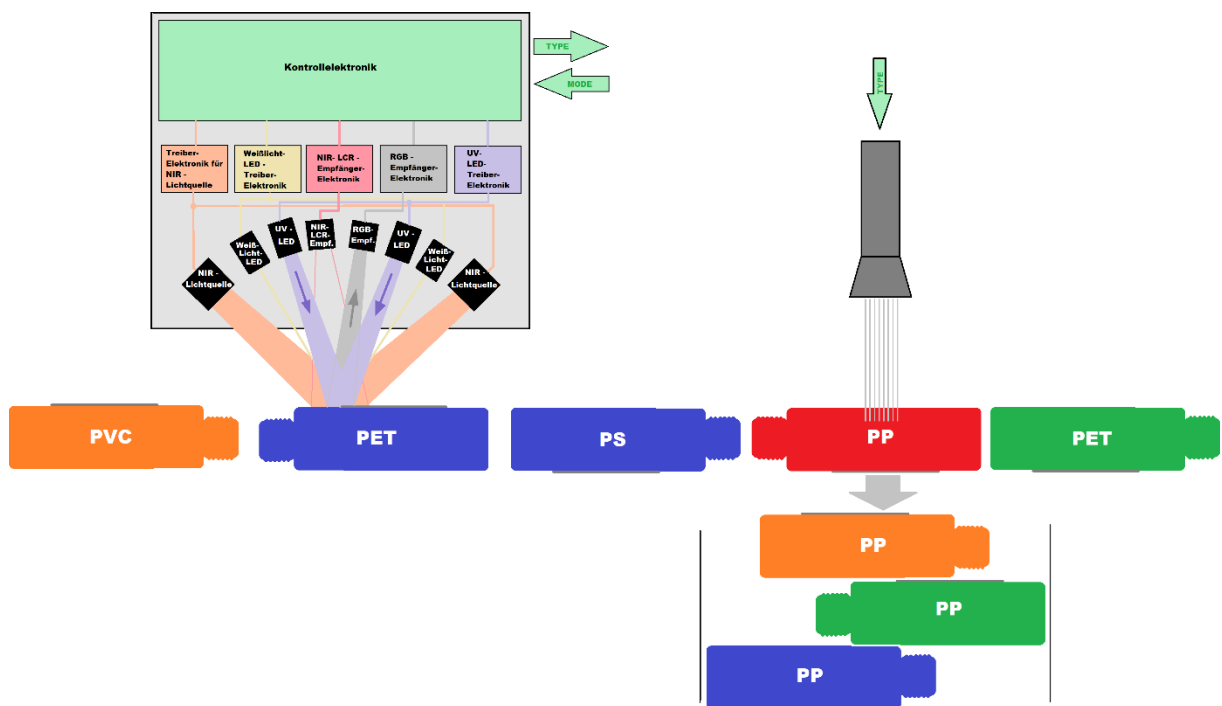
Alle roten Objekte landen im gleichen Behälter, die Sortierung der restlichen Behälter erfolgt nach dem gleichen Prinzip. Je Farbe ist eine Ausblasvorrichtung erforderlich.

Beispielsweise nach Art:

Da die NIR-Werte (r,c,B) von der Farbe beeinflusst werden, kann eine zuverlässige Ermittlung der Kunststoffart (hier: PP) nur durch Hinzuziehen der jeweiligen Farbwerte (x,y,INT) erfolgen.



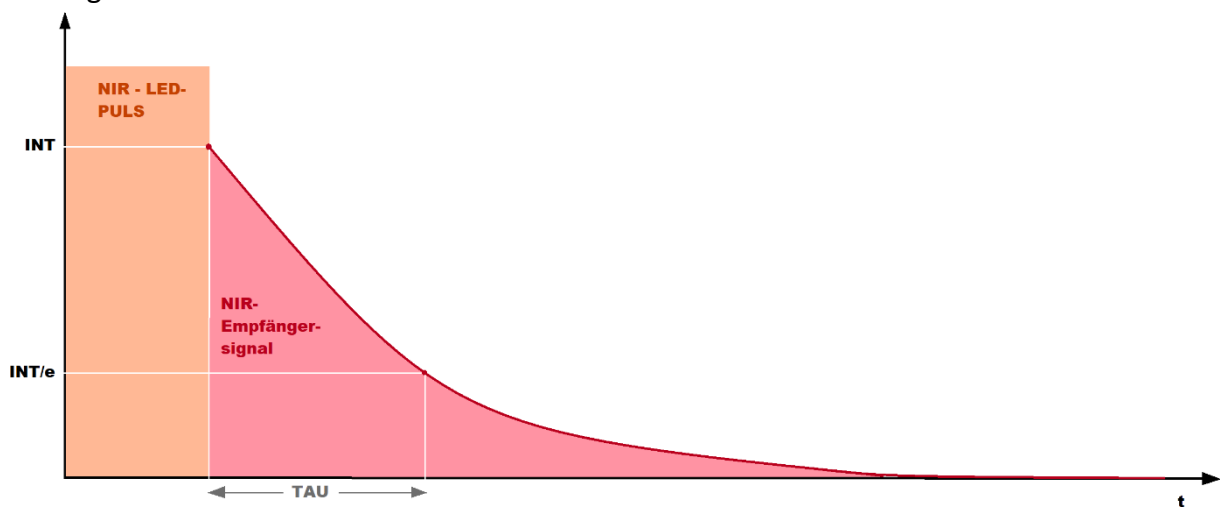
↑ Sortierung nach Kunststofffarbe



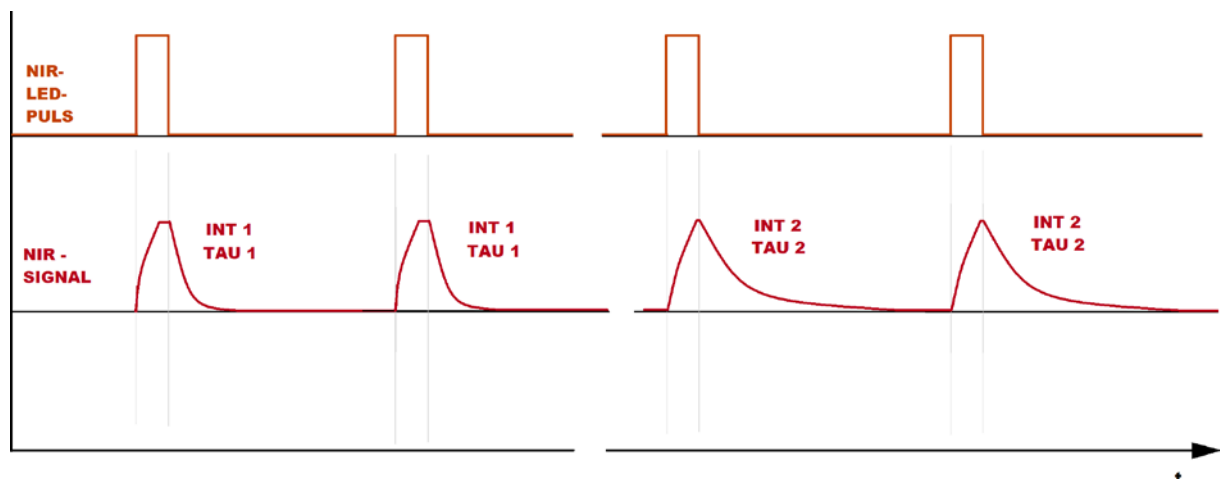
↑ Sortierung nach Kunststoffart

Verwendung zusätzlicher Marker zur Unterscheidung der Einsatzart des Objektes

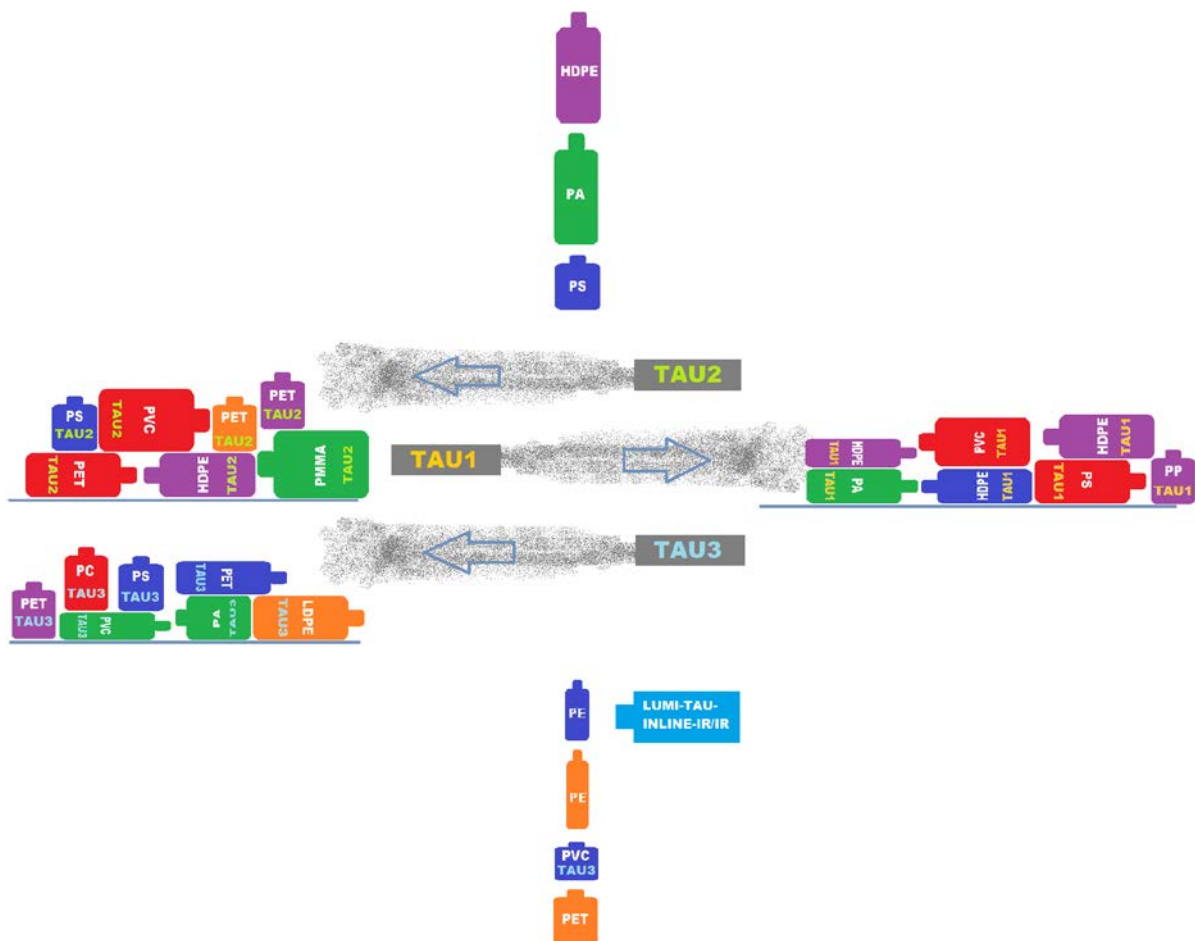
Vielfach reicht es nicht, durch den Recyclingprozess die korrekte Kunststoffart in der jeweiligen Farbe zu erhalten, vielmehr sollte auch nach deren vorheriger Bestimmung (Behälter bzw. Verpackung von Lebensmitteln, Behältnis für Flüssigseifen, Behälter zur Aufbewahrung von Abflussreinigern) sortiert werden. Um diese Unterscheidung bewerkstelligen zu können, müssen die jeweiligen Objekte nach Einsatzzweck markiert werden. Hierzu können beispielsweise phosphoreszierende Downconverter eingesetzt werden. Durch gepulste Anregung mit Licht im geeigneten Wellenlängenbereich (es gibt Marker, die sich im UV-Bereich anregen lassen und eine Sekundäremission im sichtbaren Wellenlängenbereich aufweisen, des Weiteren Marker, die mit Blaulicht- oder aber Grünlicht angeregt werden und einen Response im roten Wellenlängenbereich bzw. im NIR-Bereich liefern und schließlich noch die Marker, die durch Anregung mit NIR-Licht wiederum NIR-Licht im etwas niederenergetischeren Wellenlängenbereich abstrahlen) erfolgt eine Sekundäremission der jeweiligen Marker, die gegenüber der Primäremission einen höheren Wellenlängenbereich aufweist und des Weiteren (bei einigen dieser Marker) gegenüber der Primäremission nachleuchtet. Dieses Nachleuchten ist nun charakteristisch für den jeweiligen Marker; da es sich dabei um einen exponentiell abklingenden Vorgang handelt, kann dieser mittels zweier Parameter beschrieben werden: Zeitkonstante TAU und Anfangsintensität INTO.



Unterschiedliche Marker weisen unterschiedliche TAUs sowie INTs auf:



Sortierung nach TAU (Ausschnitt: 1. Linie):



Zusätzlich könnte die Markerinformation auch dazu dienen, festzustellen ob und welcher prozentuale Anteil an Recyclingmaterial im Endprodukt enthalten ist.

Idee:

Damit im Endprodukt der vom Gesetzgeber geforderte Anteil an Recyclingmaterial überprüft werden kann, sollte das Recyclinggut vor der Einbringung in das Neumaterial mit einem Marker versehen werden. Nach der Beimengung des Markers sollte das Recyclinggut eine konstant bleibende Konzentration von Markern aufweisen. Mittels geeigneter Sensorik und geregelter Eingriffe in die jeweilige Dosiereinheit kann dabei eine Markerkonzentrationskonstanz erreicht



werden. Freilich muss dabei verhindert werden, dass dieser Prozess seitens des Endkunden durch übermäßige Zugabe von Markergut (enthalten im Masterbatch) beeinflusst werden kann (und dadurch eventuell anteilsmäßig weniger Recyclinggut als vom Gesetzgeber gefordert beimengt). Ähnlich dem Prozess aus der Genussmittelindustrie, wo bereits eine

Prozesskontrolle seitens des Gesetzgebers erfolgt (bei der Verpackung von Zigaretten wird vor dem Sealing mittels einer durchsichtigen Folie, eine sog. Steuermarke (tax stamp) auf der Verpackung aufgebracht - die Abgabe der Anzahl der Steuermarken wird dabei seitens des Gesetzgebers kontrolliert, des Weiteren erfolgt eine stichprobenartige Kontrolle der korrekten Prozesseinhaltung), könnte auch hier eine Kontrolle während sowie nach Beendigung der Herstellungsprozesses erfolgen.

Im Folgenden soll der Part des Recyclingprozesses, der die Markereinbringung beinhaltet, anhand folgender Skizze erläutert werden:

Als Sensoren zur Sortierung können hierbei beispielsweise obige Sensoren eingesetzt werden (NIR-Dreibereichssensoren). Dieser Sensor zusammen mit einem Farbsensor (Trennung des Recyclingmaterials nach Farbe) sowie einem UV-Farbsensor (Erkennung evtl. vorhandener Papieretiketten) ergibt dann einen Multisensor für den Kunststoffrecyclingbereich). Geschreddertes und bereits nach Kunststoffart vorsortiertes Recyclingmaterial wird einem Extruder zugeführt: Aufgeschmolzen, in Stränge verarbeitet und anschließend zu Granulat zerkleinert, wird unmittelbar vor der Dosiereinheit I das Recyclingmaterial mittels Sensor 1 (beispielsweise ein TAU-Reader -> TAU + INTO) nach evtl. schon vorhandenen Markern untersucht. Das Ergebnis des Sensors 1 hat nun Einfluss auf die Dosiereinheit I sowie auf die Dosiereinheit II. Die Dosiereinheit II in Verbindung mit dem Sensor 2 [hierbei könnte ebenfalls ein TAU-Reader (TAU + INTO) zum Einsatz kommen] sorgt nun durch Zufuhr des markierten Masterbatches für eine konstante Beimengung von Markern im Recyclinggut (konstantes Verhältnis zwischen Recyclingmaterial und Marker). Nach der Zufuhr des Neumaterials mittels Dosiereinheit III erfolgt eine Ausgangskontrolle mit Hilfe eines weiteren Sensors (Sensor 3) des gleichen Typs (TAU-Reader).

