



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Slutrapport, PolySort og PolySort PLUS Fleksibel sortering af plastaffald

MUDP-rapport

April, 2018

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Peter Torben Tang (IPU), Peter
Tøttrup (IRSee) & Lars Mensal (IHP Systems
A/S)

ISBN: 978-87-7038-058-4

Miljøstyrelsen offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	4
2.	Sammenfatning	5
3.	Plastaffald i Danmark	7
3.1	Plasttyper	7
3.2	Mængder af plastaffald i Danmark	9
3.3	Priser på genbrugsplast	11
4.	Identifikation og sortering af plastaffald	13
4.1	Sortering af plastaffald	13
4.2	Objektdetektering og farveanalyse	15
4.3	Identifikation af plastmaterialer med infrarødt lys	17
4.4	Spektralanalyse	19
4.5	Spektralklassifikation via machine-learning	20
5.	Opbygning af PolySort maskinen	21
5.1	Transport af plaststykker	21
5.2	Sensorer	24
5.3	Vision system	27
5.4	Aktuatorer	28
5.5	Styring	29
6.	Resultater	32
6.1	Kapacitetsmålinger	32
6.2	Genkendelsesnøjagtighed	33
7.	Plastaffald og økonomi	37
7.1	Hvem vil have glæde af en PolySort maskine?	37
7.2	Business case	38
7.3	Anbefalinger og det videre arbejde	40
8.	Konklusion	42
Bilag 1.	Referencer	44
Bilag 2.	Husholdningsaffald	45
Bilag 3.	MIR-spektre	46

1. Forord

Denne rapport beskriver resultaterne der er opnået i de to sammenkoblede projekter, PolySort og PolySort PLUS. Begge projekter er støttet af Miljøstyrelsen (MUDP) og handler om at udvikle en fleksibel og automatisk maskine til sortering af plastaffald.

Der er et meget stort, og stigende, forbrug af plastmaterialer i det meste af verden. Samtidig er der, både nationalt og i EU, et stort ønske om at nedbringe CO₂ udslippet og spare på ressourcerne. Senest har EU vedtaget en ny ambitiøs plaststrategi, der forventes yderligere at sætte fokus på denne udvikling.

Der findes i dag en række virksomheder og kommuner der arbejder med at indsamle, sortere og genanvende plast. Indenfor industriaffald fra virksomheder er der en del aktivitet, omfattende både indsamling/afhentning, forbehandling, indfarvning og (re)granulering samt videresalg af genbrugsplast. I Danmark er det specielt Aage Vestergaard Larsen A/S der arbejder med dette område, og i øvrigt har gjort det i mange år – også længe før det blev moderne. Samtidig findes der i en række kommuner indsamlingsordninger for plastaffald, hvor borgerne – i større eller mindre grad – selv sorterer deres affald. I nogen kommuner er f.eks. metal, plast og glas samlet i én beholder og kræver derfor en for-sortering i affaldstyper før en egentlig sortering af plastfraktionen er mulig. Indtil starten af 2017 blev alt det indsamlede plastaffald fra husholdninger sendt til udlandet (typisk Sverige eller Tyskland) for at blive sorteret på store anlæg, men der er dog flere tiltag på vej i Danmark hvoraf det mest markante er RenoNords nye anlæg.

For at kunne genanvende plastaffald til fremstilling af nye produkter af nogenlunde samme type kræves et relativt rent materiale. Hvis indholdet af urenheder (andre polymertyper, papir, mm.) er højere end ca. 5%, vil materialet ikke kunne anvendes til ret mange formål – og prisen for en sådan vare er da også meget lav.

På samme måde er det nødvendigt at sortere plasten efter farve, da der ikke skal mange farvede plaststykker i en pose med hvidt plastaffald for at ødelægge muligheden for at fremstille nye hvide plastemner. Typisk vil man indfarve partier af plast i blandede farver med "carbon black", således at det hele ender som en ensfarvet sort eller mørkegrå masse. Dette er dog uheldigt idet sort plast er svært at identificere for mange sorteringssystemer, og fordi det så ikke længere er muligt at bruge den genanvendte plast til nye produkter af samme type. Indfarvning kan derfor betragtes som en nedgradering. Netop sort plast er dog et af kernepunkterne i PolySort PLUS projektet, da introduktionen af en ny teknologi – der arbejder direkte i det infrarøde område – giver mulighed for at identificere sort plast på lige fod med andre farver.

2. Sammenfatning

Der smides mellem 300 og 400 ton plast ud hvert år i Danmark. Omkring 85% er denne mængde er de 6 mest almindelige plasttyper (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP og PS) og resten består af de mere tekniske (og dyrere) plasttyper som f.eks. nylon (PA) og plexiglas (PMMA) samt en mindre del der er hærdeplast (og som derfor er meget vanskeligt at genanvende). Plastaaffaldets sammensætning (fordeling på plasttyper) afhænger meget af hvilken branche det kommer fra. Specielt indenfor bilindustrien og i elektronikbranchen anvendes en række tekniske plasttyper, som sjældent anvendes i emballagebranchen (og derfor stort set ikke findes i plastaaffald fra husholdninger).

Mængden af tilsætningsstoffer, og antallet af plasttyper hvori de forekommer, kan og har været, en ukendt faktor der forstyrrer sorteringen af plastaaffald i PolySort projektet. Jo større fleksibilitet man ønsker og jo flere plasttyper maskinen skal kunne genkende, desto sværere bliver det at sikre en positiv identifikation.

Identifikation af både farver, plasttyper og visse tilsætningsstoffer er beskrevet i litteraturen. Der findes forskellige måder at opbygge identifikationssystemet på, men ved at udvælge et antal bølgelængder i NIR/SWIR (det nære infrarøde) området og sammenligne hvor meget lys der absorberes af plastaaffaldet ved disse bølgelængder, er det muligt at identificere plasttyper der er kemisk forskellige. Farver kan identificeres med et almindeligt kamera. Sort plast er et kendt problem indenfor plastsortering, fordi der bliver for lidt signal at arbejde med. For at løse denne problematik kræves at en helt ny type sensor bliver udviklet. Dette sidste punkt er årsagen til at det oprindelige PolySort projekt blev udvidet (PolySort PLUS), for at give mulighed for at medtage denne nye sensor i plastsorteringen.

På baggrund af litteraturundersøgelsen, samt samtaler med følgegruppen og andre aktører, vurderes det at der er et marked i Danmark (og sandsynligvis også andre steder) for en mindre og fleksibel maskine til at sortere plastaaffald – og også at det vil være muligt at bygge en sådan maskine.

Maskinen består af et fire meter langt og 80 mm bredt transportbånd, udstyret med en række kameraer og mekaniske anordninger (aktuatorer) og er styret af to computere. Plastaaffald kan introduceres i maskinen via en tilfødesilo (rysterende eller vibratorføder) og lander på transportbåndet. Herefter passerer plaststykkerne under de tre kameraer, der registrer farven og – via en algoritme – beregner hvilken type plast der er tale om. Endelig bliver de enkelte plaststykker udsorteret (hvis de er den rigtige farve eller type) og skubbet af båndet ned i en af de mange kasser der står ved siden af transportbåndet. Prototypen har fire kasser til forskellige typer affald, men hvis transportbåndet gøres længere kan systemet sagtens håndtere mange flere udsorteringer. Muligheden for at udsortere f.eks. 10 forskellige typer eller farver ved blot ét gennemløb, er en af PolySort maskinens styrker. Til gengæld gør det smalle transportbånd, at maskinens kapacitet (målt som det antal kilo affald man kan placere på transportbåndet pr. time) er lavere end for de kommercielle NIR-scannere.

Resultaterne viser, at maskinen er i stand til at sortere omkring 200 kg plastaaffald pr. time – dog afhænger kapaciteten af affaldet beskaffenhed, og er i nogen grad også hæmmet af at den computer der foretager klassifikationen ikke helt kan følge med. Maskinen kan sortere både farvet og sort plastaaffald, men har i den nuværende udgave problemer med klare eller transparente plaststykker. Dette er dog noget der kan ændres – og som vil blive ændret i fremtidige versioner.

Maskinen kan genkende en række almindelige plasttyper (PE, PVC, ABS og PMMA) med en træfsikkerhed tæt på 100%. For PP og PC ligger præcisionen lidt over 80% for farvet plast. Kigger man på sort plast, er præcisionen lidt lavere, men dog stadig over 70% for PE, PS og PP. Da MIR sensoren kun kan se en del af spektret, og PET ikke har nogen tydelige "signaturer" i dette område, er klassifikationen af PET generelt ret dårlig (45% for sort PET og 67% for farvet PET). Dette kan dog forbedres ved at udvide det område som sensoren opererer i, og aktiviteter i den retning er allerede sat i gang her efter projektets afslutning.

Det var oprindeligt meningen at maskinen også skulle kunne identificere forskellige fyldstoffer i plastaffaldet, det kunne f.eks. være brandhæmmere eller blødgørere. Desværre er det ikke lykkedes at opnå en tilstrækkelig god klassifikation af disse stoffer, bl.a. fordi det var ganske vanskeligt at få fat i plastaffald med en kendt koncentration af specifikke fyldstoffer. Der er dog ikke noget der tyder på, at der er nogen teknisk årsag til at dette – og det således stadig vores overbevisning at maskinen vil blive i stand til at klassificere i hvert fald nogle fyldstoffer.

3. Plastaffald i Danmark

Dette kapitel indeholder en kortlægning af mængder og sammensætning af plastaffald i Danmark, baseret på mindre litteraturstudie udført i starten af PolySort projektet.

3.1 Plasttyper

Plastik kan opdeles i to store grupper af materialer, nemlig de termoplastiske og hærdeplast. Termoplastiske materialer bliver formbare ved opvarmning, og er derfor relativt lette at genanvende. Hærdeplast, som f.eks. epoxy, hærdes ved en kemisk reaktion og er derfor meget vanskelige at genanvende fordi de ikke nødvendigvis bliver formbare ved opvarmning – men blot nedbrydes eller brænder (ved høje temperaturer). De fleste former for polyuretan (PUR eller PU) hører også til hærdeplastgruppen.

De termoplastiske materialer er inddelt i grupper efter type [1], og kan på mange plastprodukter identificeres ved de velkendte trekant-symboler (se figur i margin). Der er mulighed i systemet for at have mange flere typer, men foreløbig anvendes kun type 1 til 6 – med type 7 som en slags "øvrige":

1. polyethylentereftalat (PET)
2. "high-density" polyethylen (HDPE)
3. polyvinylklorid (PVC)
4. "low density" polyethylen (LDPE)
5. polypropylen (PP)
6. polystyren (PS)
7. øvrige termoplastiske materialer



De officielle mærker for PET og PP (plasttype 1 og 5).

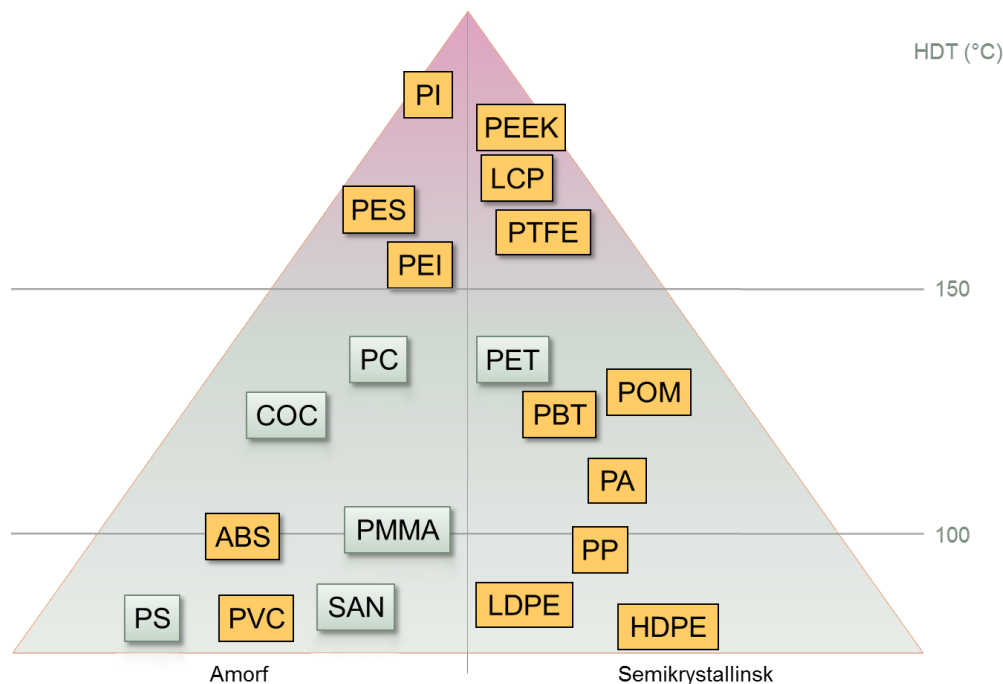
Trekant symbolet findes på mange emballagetyper, typisk integreret i plastemnet, men kan være svært at finde på grund af manglende kontrast. Mindre emner, industrielle produkter eller emner som er skåret i mindre stykker, vil ofte mangle et mærke.

Systemet er oprettet for at undgå at plasttyperne blandes sammen, da det vil sænke værdien af fraktionerne – eller gøre det umuligt at genanvende plasten pga. for stor forskel i smeltepunkt og øvrige egenskaber. Selvom systemet umiddelbart mangler en række kendte plasttyper (der så havner i gruppe 7), så er de mest almindelige plasttyper til emballage fint repræsenteret og de 6 grupper er da også de mest udbredte i de opgørelser der findes over plastaffald i Danmark. I figur 3 herunder, kan man se at gruppe 1 til 6 står for ca. 85% af den samlede mængde plastaffald.

Plastmaterier vælges ofte efter deres mekaniske egenskaber og efter om de skal være transparente eller ej. En god måde at skabe et overblik over materialerne (termoplast) er derfor den kendte polymerpyramide (se herunder), der placerer materialerne efter HDF (heat deflection temperature) og amorf/krystallinsk struktur.

Prisen på polymermaterialer afhænger i nogen grad af HDT – men f.eks. også af om de er transparente eller ej. I Polymerpyramiden ovenfor er de transparente materialer markeret med en grønlig baggrund og de øvrige med en gul baggrund. Det ses af figur 1 at PET er det materiale, blandt de seks grupper der er nævnt ovenfor, der burde have den højeste værdi. PS kan dog i nogle tilfælde have næsten ligeså høj værdi, fordi det er transparent og har en række

andre gode egenskaber. HDPE, LDPE og PVC vil typisk have den laveste værdi og er samtidig de materiale som anvendes mest. Materialer i "mellemgruppen" som ABS (der bl.a. bruges til LEGO klodser), PC, PMMA (plexiglas), POM og nylon (PA) koster typisk det dobbelte af HDPE og PVC.



Figur 1: Placering af udvalgte termoplastiske materialer i den såkaldte polymerpyramide. På y-aksen er HDT ("Heat Deflection Temperature") et udtryk for hvor høje temperaturer materialet kan tåle og samtidig fungerer mekanisk. De amorfe (venstre del) materialer har mere diffuse smeltepunkter, og er generelt mere transparente, end de semikrystallinske (højre del). Transparente materialer er markeret med en svagt grønlig baggrund.

3.1.1 Additiver og tilsætningsstoffer

Tilsætningsstoffer bruges i plastmaterialer af mange forskellige årsager. I nogen tilfælde er der tale om deciderede fyldstoffer, dvs. relativt billige stoffer der udelukkende bruges for at "fortynne" plasten og dermed gøre produktet billigere. Det vil typisk være kridt eller andre (billige) uorganiske forbindelser, f.eks. indeholder havemøbler af plast ofte store mængder kridt [2].

I det fleste tilfælde bruges tilsætningsstoffer dog for at tilføre plasten nye egenskaber, eller for at forbedre de eksisterende egenskaber. Indenfor teknisk plast anvendes glasfibre (eller andre fibre af f.eks. kul eller stål) til at forbedre de mekaniske egenskaber, dog typisk polymertyper i den øverste eller næst øverste del af pyramiden i figur 1. Både fyldstoffer og glasfibre kan udgøre op til 50% af det samlede volumen i et plastprodukt.

Endelig tilsættes mange plastprodukter additiver der tilfører plasten helt nye egenskaber, det kan f.eks. være brandhæmmere (typisk brom-forbindelser), stoffer der gør at plastemnet nemmere slipper sprøjtestøbeformen (voks, stearat, silikone og lignende) eller stoffer der kan absorbere UV-stråling og dermed gøre produktet mere resistent overfor sollys.

Mange polymerfolier, til f.eks. emballering af fødevarer, indeholder enten additiver der øger barriereegenskaberne eller er fremstillet som laminater (typisk en type folie med gode barriereegenskaber lamineret mellem to folier af en anden plasttype der har gode mekaniske egenskaber). Dette gælder også for mange PET-flasker, men disse kommer – grundet returpant systemet i Danmark – normalt ikke ind i den almindelige affaldsstrøm.

3.2 Mængder af plastaffald i Danmark

Oplysninger om mængder af affald som produceres i Danmark kan tilgås i Miljøstyrelsens affaldsdatasystem (ADS). Affaldsdatasystemet indeholder data om affaldsmængder i Danmark, inkl. import og eksport af affald. Databasen indeholder imidlertid kun data over kategoriseret/sorteret affald og oplyser f.eks. ikke om mængden af plast i husholdningsaffald, eller i elektronikaffald. Trækkes en rapport for affald i år 2014 og vælges plastik affaldsgrupper fås en totalmængde på 80,9 kton.

Det er heller ikke tydeligt i hvor høj grad plastaffald fra industrien er talt med, og slet ikke det plastaffald som den enkelte virksomhed selv genbruger i produktionen (ved f.eks. at findele indløb og kasserede produkter og blande det i granulatet til næste produktion). Nogle typer af industriaffald er dog med, dette kan bl.a. ses ud fra figur 3 (afsnit 1.2.2).

Der eksisterer en række udgivelser omkring plastaffald der alle opgiver den samlede mængde til mellem 300 – 380 kton. Eksempler på estimer af den samlede mængde plast i dansk affald fra forskellige udgivelser vises i Tabel 1.

Tabel 1: Total mængde af plastaffald i Danmark pr. år ifølge forskellige kilder (og årstal).

Kilde	År	Mængde (kton)
Plastindustrien [5]	2012	319
Plastic-zero [4]	2010	309
Wasted opportunities [6]	2009	382

3.2.1 Mængder af plastaffald fordelt på brancher

PolySort projektet vil fokusere på plastaffald fra mange forskellige kilder. Specielt plastaffald fra fire store områder vil blive undersøgt:

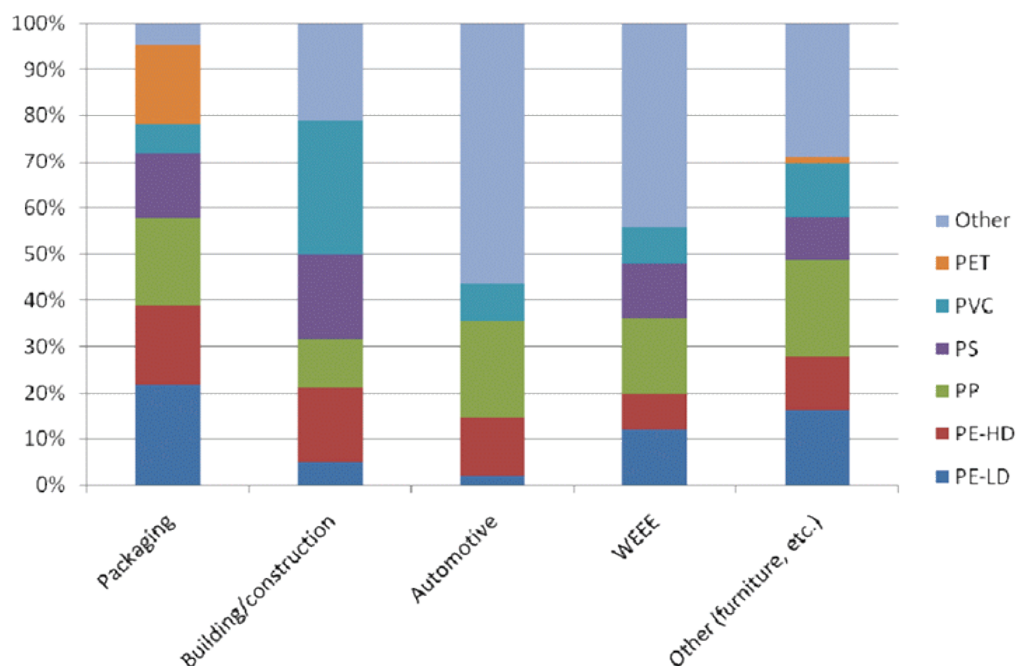
Elektronikskrot: Plast fra kasseret elektronik som fjernsyn, printere, hårtørrere etc. udgør en relativt stor og værdifuld plastmængde. Mange af disse plasttyper indeholder brandhæmmere (additiv) og en frasortering af dem vil være en stor gevinst for miljøet. Et notat fra Teknologisk Institut ("Teknologier og værdier" af Bjørn Malmgren-Hansen fra 14. august 2014) påpeger at plast er ét af otte områder indenfor elektronikskrot med størst forretningspotentiale.

Industri: Mange Danske virksomheder producerer plastprodukter, og disse vil typisk – af forskellige årsager – have en mindre mængde produkter som kasseres. Hvis denne mængde plast sorteres effektivt vil den kunne indbringe en relativt høj kilopris, eller i nogle tilfælde gå direkte tilbage til virksomheden og indgå i nye produkter.

Kommuner: Flere kommuner i Danmark indsamler plastaffald fra almindelige husholdninger og institutioner. Plastaffald fra husholdninger vil indeholde meget polyætylen (PE), der har en lav værdi blandt polymererne, og plastaffaldet indeholder klistermærker og madaffald der helt sikkert vil besværliggøre sorteringen.

Byggeri: Mange steder i byggeriet anvendes plast til f.eks. tagplader, tagrender, kloakrør, etc. Byggeaffald af plast vil således indeholde relativt store stykker, der efter en neddeling (shredder) og sortering burde kunne blive til værdifulde fraktioner. Plaster i byggeaffald kan dog være stærkt nedbrudt af sollys.

De fire områder er repræsenteret i projektets følgegruppe ved henholdsvis Stena A/S, LEGO System A/S, Amager Ressource Center og Aage Vestergaard Larsen A/S. I forbindelse med bevillingen til PolySort PLUS er også Københavns kommune blevet en del af følgegruppen.

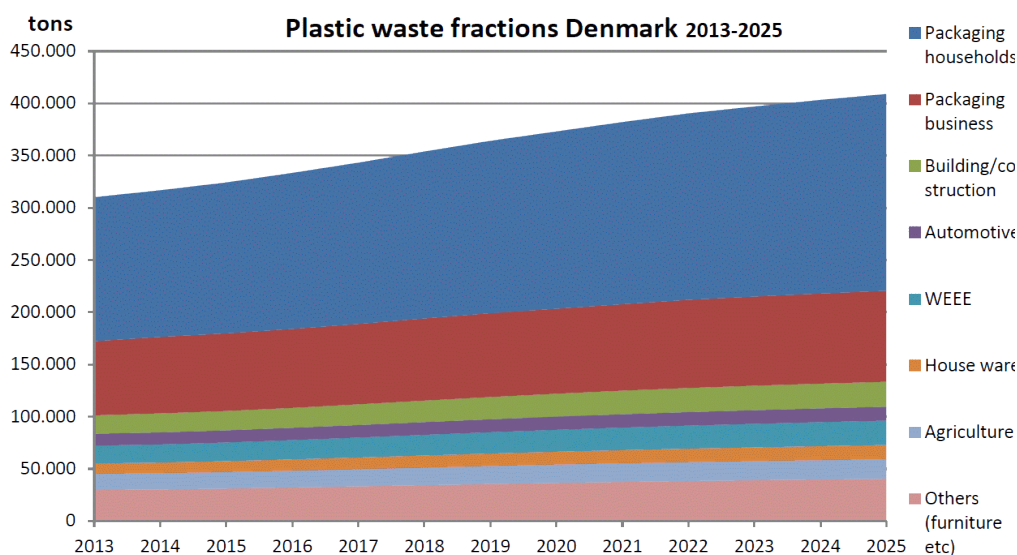


Figur 2: Fordeling af plasttyper i plastaffald afhængigt af anvendelsesområde. Data fra Plastic Zero Country Report [3].

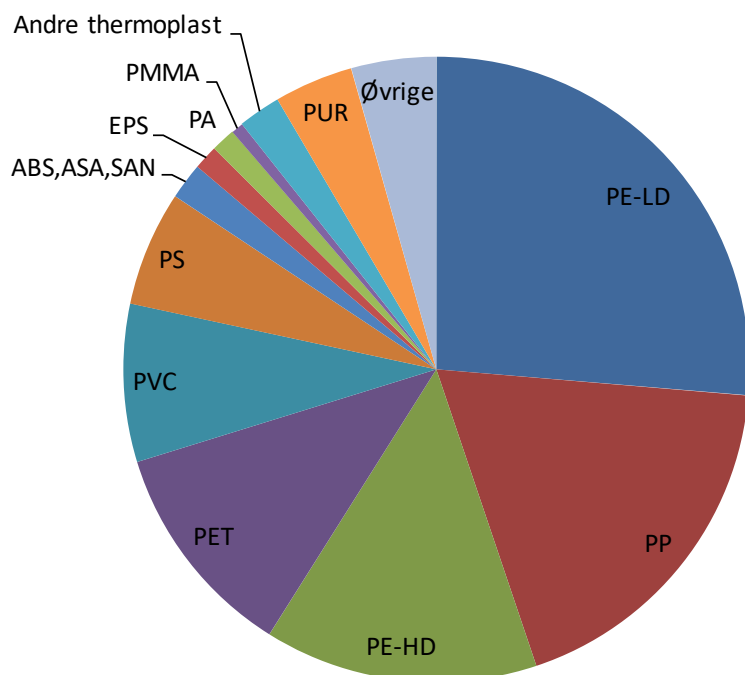
3.2.2 Plasttyper i Dansk plastaffald

Statistikker for fordeling af plasttyper i dansk affald er sporadiske, og ofte baseret på en analyse af en relativt lille affaldsmængde – og det kan derfor være svært at vide hvor repræsentativ den enkelte analyse er. Selvom der sandsynligvis er både forskel på land og by og på de forskellige geografiske områder i landet, er det dog rimeligt at antage at den overordnede fordeling er nogenlunde den samme i hele Danmark.

Figur 3 viser en beregning af den forventede mængde plastaffald i Danmark, fordelt på forskellige kilder. Denne figur, sammen med figur 4 på næste side, giver tilsammen et ganske godt billede af, hvad det er for plasttyper man finder i dansk plastaffald – og hvor det kommer fra.



Figur 3: Forventet fordeling af kilder til plastaffald efter anvendelse og branche [4].



Figur 4: Fordeling af plasttyper i dansk affald år 2012 [5]. Man ser at plasttyperne fra gruppe 1-6 udgør omkring 86%, samt at ABS, PA, PMMA og andre termoplaster ligger på omkring 6%. PUR og "øvrige" kan næppe genanvendes. EPS er "flamingo" eller "expanded Polystyrene" (PS).

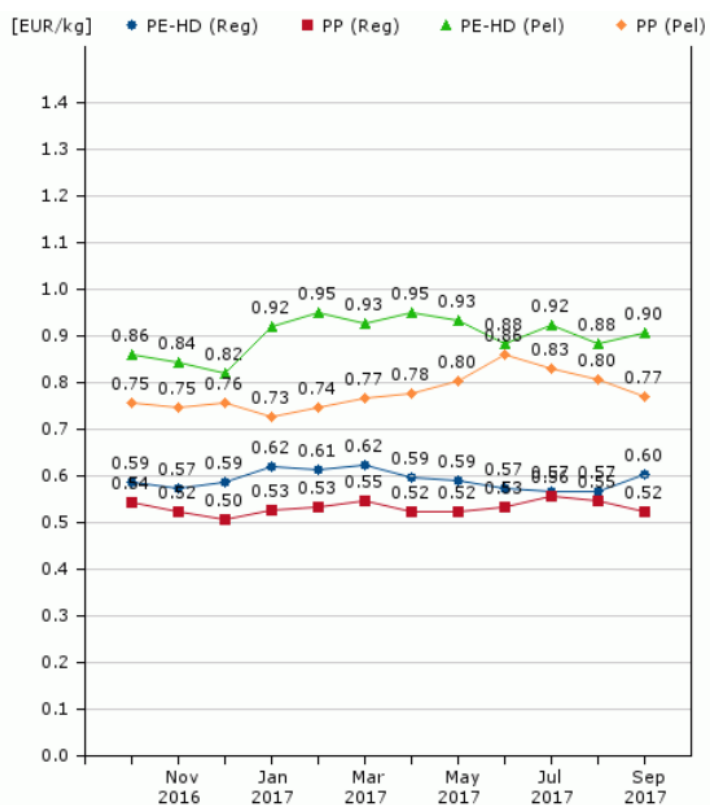
3.3 Priser på genbrugsplast

Prisen på genbrugsplast afhænger af markedet. Det betyder at prisen er næsten direkte forbundet med prisen på den tilsvarende ny-vare og at priserne i øvrigt følger de almindelige konjunkturer og især olieprisen.

Som det fremgår af figur 5, ligger prisen på genbrugt (dvs. sorteret, vasket og findelt plastaffald) materiale på omkring 70% af prisen på ny-varer ("virgin material"). Dette er naturligvis under forudsætning af, at kvaliteten af det genbrugte materiale er god – specielt at renheden er høj.

For nogle plasttyper har priserne været faldende og for andre har de været stigende gennem de sidste 12-13 måneder. Det er dog ikke noget der for alvor ændrer på rækkefølgen mellem de billigste (LDPE og PP) og dyreste (PBT, PC og PA 6.6). Således koster en regranuleret nylon (PA 6.6) 2,5 gange så meget som regranuleret LDPE.

Det har ikke været muligt, og ligger nok også udenfor formålet med PolySort projektet, at undersøge prisudviklingen indenfor de forskellige "varebetegnelser" som genbrugsplast sælges under. Den samme plasttype sælges under forskellige betegnelser afhængigt af graden af oparbejdning. Det kan f.eks. være sammenpresset (i "baller") usorteret plastaffald, flager af sorteret plast eller regranuleret plast (klar til brug) der er til højeste niveau af oparbejdning og som kan sammenlignes direkte med det granulat som ny plast ("virgin material") leveres som. For hver trin på denne oparbejdningssstige, stiger prisen fra et negativt niveau (der kan være politisk bestemt) til en pris der, som nævnt, er omkring 70% af prisen på en tilsvarende nyvare. Der er flere led i denne oparbejdningssstige som ikke er repræsenteret i Danmark, specielt når det gælder plastaffald fra husholdninger. Indenfor erhvervsaffald, kan Aage Vestergaard Larsen A/S klare de fleste trin til oparbejdning.



Figur 5: Eksempel på prisudviklingen indenfor genbrugte (regenereret, Reg) og nye plastmaterialer (granulat eller "pellets", Pel) for plasttyperne polypropylen (PP) og polyethylen (PE-HD) i perioden fra oktober 2016 til september 2017 (fra www.plasticker.de).

I den business case for PolySort maskinen der er beskrevet i afsnit 7, indgår også en tabel over priser på forskellige typer genbrugsplast. I denne tabel fokuseres på sorteret sammenpresset plastaffald, der derfor kun ligger på omkring den halve pris sammenlignet med regranuleret plast (som f.eks. anvendes i figur 5). Generelt er priserne også lidt højere for klar plast og sort plast, sammenlignet med plast i "blandede farver".

4. Identifikation og sortering af plastaffald

Plast kan identificeres og sorteres vha. lys (elektromagnetisk stråling). Én metode anvender røntgenstråling til at identificere PVC, som med stor sikkerhed kan adskille PVC fra f.eks. PET. En anden metode er at anvende infrarødt lys, som gør det muligt at identificere flere forskellige plastmaterialer end ved metoder med røntgenstråling. Derudover forudsættes, i modsætning til røntgenstråling, ikke de samme sikkerhedsforanstaltninger for at eventuelt personale ikke skades af den elektromagnetiske stråling.

4.1 Sortering af plastaffald

Når man står overfor at skulle sortere en given mængde plastaffald, kan en række vidt forskellige metoder eller "strategier" anvendes. Affaldets sammensætning, størrelsen af de enkelte plaststykker, graden af tilsudsning, mængden af papir eller andre materialer samt en lang række andre forhold bestemmer hvilken metode man bør vælge.

Grundlæggende er der to meget forskellige tilgange til opgaven. Enten kan man sortere plaststykkerne et ad gangen i den størrelse de nu har – eller også kan man neddele affaldet i små ensartede stykker og sortere dem på én gang, eller i nogle store portioner.

Hvis det plastaffald man arbejder med allerede er neddelt i relativt små stykker, er det oplagt at vælge metode to. Omvendt er det klart en fordel, at anvende metode et hvis affaldet består af relativt få men store stykker (f.eks. havemøbler, fladskærmskabinetter og lignende). I virkelighedens verden er det dog sjældent så enkelt, idet meget plastaffald består af en blanding af små og store stykker – plus ofte også en del materiale der slet ikke er plast.

De to overordnede metoder kan, igen afhængigt af affaldets beskaffenhed, sorteres på forskellige måder. De vigtigste indenfor hver af de to metoder er kort listet herunder:

Metode 1: Kraftig neddeling og "batch" sortering.

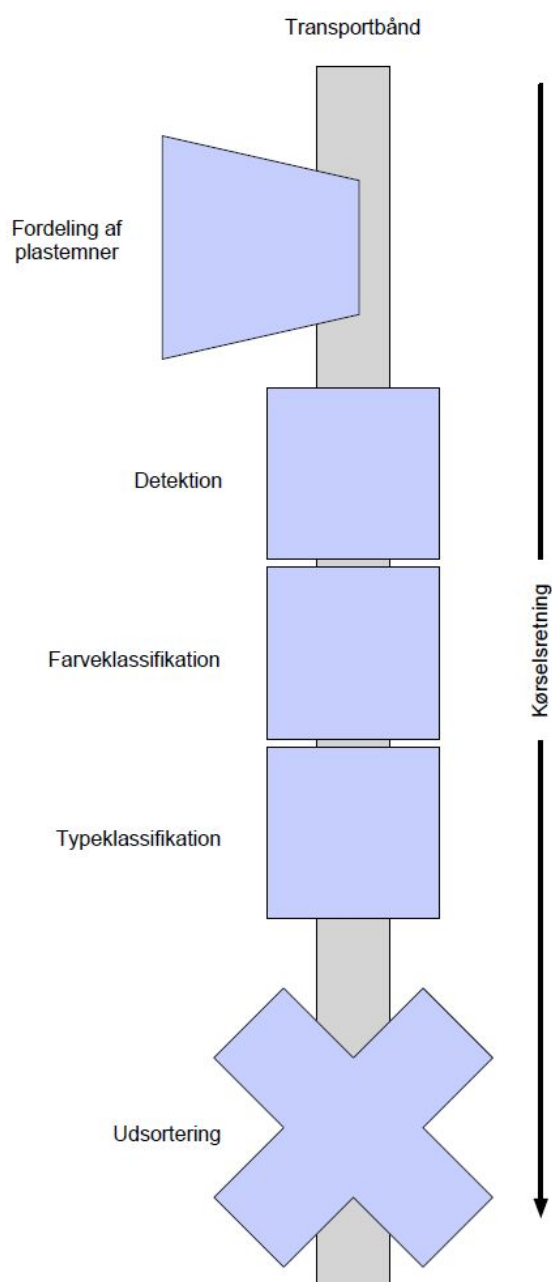
1. Kraftig neddeling: Shredder neddeling til flager typisk < 10 mm
2. Vask
3. Lufttørring til at fjerne folier, etiketter, mm.
4. "Batch" sortering:
 - Sortering efter densitet f.eks. ved neddypning i vand (PE og PP flyder ovenpå)
 - Centrifugering
 - Sortering efter varmeledning/varmekapacitet ("Laser Aided Separation")
 - Elektrostatisk sortering (plaststykker falder gennem et elektrisk felt)
 - Kemisk (én plasttype opløses selektivt)
 - Kemisk forbehandling skaber plasttyper der sidder fast på luftbobler ("froth separation")

Metode 2: Identifikation af hvert enkelt stykke og "in-line" sortering:

- Manuel sortering baseret på erfaring eller mærkning

- NIR sortering med håndholdt enhed (f.eks. Thermo Fisher microPHAZIR) eller X-ray (röntgen)
- Sortering med automatisk NIR-scanner anlæg:
 - Bredt transportbånd
 - Tryklufdysser (1 udsortering)
 - Robotarme (2 eller flere udsorteringer)
 - Smalt transportbånd
 - Aktuatorer (2 eller flere udsorteringer)

Metode 1 er generelt meget velegnet til plastaffald der kun indeholder nogle få polymertyper, og specielt hvis disse f.eks. har forskellig densitet.



Figur 6: Skematisk oversigt over PolySort-maskinen.

Metode 2 er nok den mest anvendte metode, og den spænder da også bredt fra rent manuel sortering (f.eks. ved at kigge på genbrugsmærkerne) til de meget store automatiske NIR-

scannere. I praksis anvendes ofte en kombination af flere metoder, idet mange anlæg har manuel for-sortering efterfulgt af forskellige metoder til at fjerne metal, papir, mm. fra affaldet - og endelig en NIR-scanner til udsortering af en bestemt type plast (dvs. 1 udsortering). Skal andre plasttyper også sorteres fra, kræver det endnu et eller flere gennemløb.

Der findes også forsøg på at anvende industrirobotter til at sortere plastaffald. Dette giver mulighed for at sortere mange typer plast fra ved et enkelt gennemløb. Dog er robotterne relativt dyre og hvis der f.eks. kommer flere ens plaststykker hurtigt efter hinanden på transportbåndet – vil robotten løbe tør for hænder og må lade de sidste stykker køre forbi.

I PolySort projektet er det derfor besluttet at bruge et smalt transportbånd, dels for at kunne udsortere rigtig mange typer plast på ét gennemløb – men også for at holde maskinens størrelse og pris nede. Dette princip har også sine fordele og ulemper. Af ulemper bør nævnes en lavere kapacitet (kg sorteret plast pr. time) og kravet om at alle plaststykker der er større end transportbåndets bredde skal neddeles.

Målet med PolySort- og PolySort Plus-projekterne er at kunne sortere plastaffald efter plasttype og farve. For at opnå dette er der blevet udviklet en maskine som kan (se figur 6):

- Fordele plastemnerne jævnt på et transportbånd.
- Detektere plastemnerne på båndet.
- Klassificere plastemnerne efter farve.
- Klassificere plastemnerne efter polymertype.
- Udsortere plastemnerne i kasser - på baggrund af farve- og typeklassifikation.

Oprindeligt var det også meningen, at PolySort maskinen skulle kunne identificere en række tilsætningsstoffer. Det kunne f.eks. være brandhæmmere, blødgørere, eller andre stoffer som man af den ene eller anden grund ønsker i en bunke for sig. I princippet vil PolySort maskinen kunne trænes op til at genkende nogle af disse tilsætningsstoffer, men af forskellige årsager har det ikke været muligt indenfor rammerne af dette projekt. Dels har projektet har rigeligt at gøre med at identificere de mest almindelige plasttyper (i alt 8 plasttyper er udvalgt) og dels har det været vanskeligt at skaffe plastaffald med et kendt og veldefineret indhold af tilsætningsstoffer. Der har med andre ord været mangel på passende træningsemner. Endelig er det muligt, at visse tilsætningsstoffer indeholder kemiske bindinger der absorberer lys udenfor det bølgelængdeområde som PolySort maskinen kan detektere.

4.2 Objektdetektering og farveanalyse

Dette afsnit vil fokusere på detektering, samt farve- og typeklassifikationen. Fordelingen og udsorteringen vil blive beskrevet i afsnit 5.

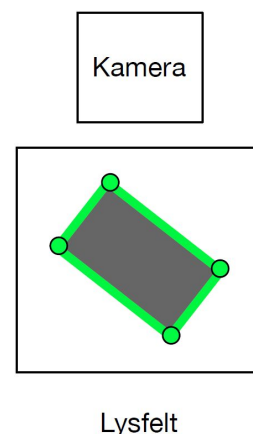
Detektering, klassifikationen og udsorteringen er alle opgaver som baserer sig på udstyr, der må synkroniseres med transportbåndets bevægelse for at kunne samkøre og koordinere data. Se figur 6 for en oversigt over systemets komponenter.

4.2.1 Synkronisering

Ved at holde øje med hvor meget båndet flytter sig er det muligt at måle hvor langt et givet plastemne har bevæget sig på transportbåndet og derved sørge for at optage billeder og aktivere udsorteringsmekanismen på de rette tidspunkter, se figur 7.

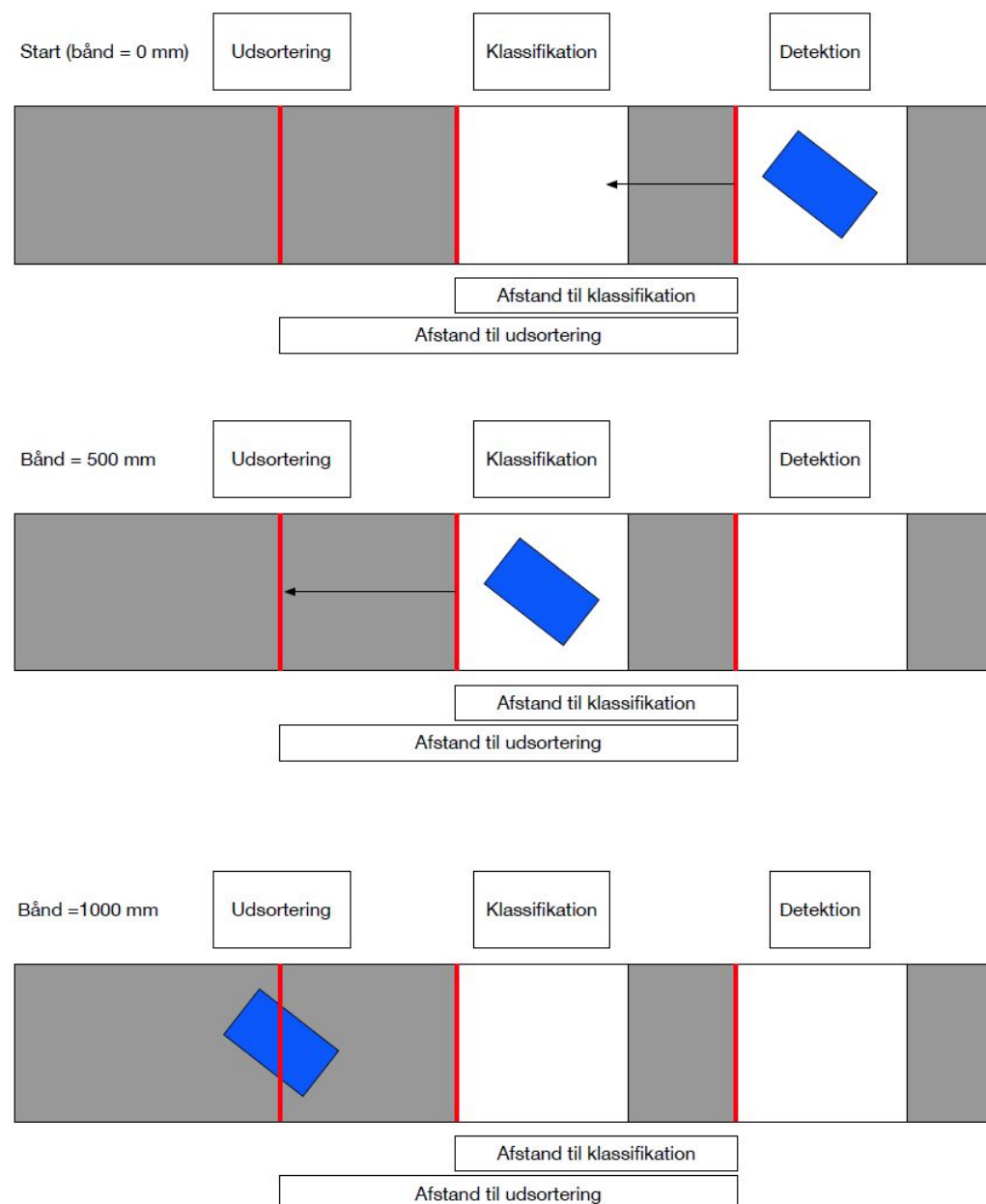
4.2.2 Detektering af plastemner

En udfordring ved detektering af plastemner der stammer fra affald er, at man - i modsætning til mange industrielle machine-vision-opgaver - er udsat for at emnerne kan have en vilkårlig farve og form, herunder samme farve som det transportbånd som plastemner befinder sig på.



Polygon der afgrænser plaststykket i lysfeltet.

I dette projekt er det blevet valgt at detektere plastemnerne via et kamera (gråtone eller farve). For at opnå at også emner med samme farve som båndet skulle kunne detekteres, blev det valgt at bruge et hvidt semi-transparent transportbånd og en lyskilde under båndet, således at emner ville stå i silhuet ift. det hvide bånd. Således er det muligt at opnå en kontrastforskel mellem emnet og båndet - hvorved opgaven med at detektere er blevet mindre kompliceret. Via en computer-vision algoritme analyseres billedet af plastemnet indenfor lysfeltet (se tegning i margin), og resultatet er en polygon som afgrænser plastemnet og som er positioneret ift. båndet.



Figur 7: Synkronisering af transportbånd og detektering, klassifikation samt udsortering. Transportbåndets bevægelse afgør hvornår der skal tages billeder til klassifikation og hvornår udsorteringsmekanismen skal aktiveres.

4.2.3 Farveanalyse

Er et turkis stykke plast blått eller grønt? Det afgørende ifht. sortering af plast efter farve, med henblik på omsmelting og genanvendelse, er at de farvesorterede stykker plast minder mest muligt om den eller de idealfarver man har valgt at sortere efter.

Farveanalysen udføres ved at beregne plastemnets gennemsnitsfarve og varians - dvs. ved at måle farven af hver pixel i et farvebillede af plastemnet. Hvis variansen er høj, er det et udtryk for at plasten er flerfarvet og omvendt. Gennemsnitsfarven klassificeres til at være den farve, i en mængde af farver, hvor farveforskellen er mindst.

Der er i projektet blevet kompenseret for påvirkningen af lys og kamera/sensor på målingen af farver.

At beregne farveforskellen imellem to farver, er ikke oplagt i det typiske RGB-format, som er det de fleste farvekameraer leverer. Hvis man eksempelvis vil beregne om rød eller blå minder mest om grøn, vil anvendelsen af et almindeligt euklidisk afstandsmål resultere i at de to farver måles til at være lige tæt på grøn. Men da rød og grøn er komplementærfarver vil de fleste opfatte grøn som værende tættere på blå end på rød.

Benytter man derimod et andet farverum kaldet LAB kan man opnå et afstandsmål som i højere grad afspejler den menneskelige opfattelse af farver og deres lighed. LAB-farverummet har en lyshedskomponent L, og to farvekomponenter A og B, hvor A går fra grøn til rød og B fra blå til gul. Da LAB-rummet er bygget op omkring komplementærfarver er det velegnet til at beregne farveforskellen. Afstandsmålet er senere blevet videreudviklet fra det oprindelige euklidiske mål til det der kaldes CIEDE2000 [11], som har en række korrektioner som gør det mere tro mod det menneskelige øje.

4.3 Identifikation af plastmaterialer med infrarødt lys

Plast kan identificeres og sorteres vha. lys (elektromagnetisk stråling). Én metode anvender røntgenstråling til at identificere PVC, som med stor sikkerhed kan adskille PVC fra f.eks. PET. En anden metode er at anvende infrarødt lys, som gør det muligt at identificere flere forskellige plastmaterialer end ved metoder med røntgenstråling. Derudover forudsættes, i modsætning til røntgenstråling, ikke de samme sikkerhedsforanstaltninger for at eventuelt personale ikke skades af den elektromagnetiske stråling.

Der benyttes generelt to metoder til at identificere plastmaterialer vha. infrarødt lys, jf. [7]. Den ene metode måler mængden af infrarødt lys der kan passere igennem et materiale (transmissionsspektroskopi), mens den anden metode måler mængden af infrarødt lys der reflekteres af et materiale (reflektionsspektroskopi).

Årsagen til at organiske stoffer, herunder plastmaterialer, kan identificeres vha. infrarødt lys er at hvert organisk materiale har sin egen kemiske signatur i form af et spektrum der for hver bølgelængde angiver hvor meget lys der transmitteres/reflekteres.

Transmissionsspektroskopi er som udgangspunkt ikke velegnet til identifikation af materialer i plastaffald, da emnerne enten vil være for tykke eller for ugenomsigtige til at give et brugbart transmissionsspektrum [7].

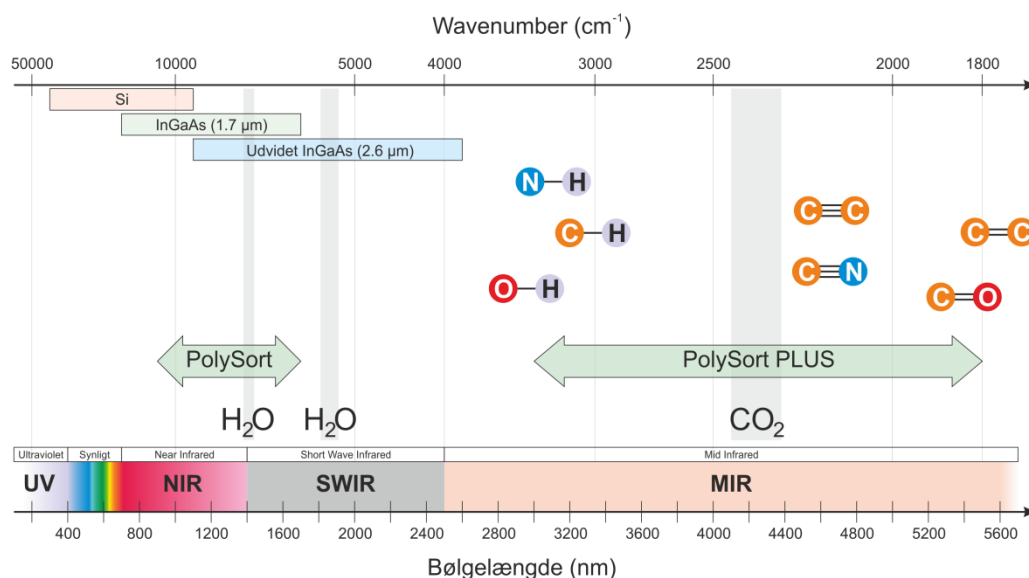
Reflektionsspektra for plast domineres af resonansfrekvenser, f.eks. for C-H og O-H bindinger, samt overtoner og kombinationer af disse frekvenser. Overtoner sker ved heltalsmultipla af fundamentalfrekvenserne. Kombinationer sker ved summen af to fundamentalfrekvenser. De fundamentale resonansfrekvenser for C-H ligger omkring 2960 cm^{-1} (3378 nm) for stræk (vibrationer langs bindingen), og ved 1460 cm^{-1} (6849 nm) for bøjninger. Overtoner for C-H stræk vil således være at finde nær $2 \cdot 2960\text{ cm}^{-1} = 5920\text{ cm}^{-1}$ (1689 nm), samt $3 \cdot 2960\text{ cm}^{-1} = 8880\text{ cm}^{-1}$ (1126 nm). Mens et kombinationsbånd vil således være at finde nær $2960 + 1460\text{ cm}^{-1} = 4420\text{ cm}^{-1}$ (2262 nm). Se tabel 2 nedenfor samt figur 8 på næste side. Andre kilder nævner at overtoner forefindes mellem 1600 og 1800 nm samt mellem 1150 og 1230 nm [7].

Tabel 2: Fundamentale resonansfrekvenser, og disses overtoner, for en række udvalgte kemiske bindinger.

Bindingstype	Wave number	Bølgelængde (nm)
CH-stræk (fundamental)	2960	3378
C-H bøj (fundamental)	1460	6849
C-H stræk (overtone 1)	2x2960 = 5920	1689
C-H stræk (overtone 2)	3x2960 = 8880	1126
C-H stræk + C-H bøj kombination	2960 + 1460 = 4420	2262

I litteraturen finder man fortrinsvist eksempler på sortering af de fem/seks første plastmaterialer i SPIs klassifikationssystem: PET, HDPE/LDPE, PVC, PP og PS (se afsnit 1.1). Det kan generelt være svært at skelne HDPE (høj densitet PE) fra LDPE (lav densitet PE) eftersom der er store ligheder i den molekylære struktur [8] og det fører til tæt ved identiske reflektionsspektra. Figur 8 viser hvor de forskellige områder af det elektromagnetiske spektrum findes (også i forhold til synligt lys), og hvordan man omregner mellem bølgelængde og bølgenummer ("wave number"). Bemærk at de fundamentale kemiske absorbanser (se tabel 2) befinder sig i den "midterste del" af det infrarøde område (MIR) der normalt siges at starte ved en bølgelængde på 2500 nm. Figur 8 viser også, at der er to områder (lidt under 1400 nm og mellem 1820 og 1920 nm) hvor vand i atmosfæren absorberer kraftigt og det gør det upraktisk at anvende disse områder. På samme måde er der område i MIR (omkring 4200 nm) hvor kuldioxid (CO₂) i luften absorberer lyset. De bedste og stærkeste absorbanser findes man således i MIR området, men da sensorer i dette område (se også afsnit 4.2.1 herunder) er meget dyre og ydermere kræves køling med flydende nitrogen, er det normalt ikke en mulighed at bruge dette område til identifikation af plastaffald.

I øverste venstre hjørne af figur 8, ses de tre mest almindelige sensor-materialer til lysdetektion (omtales i digitale kameraer ofte som "semi-conductor charge-coupled devices" eller CCD), og de bølgelængde områder de fungerer i. Det ses at ingen af dem fungerer i det midterste infrarøde område (MIR), men at flere af dem fungerer i NIR-området.



Figur 8: De to forskellige kameraer (illustreret med de grønne pile) danner deres billeder pga. lys i hhv. NIR/SWIR området (900 til 1700 nm) og MIR området (3000 til 5500 nm). De omtrentlige placeringer for de forskellige typer af kemiske bindinger der absorberer lys i MIR området er også afbilledet i figuren. I øverste venstre hjørne af figuren ses de områder som de forskellige billeddannende halvledermaterialer fungerer i.

4.3.1 Billeddannelse (NIR)

For at kunne identificere plast vha. infrarøde spektraldata må der først dannes et billede af materialets refleksionsspektrum. De industrielt mest avancerede detektormaterialer til NIR-SWIR-detektion er InGaAs, ext-InGaAs og HgCdTe, jf. [9]:

- InGaAs - Indium-Gallium-Arsen
- ext-InGaAs - udvidet InGaAs
- HgCdTe - Kviksølv-Cadmium-Tellur

Til NIR-billeddannelse er InGaAs et af de mest anvendte detektormaterialer, InGaAs, reagerer ved stråling mellem 900 og 1700 nm. Udvidet InGaAs (ext-InGaAs), hvori der indgår en større andel indium, reagerer ved stråling mellem 900 og helt op til 2600 nm og kan således fange noget af SWIR-området, dog med forringet respons ved længere bølgelængder. HgCdTe finder bred anvendelse indenfor NIR-SWIR-billeddannelse, med en respons der typisk ligger i området 900-2500 nm - afhængig af den præcise kemiske sammensætning [9].

4.3.2 Billeddannelse (MIR)

En af de helt store udfordringer for plast sorterings anlæggene er sort plast. Teknisk set er udfordringen, at sort plast ikke kan plasttypebestemmes med gængse visuelle (VIS) og nærinfrarøde (NIR) sorteringssystemer, da sort plast er uigennemsigtigt i disse områder og derfor giver meget lidt signal at arbejde med. For at gøre plasten sort, tilsættes typisk kul-partikler (carbon black). Kul er stærkt absorberende i VIS og meget absorberende i NIR, men næsten gennemsigtigt i det midt infrarøde (MIR) område. Sort plast kan derfor typebestemmes i MIR. IRSee lavet har en ny type MIR sensor. Den kan implementeres som en MIR spektral linjeskanner (Push Broom Scanner). Da den opererer i MIR området kan det også se spektret af sort plast og dermed også typebestemme sort plastaffald. Teknikken fungerer ved at opkonvertere/omdanne MIR lys til visuelt lys. Dermed kan ukølede og relativt billige silicium detektorer (se også figur 8) anvendes. Konkurrerende MIR sensorer skal, i 3-5 µm området, køles ned for at have en nogenlunde følsomhed - uden dog at komme i nærheden af hvad IRSee's tekniks følsomhed er ved stuetemperatur. Grundet kølingen er disse sensorer mere komplicerede og meget dyrere (også i drift) end IRSee's sensor.

4.4 Spektralanalyse

Der skelnes mellem to tilgange til spektral klassifikation. Enten undersøges kun få bølgelængder, hvorved der tales om multispektral klassifikation, eller også undersøges mange hundrede bølgelængder, hvorved der tales om hyperspektral klassifikation.

4.4.1 Multispektralanalyse

Masoumi et al., 2012 [10] præsenterer en fuldautomatisk metode til sortering af fem plasttyper, PET, HDPE, PVC, PP og PS, ved brug af NIR. Ved hjælp af kalibrering af systemets "to-filter"-system, kan plast klassificeres ved at måle forholdene mellem kun to af spektrets bølgelængder.

Nogle kilder argumenterer dog mod multispektral klassifikation hvor det fremhæves at klassifikation på baggrund af enkelte bølgelængder kan være problematisk, hvis ikke decideret umuligt, idet NIR-båndene overlapper, jf. s. 700 i Alam et al., 2007 [8]. Man må derfor medtage flere bølgelængder, hvorved man nærmer sig hyperspektral klassifikation hvor multivariant klassifikation er nødvendigt.

4.4.2 Hyperspektralanalyse

Alam et al., 1994 [7] benytter en avanceret metode til mønstergenkendelse af spektra fra NIR, i erkendelse af at disse spektra typisk har mange og store overlap, og derfor kræver særlig opmærksomhed.

Seks typer af plast, PET, HDPE, PVC, LDPE, PP og PS, klassificeres ved hjælp af NIR og kunstigt neuralt netværk. Eksperimentel evaluering af deres løsning viser en høj succesrate, i visse tilfælde over 98% korrekt klassificering.

Forbehandling af data (f.eks. udglatning eller normalisering) har vist sig at være en væsentlig faktor for at opnå en høj klassifikationsrate, jf. Alam et al., 1994 [7].

4.5 Spektralklassifikation via machine-learning

I PolySort-projektet blev det valgt at bruge hyperspektrale kameraer, hvor både SWIR-kamera og MWIR-kamera leverer et billede af hvert objekt hvor hver spatiale pixel ikke bare er en enkelt gråtone eller tre farve-værdier (RGB), men derimod er et spektrum - hhv. et SWIR-spektrum eller et MWIR-spektrum. Hvert spektrum består af mange hundrede intensitetsmålinger for et interval i SWIR- og MWIR-området.

For at afgøre om et SWIR- eller et MWIR-billede er et billede af den ene eller den anden type plast benyttes et machine-learning-baseret klassifikationssystem.

4.5.1 Forbehandling

For at forbedre klassifikationen bliver de rå spektre forbehandlet. Støj frafiltreres, og der foretages en geometrisk genopretning for at modvirke optiske effekter af den hyperspektrale billeddannelse. I tilfældet med MWIR-spektre må der kompenseres for at en del af det relevante MWIR-spektrum reagerer på CO₂-indholdet i luften foran kameraet.

4.5.2 Klassifikation

Spektralklassifikationen bruger metoden PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis) til at klassificere hvert plastemne ud fra de hyperspektrale billeder. Metoden bruger en mængde optagelser som træningsdata til at finde lineære transformationer af spektralværdierne med henblik på at bestemme plastiktypen. PLS returnerer et mål for hvor sikker metoden er, med hensyn til hver af de typer den er trænet til. Klassifikationen kan afgøres ved at vælge den type som har den højeste værdi og ved at afgøre en minimumsværdi for klassifikationen.

For at få det størst mulige datagrundlag for evalueringen er der brugt 5-fold krydsvalidering. Her bliver datasættet delt op i fem tilfældigt udvalgte mindre datasæt som alle har eksempler fra alle klasserne, hvorefter de skiftevis bliver brugt til at evaluere systemet mens de resterende fire sæt bliver brugt til træning.

5. Opbygning af PolySort maskinen

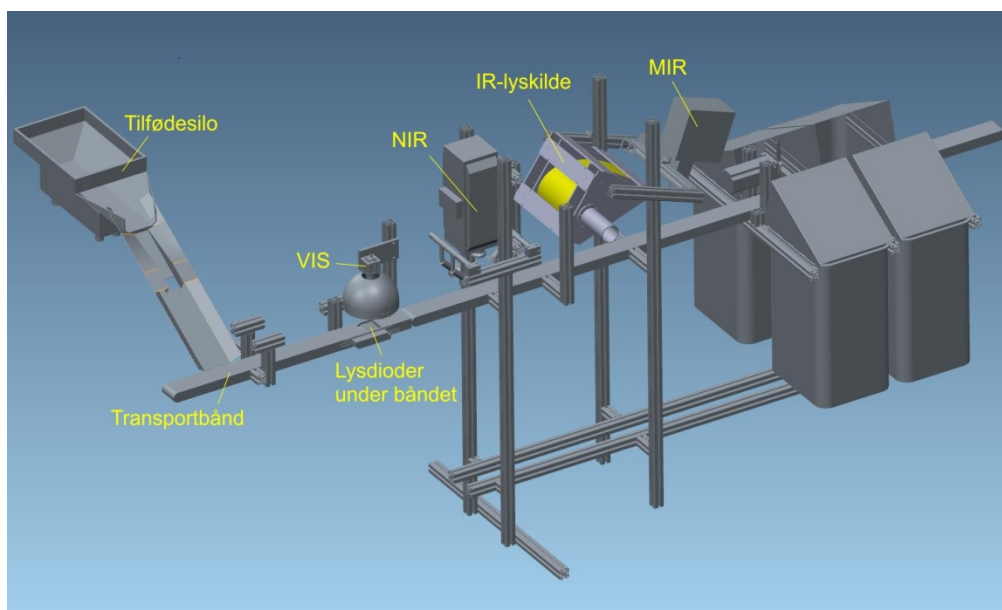
Maskinen der er opbygget i PolySort projekterne, ligner på nogle punkter de kommercielt tilgængelige NIR-scanner – men på andre punkter er PolySort maskinen fundamentalt anderledes.

5.1 Transport af plaststykker

For at kunne opnå en god sortering, kræves det at det mekaniske system der transporterer plastaffaldet fungerer hensigtsmæssigt. For en optisk baseret sortering, betyder det at:

- Plastaffaldet er neddelte således at de enkelte stykker fysisk kan være på transportbåndet
- Stykkerne ligger i ét lag (altså IKKE ovenpå hinanden), således at de optiske sensorer (kameraer) kan se stykkerne
- Plaststykkerne er rimeligt rene og fri for f.eks. papirlabels og andre ting som slet ikke er plast
- Afstanden mellem plaststykkerne er stor nok til at maskinen kan skubbe et givet stykke af transportbåndet – uden samtidig at ramme nabo-stykkerne

For mange typer plastaffald, f.eks. affald fra plastproducerende virksomheder eller fra elektronikskrot, er affaldet relativt rent og uden forstyrrende fremmedstoffer (papir, metal, olie og fedt, etc.). For plastaffald fra husholdninger vil en eller anden form for vask af affaldet være påkrævet. En neddeling af husholdningsaffald vil også have den fordel, at flasker og dunke vil blive åbnet ved neddelingen, således at evt. indhold vil løbe ud og derfor lettere vil kunne fjernes under vask. Ulempen ved neddeling kan være, at nogle stykker bliver så små at de ikke kan identificeres – eller at mange små stykker vil nedsætte kapaciteten af sorteringsmaskinen.



Figur 9: Oversigtstegning af sorteringsmaskinen. På tegningen er indføringssystemet (tilfødesilo med tilhørende rende) og transportbåndet, samt både lyskilder og kameraer tydeligt markeret.

Grundlæggende ligner PolySort maskinen de kommercielle NIR-scannere der allerede findes på markedet. Den består af en "indføringsmekanisme", et transportbånd, nogle sensorer og nogle aktuatorer (se næste afsnit). Der er dog nogle store og væsentlig forskelle, både omkring opbygningen og omkring selve sorteringsprincippet.

PolySort maskinen kræver at plaststykkerne ligger ét og ét på transportbåndet der også er relativt smalt. De kommercielle NIR-scannere har typisk et ret bredt transportbånd hvor plaststykkerne ligger jævnt fordelt udover båndet. Denne forskel betyder, at PolySort maskinen kan skubbe plaststykker af båndet når de er udfør en bestemt position (spand), hvor NIR-scannerne altid først "gør noget" når stykkerne når hen til enden af transportbåndet. Denne forskel betyder at PolySort maskinen kan f.eks. identificere og sortere 10 forskellige plasttyper ved ét gennemløb (f.eks. med 5 spande på hver side af transportbåndet). De kommercielle NIR-scannere vil kun sortere en type – eller en gruppe af typer – fra, og det resterende plastaffald vil derfor stadig være usorteret. Ønsker man en fuldstændig udsortering i f.eks. 10 plasttyper, kræver det at affaldet sendes igennem NIR-scanneren 10 gange efter hinanden (og at scanneren programmeres om imellem hvert gennemløb). Ulempen ved at bruge et smalt transportbånd og mange udsorteringer, er at kapaciteten umiddelbart virker væsentlig mindre – og i nogen tilfælde også er mindre. Dette afhænger dog af, hvordan man måler kapaciteten for maskinerne. Opgøres kapaciteten som det antal kilo plastaffald der har "været igennem maskinen" på en time, så vil NIR-scannerne altid have den højeste kapacitet (typisk omkring 1000 kg pr. time). Måler man derimod hvor meget plastaffald der er sorteret fra, vil PolySort maskinen være mere konkurrencedygtig – specielt hvis man ønsker at udsortere mange forskellige fraktioner (farver eller typer).

5.1.1 Indføringssystem

Opstillingen indeholder et smalt transportbånd samt en række aktuatorer der kan aktiveres når et plaststykke skal skubbes af båndet. Det hele er styret af en PLC (Programmable Logic Controller), dvs. en programmerbar styreboks der både modtager signaler fra sensorerne og aktiverer aktuatorerne på det rigtige tidspunkt (se afsnit 5.4).

Efter en del forsøg på at placere plastaffaldet fornuftigt på transportbåndet, blev det besluttet at investere i en vibratorføder eller rysterende. En række leverandører blev besøgt, og deres udstyr evalueret. Indføringssystemer baseret på vibration er velkendt i produktionsindustrien, og bruges typisk til at orientere og fremføre smådele f.eks. i forbindelse med automatisk montage eller pakning. Den store forskel på montage eller pakning i en produktion og sortering af plastaffald er, at de enkelte dele som skal håndteres er vidt forskellige. Der er både lette og tunge plaststykker, der er flade stykker, komplekse stykker, folier og massive stykker samt alt derimellem.

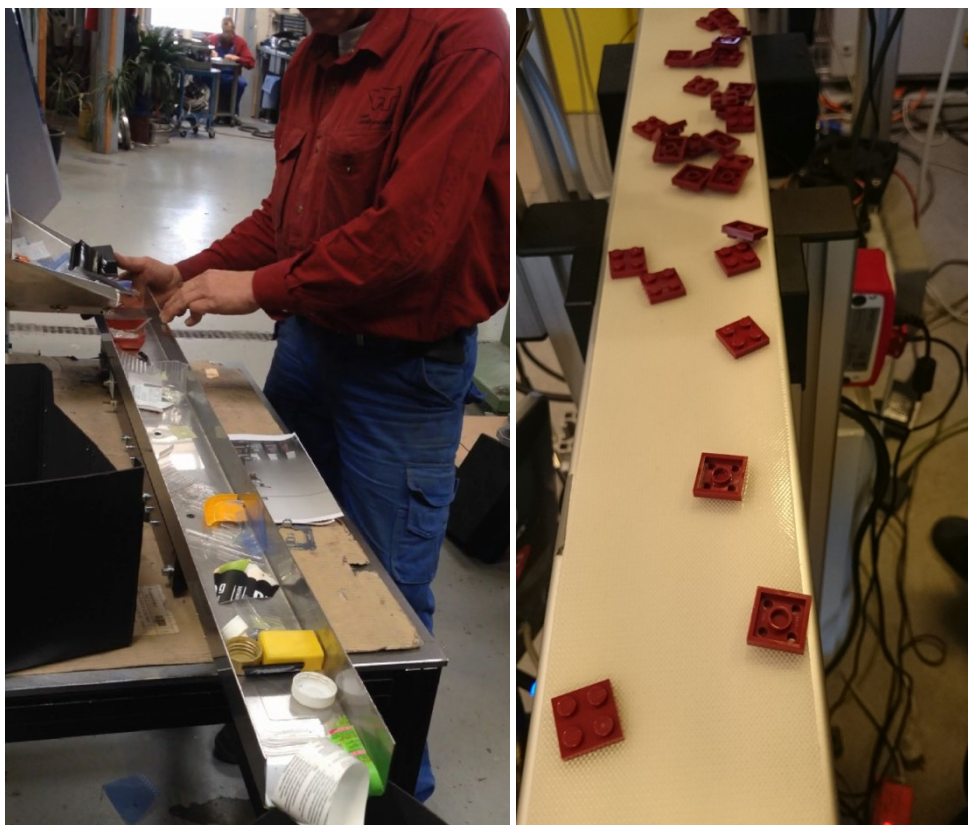
Udviklingen af et dedikeret indføringssystem ligger en smule uden for projektets formål, omvendt vil manuel indføring af plastaffald gøre maskinens arbejde urealistisk let – idet en person vil kunne sikre at alle stykkerne ligger på en række, at ingen stykker ligger ovenpå hinanden samt at der ikke er stor forskel på afstanden mellem stykkerne. Som et kompromis blev der til projektet indkøbt en såkaldt tilfødesilo fra virksomheden Vitek. Tilfødesiloen er et kammer (eller silo om man vil) der er bygget sammen med en vibratorføder. Når en mængde plastaffald placeres i siloen, vil det blive ført fremad af vibrationerne. Stykkerne falder derefter ned af en slidske med et hul på 60 x 60 mm. De stykker der er for store til at falde igennem hullet, bliver på den måde sorteret fra allerede inden de havner på transportbåndet. Disse stykker må derefter neddeles yderligere inden de kan blive ført tilbage til siloen.

Slidsken, der er monteret direkte på tilfødesiloen, kan også ses på oversigttegningen i figur 9.

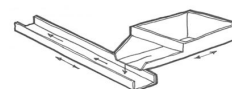
Systemet opfører sig rimeligt, idet de fleste blandinger af plastaffald fordeles ganske pænt på transportbåndet. Kommer der for mange stykker ned af slidsken på samme tid, vil de glide hen over hullet og dermed ikke forstyrre sorteringen. Kun hvis siloen fyldes med store mængder af

meget små plaststykker, kan indføringssystemet ikke levere det ønskede. En række forsøg med små LEGO klodser, venligst doneret af følgegruppedeltageren LEGO, gav problemer. Klodserne er relativt massive og faldt ned på transportbåndet i for store mængder til at hver enkelt klods kunne detekteres – og derfor kunne de heller ikke sorteres.

I praksis kunne dette problem nok løses ved at sortere emnerne efter størrelse med en sigte eller lignende. En anden mulighed vil være at sikre, f.eks. med et andet transportbånd der fører affald op til siloen, at mængden af plastaffald der hældes ned i siloen ikke er for stort.



Figur 10: Forsøg med rysterender hos leverandøren Vitek (venstre foto) og ved PolySort maskinen (højre foto). Venstre foto viser (hvor operatøren har sine hænder) en såkaldt tilfødesilo og derefter følger en vibratorføder (rysterende). Højre foto er et eksempel på at for mange små emner i tilfødesiloen kan give problemer.

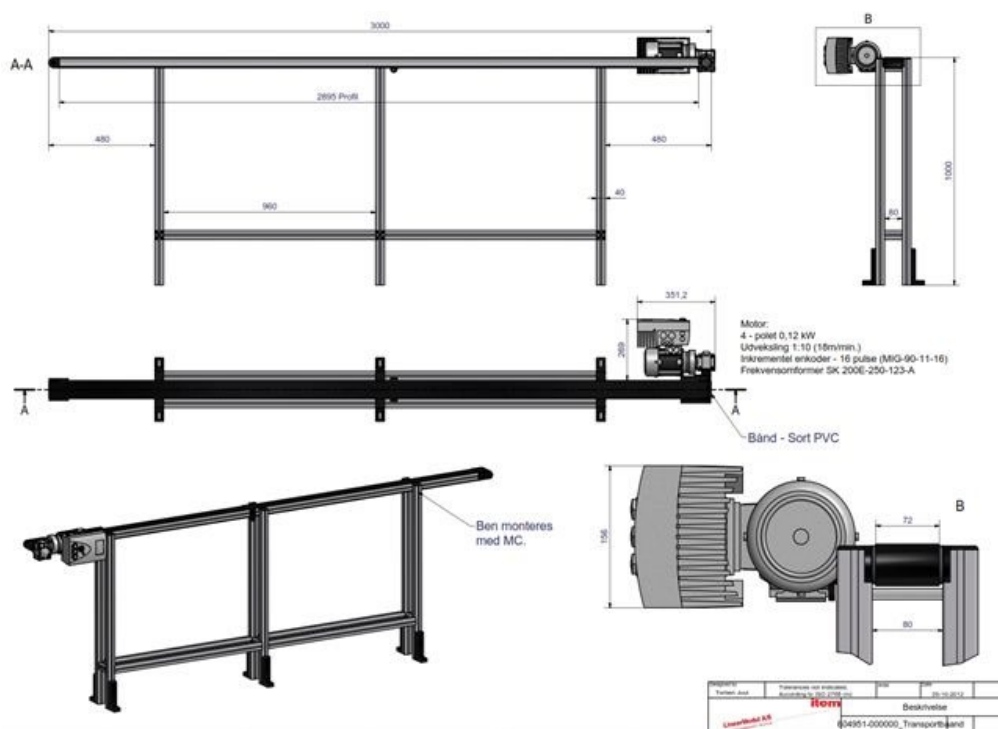


Eksempel på to rysterender der er koblet sammen.

Som det bl.a. fremgår af figur 9, vil emnerne i tilfødesiloen blive ført ned på transportbåndet via en sliske med et hul i. Tilfødesiloen skal dog ikke fyldes helt op, da det kan føre til at alt for mange emner lander på transportbåndet. På højre foto i figur 10 er det tydeligt, at der i starten (transportbåndet kører mod kameraet) er en god afstand mellem LEGO klodserne – men senere ligger klodserne for tæt og i nogle tilfælde også ovenpå hinanden. Dette vil gøre det umuligt at udsortere f.eks. klodser med forskellige farver eller polymertype. Problemet er dog størst for relativt små og massive emner, som f.eks. LEGO klodser, og langt mindre for plastaffald fra emballage og lignende (lettere og større stykker).

5.1.2 Transportbånd

Efter en del søgen i starten af projektet, blev et transportbånd der lever op til de krav der er opstillet identificeret. Båndets hastighed kan reguleres, den maksimale hastighed er 0,75 m/s, og både motor og frekvensomformer kan fjernstyres fra PLC'en. Båndet er smalt (80 mm) og fremtræder "gummiagtigt". Det er muligt at købe mere eller mindre glatte bånd til maskinen, samt bånd med perforeringer og i mange forskellige materialer. Et nyt bånd koster omkring 2.000 kr. afhængig af udformningen.



Figur 11: Teknisk tegning af det transportbånd der er indkøbt til opstillingen. Bemærk at bredden af transportbåndet er relativt smal (80 mm).

Som beskrevet i afsnit 4.2, er det valgt at anvende et semi-transparentt hvidt transportbånd. Båndet er relativt "gummiagtigt" og det giver nogle gange problemer når plaststykker med skarpe kanter skal skubbes af båndet. Friktionen bliver ganske høj og i nogen tilfælde kan aktuatorerne ikke presse plaststykkerne af. Specielt hvis stykkerne både har skarpe kanter og er relativt flade. Hvis et stykke ikke skubbes af båndet, vil det køre videre og til sidst falde ned i kassen forenden af båndet – der rummer de emner som ikke er identificeret. Er der for mange emner i denne kasse der ikke er udsorteret, kan man evt. sende indholdet igennem systemet en gang til.

Motoren der trækker transportbåndet rundt (se nederste højre hjørne i figur 11) indeholder en encoder. Encoderen er så fintfølede, at den sender et signal til styreboksen flere gange for hver millimeter båndet kører frem. Disse signaler anvendes til at holde styr på transportbåndets hastighed og et givet emnes placering – hvad der er meget vigtigt i forhold til at identificere, klassificere og udsortere emnerne.

5.2 Sensorer

Sorteringsmaskinen anvender en række sensorer til at detektere og klassificere det plastaffald der kommer forbi på transportbåndet. Alle sensorerne er baseret på lys, og kan derfor siges at være kameraer (se næste afsnit) – selvom flere af dem bestemt ikke er traditionelle kameraer.

5.2.1 VIS

Som beskrevet i afsnit 4.2 anvendes der et almindeligt (synligt lys, VIS) kamera til objekt detektion og farveanalyse – specifikt er der tale om et farvekamera (RGB). For at opnå billeder uden for mange skygger, og uden for mange refleksioner, som kan være et problem for visse computer vision-systemer, belyses farvekameraets synsfelt af en lyskuppel hvor et antal lysdioder belyser en diffust reflekterende kuppel.

Der er blevet kompenseret for lyskilden og kameraets farvegengivelse ved at kalibrere kameraets farvefortolkning – så "rød" i den virkelige verden også bliver til "rød" i den digitale fortolkning.

5.2.2 NIR

For at kunne måle plastemnernes refleksionsspektrum i NIR/SWIR-området (som beskrevet i afsnit 4.3) er der blevet anvendt et hyperspektralt NIR/SWIR-kamera. Et hyperspektralt kamera måler ikke en-tre bølgelængder som et vanligt gråtone- eller farvekamera, men måler i stedet mange bølgelængder på samme tid. For hver pixel i et billede leverer det hyperspektrale kamera et digitalt spektrum fordelt på 256 bølgelængder i InGaAs-området fra 900 nm til 1700 nm. Kameraet fungerer som et line-scan kamera.

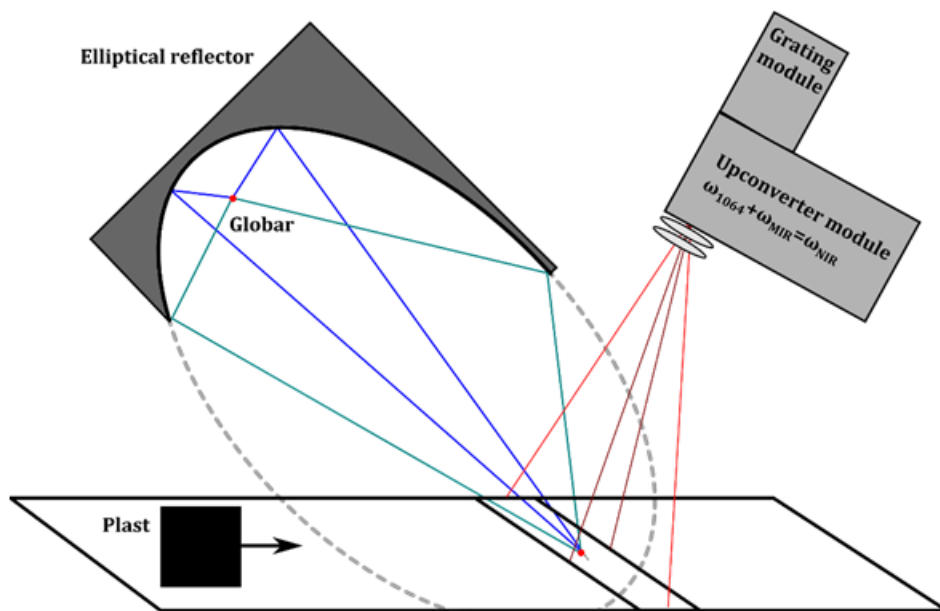
En udfordring ved anvendelsen af hyperspektrale NIR/SWIR-kameraer er at de ikke er særligt hurtige ifht. kameraer der arbejder med færre bølgelængder – hvor et almindeligt line-scan farvekamera kan optage tusinder af linier i sekundet kan et hyperspektralt kamera kun optage hundreder af linier i sekundet. Det er derfor nogle væsentligt grovere billeder man må arbejde med hvorfor det kan være svært at kalibrere de forskellige sensors fysiske placering ifht. hinanden.

Eftersom det hyperspektrale kamera kan differentiere mellem de forskellige bølgelængder er der, ligesom i tilfældet med kameraet til synligt lys, blot behov for en bred-spektret, uniform/flad belysning. I dette tilfælde blev der anvendt en belysning med 2x2 halogen-lyskilder monteret i en 45° vinkel til båndet – igen for at undgå skygger. Hver halogen-lyskilde var på 20 W med en 36° strålevinkel.

En udfordring ved målingen af NIR/SWIR-spektra er at kompensere dels for den væsentlige baggrundsstøj som man finder ifm. InGaAs-sensorer, dels at kompensere for lyskildens spektrum – dvs. kameraets og lyskildens "hvidbalance": I forbindelse med vanligt lys kan man benytte forhåndenværende "hvide" materialer, men ifm. NIR/SWIR-spektra kan man med fordel anvende kalibreringsemner af optisk teflon (PTFE).

5.2.3 MIR

IRSee udvikler MIR sensorer. Ved PolySort Plus projektet begyndelse havde IRSee en MIR spektrometer prototype der kunne bruges til punkt målinger. Under projektet udviklede og fremstillede IRSee en MIR spektral-linjeskanner prototype og en dertil dedikeret lyskilde (via et par iterationer).

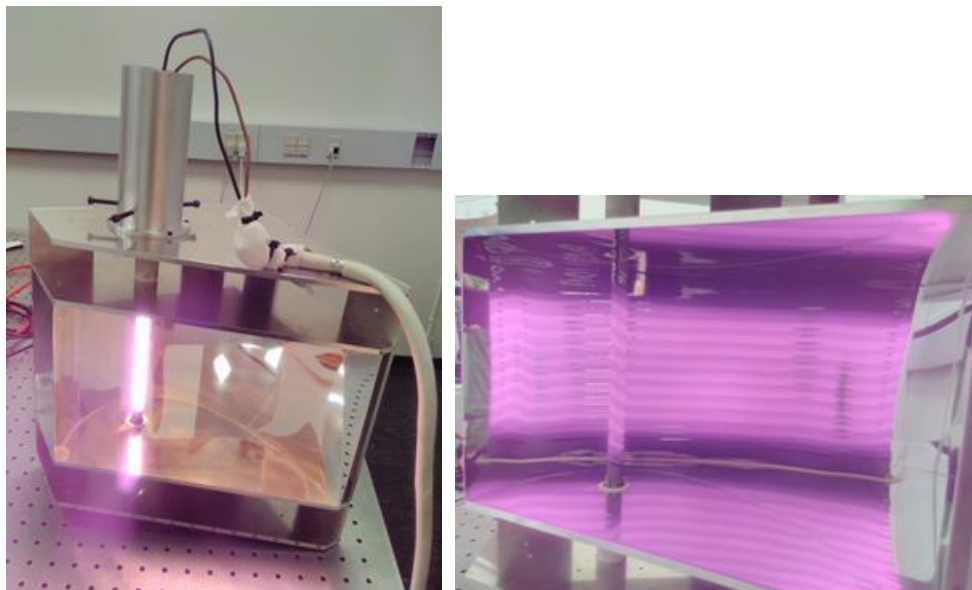


Figur 12: Opstilling af MIR linjeskanneren skematisk.

5.2.3.1 MIR lyskilde

På grund af de vanskelige vilkår forbundet med detektion af sort plastik, blev der bygget og testet en prototype til en infrarød lyskilde til belysning af transportbåndet. Lyskilden er designet

som en kraftig glødetråd placeret i en ellipseformet trugreflektor. Dette skaber en fokuseret belysning over en bred vifte af vinkler for hvert enkelt punkt på transportbåndet og medfører dermed et større antal signalfotoner til detektion af de spektrale signaturer. Figur 13 viser lyskilden og et billede fra fokus af den brede vinkeldækning fra reflektoren.



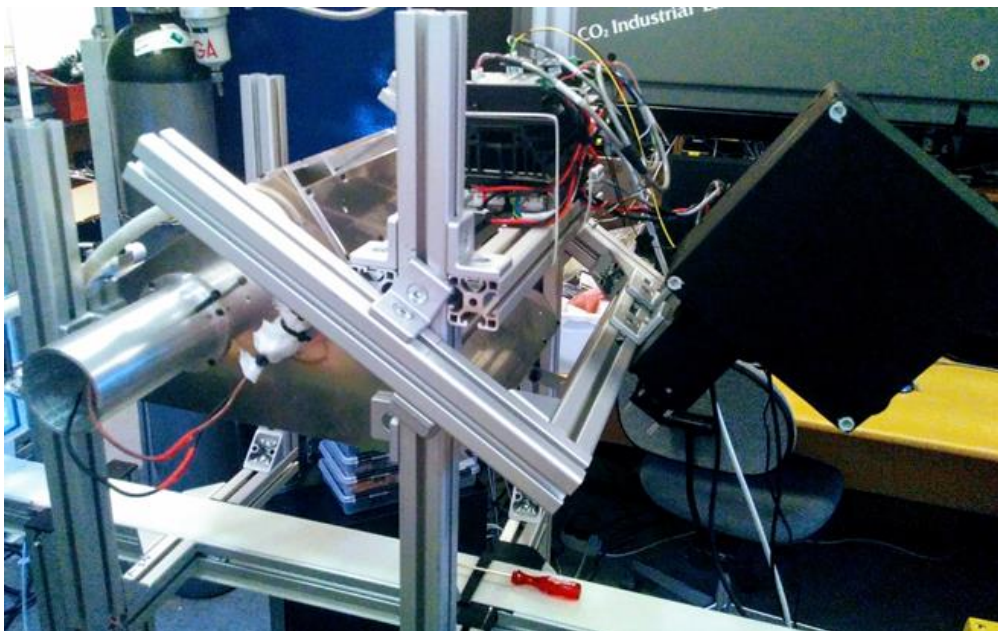
Figur 13: Når glødetråden opvarmes til 1000 °C (venstre foto) udsendes der godt med MIR lys i bølglængdeområdet 3000-5500 nm (MIR linjeskannerens spektralområde). På billedet til højre ses lyskildens jævne fordeling i fokus – dvs. set fra striben på transportbåndet.

5.2.3.2 MIR spektral linjeskanner

Den MIR spektral linjeskanner der er udviklet, består af tre hoveddele; en MIR indkoblingsoptik, en opkonverteringsenhed samt en spektrometerenhed i det synlige område. Indkoblingsoptikken blev konfigureret og valgt således at den rumlige information håndteres i et 10 cm bredt område og den spektrale information indhentes over et 1 cm bredt bælte.

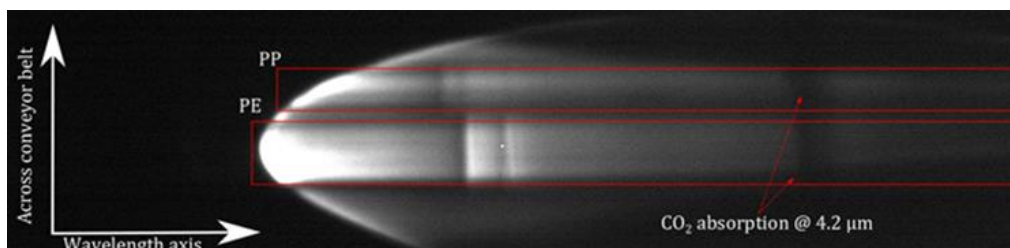
IRSee's MIR opkonverteringsprototype (inkl. punktspektrometer), blev om-konfigureret til en MIR spektral linjeskanner.

I den endelige konfiguration finder MIR spektral linjeskanneren spektret i 70 punkter i et bælte på 1x10cm på tværs af transportbåndet. Den dækker bølglængdeområdet 3000-5500 nm. Den spektrale opløsning er 12-14 cm^{-1} .



Figur 14: Billede af MIR linjeskanneren. Den sorte stribe (pap) på tværs af transportbåndet er lagt på for at vise hvor linjeskanneren fokuserer og tager de 70 spektra.

Outputtet fra linjeskanneren sendes, i form af billeder, videre til vision systemet, som står for fortolkning af spektrene for at identificere plasttypen som passerer. Bilag 3 indeholder en række eksempler på spektra i MIR-området for forskellige plasttyper – både spektra fra litteraturen og spektra optaget med den linje-scanner der er udviklet i PolySort PLUS projektet.



Figur 15: Eksempel på et spektralt billede fra linjeskanneren.

5.3 Vision system

PolySort-systemet styres af et computer vision-system implementeret via en højtydende computer samt en microcontroller.

En microcontroller er en simpel computer, som kun udfører ét program - i modsætning til almindelige computere som konstant afbryder sig selv for at tage sig af de mange hundrede programmer der kører på en almindelig computer (f.eks. web browser, kalender, musik og sågar computerens ur). Eftersom en microcontroller ikke bliver afbrudt i sin udførsel af dens program kan den benyttes til at styre real-time hændelser såsom robotters bevægelse. Microcontrolleren modtager signal fra transportbåndmotorens encoder og sørger for at udløse kameraerne i takt med båndets bevægelse. Billederne fra de tre kameraer beskrevet i afsnit 5.2.1-5.2.3 overføres til den højtydende computer – sammen med information fra microcontrolleren om hvornår de enkelte billeder blev taget relativt til båndets position.

Computer Vision-systemet klassificerer derefter plastemnerne på billederne efter farve og plasttype, og sender så signal til microcontrolleren om at sende signal til PLC'en (se afsnit 5.5) når de pågældende plastemner passerer et specifikt punkt på båndet.

5.4 Aktuatorer

Der arbejdes med flere forskellige aktuatorer, simpelthen fordi plastaffald findes i forskellige former, som lette folier, som tunge massive emner osv. og det derfor er uhyre vanskeligt at forudse hvilken aktuator der vil fungere bedst.

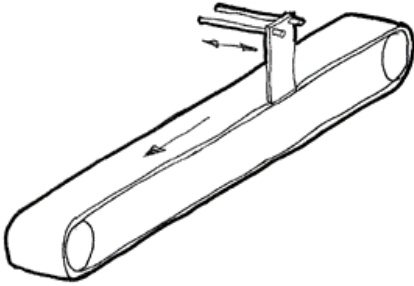
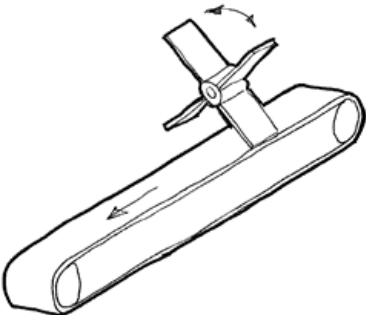
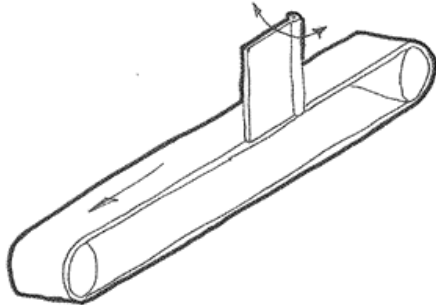
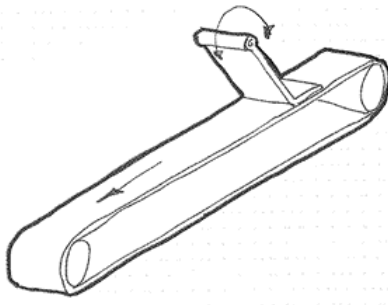
Det mest oplagte, og også den metode der bruges i kommercielle plastsorteringsanlæg baseret på NIR-scannere, er tryklufthyser. Dette er også en relativt billig aktuator at etablere (hvis trykluft haves). Til gengæld er der rigtig mange parametre at optimere på som f.eks. tryk, afstand til båndet, fokusering, vinkel, etc.

Lette folier vil risikere at blæse ukontrolleret af båndet hvis trykket er for højt, og på samme måde vil det være umuligt at blæse tunge massive emner af båndet hvis trykket er for lavt. Efter en række forsøg med trykluft-dyser, blev metoden valgt fra – simpelthen fordi det ikke var muligt at finde en passende balance mellem lette og tunge emner.

Den næste gruppe af aktuatorer er af mere mekanisk art. Formålet er at ramme plaststykkerne med en mekanisk arm eller lignende, og på den måde øge præcisionen og hastigheden hvor med plaststykker kan skubbes af båndet.



Foto af den såkaldte "propel" der kan skubbe plaststykker til begge sider.

	
Linærføring ("skubberen") • Bevægelse på tværs af båndet • Kan aflevere produkt i begge retninger • Kan "parkeres" i begge sider • Hvis flere ens produkter kommer efter hinanden skal føring tilbage til udgangsposition før aflevering	Rotation ("propellen") • Rotation om vandret akse • Kan aflevere produkt i begge retninger • Omdrejningsretning kan fastholdes, hvis flere ens produkter kommer efter hinanden • Vinger skal kunne bøjes for at få anlæg i hele båndets bredde (evt. børster)
	
Rotation ("drejeklappen") • Rotation om lodret akse • Kan kun aflevere produkt i én retning • Skal returnere til udgangsposition efter hver aflevering • Klap skubber produkt ud	Rotation • Rotation om vandret akse • Afleverer produkt ovenover bånd • Skal returnere til udgangsposition efter hver aflevering • Bånd skal aflevere produktet på klap (kræver en vis hastighed på bånd)

Figur 16: Et udvalg af de koncepter for mekaniske aktuatorer der har været overvejet. De tre først er integreret i sorteringsmaskinen sammen med tryklufthyser.

To ingeniørstuderende har også været tilknyttet projektet i en periode, og de har bl.a. systematisk gennemgået forskellige typer af løsninger og alternative metoder til at udsortere plaststykker – bl.a. har de arbejdet med en slags "støvsuger" til at løfte plaststykker af båndet.

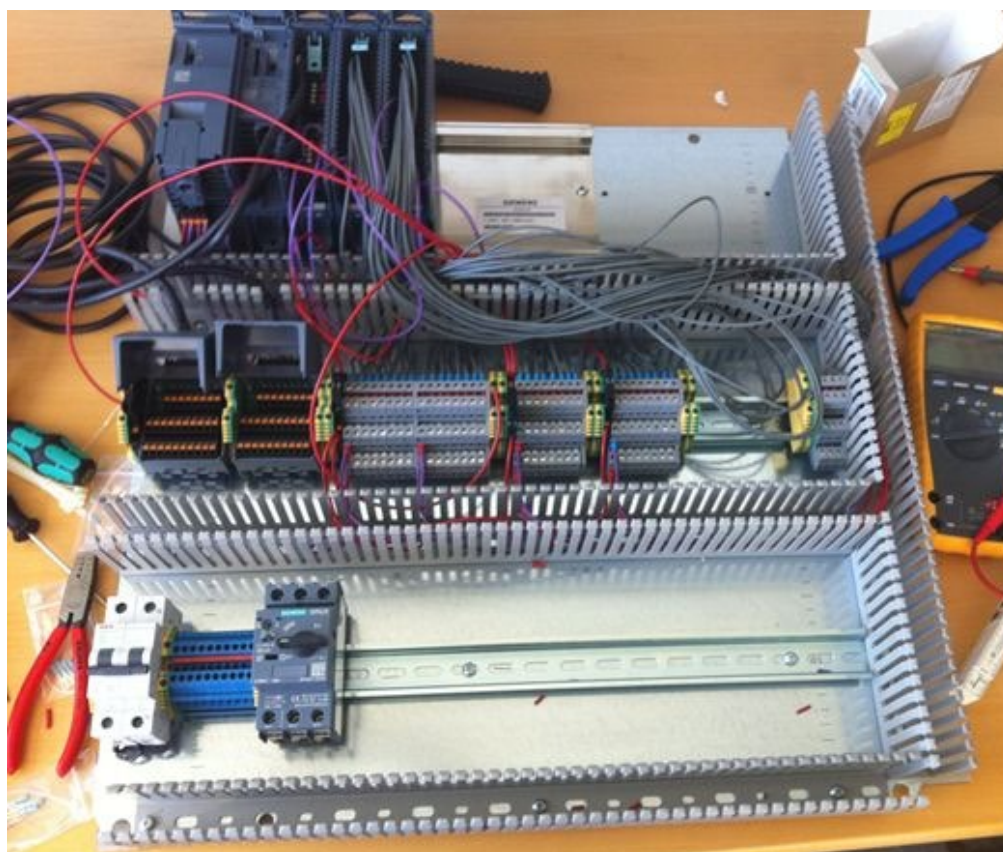
Fordeling ved at løfte plaststykker af båndet med vakuum eller lignende, er at denne metode i princippet kan fungere også med et bredere bånd. Det vil naturligvis kræve en række sugestationer placeret ovenover transportbåndet på en lang række, men det vil være en af de eneste metoder til at fjerne vilkårlige plaststykker fra båndet – hvis man accepterer at flere stykker kan ligge ved siden af hinanden i båndets bredde.

Det blev dog besluttet, at princippet fortsat er at stykkerne ligger en-og-en efter hinanden på det smalle transportbånd vist i figur 11. Dette giver stadig mulighed for at udsortere mange forskellige typer og farver i ét gennemløb, samtidig med at det holder både udgifter og pladskrav for maskinen nede.

5.5 Styring

PolySort maskinen består af en række sensorer (kameraer) og aktuatorer (mekanismer til at skubbe ting af båndet). I mellem disse findes en del hardware og software, bl.a. transportbåndet og den algoritme der bestemmer plasttypen, og alle disse enheder skal arbejde sammen. Til dette kræves en relativt kompliceret styring, der bl.a. skal kunne detektere alle de plaststykker der kommer forbi på transportbåndet, klassificere dem og endelig skubbe dem af båndet på det rigtige tidspunkt (så de kan opsamles i den rigtige beholder).

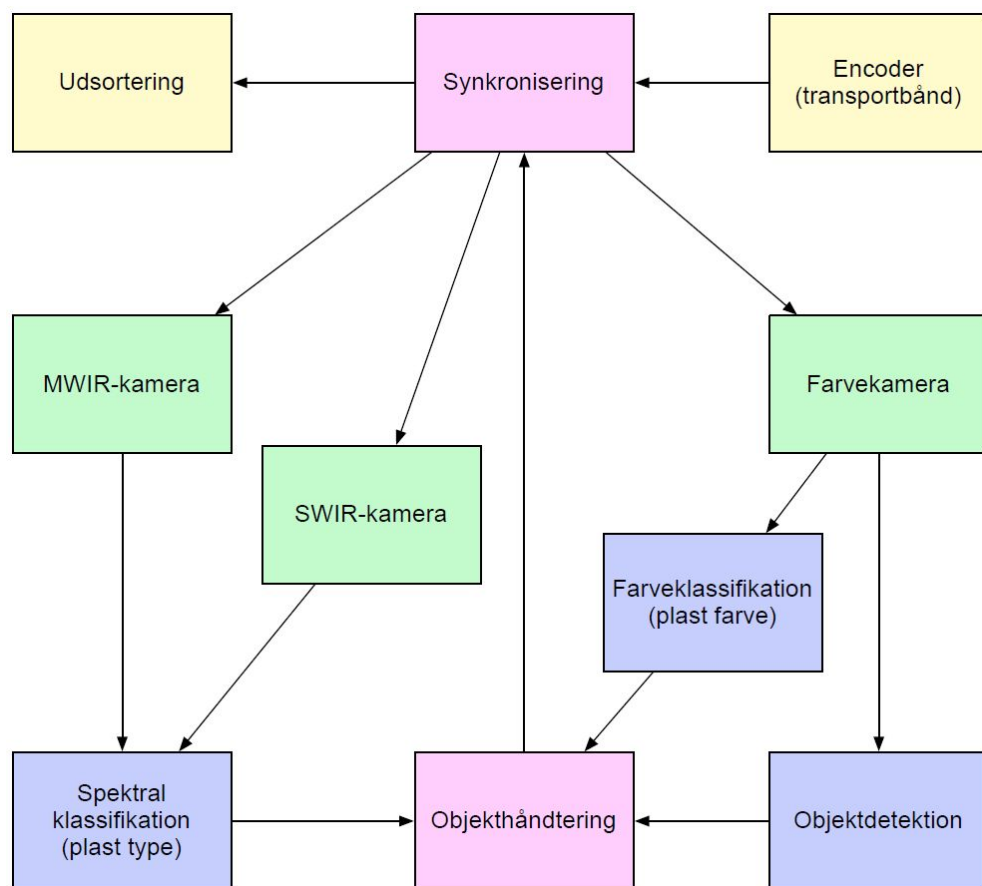
De gule kasser på figur 18 varetages af en såkaldt PLC, der er en "industriel" computer (se også figur 17). Synkroniseringen foretages af den microcontroller der er beskrevet under punkt 5.3.



Figur 17: Et kig ned i styreboksen til sorteringsmaskinen. Styreboksen indeholder PLC'en (øverste venstre hjørne), en række relæer til styring af trykluftventiler, en række relæer til start og stop af motorer samt analog til digital konvertere til at modtage signaler fra sensorerne. På billedet er boksen endnu ikke fyldt udbygget.

Alle de øvrige kasser i figur 18 er enten fysiske kameraer (de grønne kasser) eller software i den arbejdsstation (kraftig PC) der varetager billedbehandling og billedanalyse (herunder spektralanalyse). Kommunikationen mellem PLC og PC foregår via kassen kaldet "Synkronisering" og er i høj grad styret af de encoder signaler som transportbåndet udsender når det bevæger sig. Ved hjælp af encoder-signalet, ved systemet hvor hurtigt båndet kører og kan vha., kendskab til afstanden mellem to enkoder-pulser således beregne hvornår et objekt er i en given position. Systemet kan således håndtere hvis transportbåndets hastighed ændres.

Når algoritmerne i PC'en har detekteret et objekt, på baggrund af billedet fra farvekameraet, bliver der sendt signal til de to øvrige kameraer således at der optages billeder af objektet netop når det passerer forbi under det pågældende kamera. Derefter beregnes hvilken plasttype som de optagne billeder (spektre) passer bedst til, og resultatet overgives til PLC'en når objektet passerer en bestemt linje på transportbåndet. Præcis når denne linje passeret meddeler PC'en at et objekt er på vej og hvilken kasse objektet skal skubbes i. PLC modtager disse oplysninger og beregner derefter hvornår den skal aktivere en given aktuator – for at den netop rammer det pågældende objekt når dette er udført den rigtige kasse. PLC har for hver aktuator en optimeret acceleration samt en reaktionstid, der tilsammen gør at aktuatoren starter sin bevægelse på det helt rigtige tidspunkt i forhold til at ramme plaststykket omkring massemidtpunktet. Dette er nødvendigt for at undgå at stykkerne "flyver rundt i lokalet", med risiko for at ramme forbipasserende – eller ramme forbi den kasse de var tiltænkt.



Figur 18: Komponenter i styringen af sorteringsmaskinen. De tre sensorer eller kameraer (grøn baggrund) kommunikerer med hhv. farve- og typeklassifikatorerne. Farvekameraet bruges også til objektdetektion – der igen bruges til at holde styr på hvor plaststykkerne befinder sig og til at aktivere NIR (MWIR) og MIR (MWIR) kameraerne på det rigtige tidspunkt.

De plaststykker som farvekameraet ikke kan se (f.eks. helt transparente stykker), og de stykker som algoritmen ikke kan typebestemme (f.eks. på manglende data), bliver ikke "overleveret" til PLC'en – og systemet vil derfor ikke forsøge at skubbe dem af båndet. Dette skaber naturligvis en mindre rest af usorterede plaststykker, men er på den anden side med til at sikre at de stykker som bliver skubbet af båndet kun er dem systemet er sikker på.

6. Resultater

Dette afsnit beskriver de tekniske resultater af projektet, dvs. hvor meget plast maskinen kan sortere pr. time, hvor god maskinen er til at genkende de forskellige plasttyper samt hvor korrekt en blanding af plastaffald sorteres.

6.1 Kapacitetsmålinger

For at kunne estimere sorteringsmaskinens kapacitet, som funktion af den mekaniske aktuator (mekanisme) der skubber plaststykket af båndet, er der lavet en række simple beregninger. Først er fire stykker plastaffald udvalgt og brugt som eksempler:

Tabel 3: Fire udvalgte plaststykker og deres ydre mål og vægt. Alle plastmaterialer er sat til at have en densitet på 1,0 gram pr. cm³. Dette er naturligvis ikke helt korrekt (f.eks. er PE 0,93 og PET 1,38), men er dog en rimelig antagelse i denne analyse.

Navn	Mål (mm)	Vægt (g)	Bemærkninger
Battericover	75 x 75 x 40	50,000	Cover med 2 mm godstykkelse
Flaske	25 x 65 x 40	14,000	Halv dunk med 1 mm gods
Emballage	50 x 50 x 30	2,000	Afklip af PET emballage, 0,25 mm gods
Låg	10 x 10 x 8	0,250	Del af PP låg med 1 mm gods

Alle stykker er mindre end 75 x 75 x 75 mm, da de ellers ikke vil kunne være på transportbåndet. Det ses af tabel 3 at vægten af de enkelte plaststykker varierer ret ekstremt. Ikke overraskende vejer større emner med høj godstykkelse ganske meget, hvorimod små stykker af emner med lav godstykkelse vejer under et gram.

Da sorteringsmaskinen skal behandle et stykke ad gangen, betyder det utroligt meget om stykkerne er store og relativt massive – eller om de er små og tyndvæggede. Der er ikke medtaget folier i tabellen, men vil være lidt anderledes idet de har en relativ stor udstrækning men meget lav vægt.

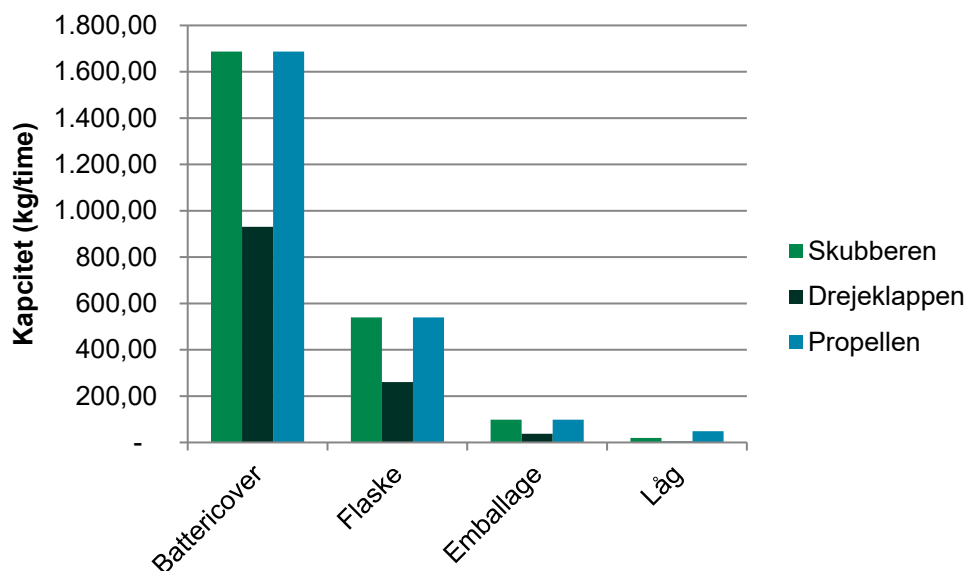
De forskellige aktuatorer anvender forskellige mekanismer til at skubbe plaststykker af båndet "på det rigtige tidspunkt". De fleste af aktuatoren skal derefter tilbage til udgangspunktet, før de er klar til at skubbe et nyt stykke af båndet. Dette gælder dog ikke for "propellen", der kan fortsætte med at køre samme vej rundt.

Den såkaldte "skubber" arbejder til gengæld med en trykluft ventil, i stedet for motorer, og dette går så hurtigt at kapaciteten for skubberen stort set er den samme som for propellen – også selvom skubberen skal både frem og tilbage.

Det fremgår klart (se figur 19), at "drejeklappen" giver en dårligere kapacitet end de øvrige aktuatorer, fordi den er relativt lang tid om at køre frem og tilbage – og samtidig kræver drejeklappen større afstand mellem stykkerne fordi den fylder mere i "bredden" end de øvrige.

Der blev også lavet en række forsøg med anvendelse af luftdyser til at blæse plastaffaldet af båndet. Fordelen ved luftdyser, der også kendes fra de kommercielle NIR-scannere, er at de ikke rører plasten direkte – og derfor ikke bliver slidt eller snavsede. For denne sorteringsmaskine, der jo er opbygget anderledes med alle plaststykker på en række på transportbåndet, kræves imidlertid at stykkerne kan ligge ganske tæt for at få en acceptabel kapacitet. Resultatet

er forsøgene med tryklufdyser var, at hvis dyserne skulle være i stand til at blæse de tungeste stykker af båndet (op til 50 g), så blæste de så kraftigt at afstanden mellem plaststykkerne skulle være mindst 30 mm. Hvis afstanden gøres mindre bliver også nabostykkerne påvirket når tryklufdyseren aktiveres mod et bestemt stykke plast. Dette fænomen kendes faktisk også fra de kommercielle NIR-scannere, hvor f.eks. et stort stykke plast kan aktivere mange dyser og på den måde fejlagtigt blæse nogle andre plaststykker med. På baggrund af disse resultater, blev det derfor besluttet at fokusere på de 2 hurtigste af de mekaniske aktuatorer, nemlig skubberen og propellen.



Figur 19: Figuren viser den beregnede kapacitet for sorteringsmaskinen for 3 udvalgte aktuatorer (se figur 16) som funktion af plaststykkernes vægt (og størrelse). Det antages at transportbåndet kører med en hastighed på 0,75 m/s, at afstanden mellem plaststykkerne er 5 mm plus aktuatorens "bredde" samt at alle stykkerne er ens. Det er tydeligt at kapaciteten bliver meget høj for større massive emner som "battericover", og ganske lav for små lette emner som "låg".

For at sikre at selv meget lave plaststykker kan skubbes af båndet – og samtidig undgå at ridse transportbåndet – er både skubberen og propellen forsynes med en "kost" for enden af hhv. skubberens arm eller propellen fire "vinger". Der blev eksperimenteret med flere forskellige typer koste, både industrielle og mere almindelige børster. Kostene vil givet blive slidt, og tilsmudset hvis affaldet er snavset, så det vil være nødvendigt at udskifte med jævne mellemrum.

6.2 Genkendelsesnøjagtighed

Dette afsnit opsummerer resultaterne af plasttypeklassifikationen. Det er værd at bemærke at resultaterne herunder ikke er justeret efter hvor stor en mængde plast man kan tillade at lade gå videre til manuel sortering eller forbrænding - alle plastemner udsorteres - som enten den ene eller den anden type.

I et operativt system ville man naturligvis justere systemet efter dels hvor stor en andel man kan tillade går igennem systemet uden at blive udsorteret og dels hvilken renhed man ønsker i de udsorterede fraktioner.

I nedenstående afsnit anvendes begreberne sensitivitet (recall) og præcision (precision) ifht. klassifikationssystemer. Sensitivitet udtrykker hvor stor en andel af en specifik plasttype der er fundet/klassificeret korrekt. Præcision udtrykker renheden af en klassifikation, altså hvor mange af plastemnerne klassificeret som en given type som rent faktisk er den givne type.

Antag et plastklassifikationssystem bliver præsenteret for 20 stykker plast:

- 12 stykker PE
- 8 stykker ABS

Hvis systemet klassificerer fire af PE-stykkerne som PE, så definerer vi at systemet har en sensitivitet for PE på $4/12=33\%$. Der vil således være fire stykker plast som både er PE og er blevet klassificeret som PE. Hvis også fire af ABS-stykkerne klassificeres som PE definerer vi at systemet har en PE-præcision på $4/(4+4)=4/8=50\%$.

Omvendt, hvis vi antager at alle øvrige PE- og ABS-stykker klassificeres som ABS, vil ABS-sensitiviteten være $4/8=50\%$. ABS-præcisionen, altså andelen af stykker klassificeret som ABS

Type	Antal	Sensitivitet	Præcision
PE	12	$4/12 = 33\%$	$4/8 = 50\%$
ABS	8	$4/8 = 50\%$	$4/12 = 33\%$

som rent faktisk er ABS, vil være systemet have en ABS-præcision på $4/(8+4)=4/12=33\%$.

6.2.1 Farvet plast

Klassifikation af farvet, dvs. ikke-sort, plast er blevet afprøvet på baggrund af et forholdsvis lille antal SWIR-billeder.

Tabel 1 viser sensitivitet og præcision for de fire plasttyper anvendt til test. Tabellen viser således at man vil kunne forvente at 88% af PC-plastemner vil blive klassificeret som værende PC. Omvendt vil man kunne forvente at 81% af de plastemner der bliver klassificeret/udsortet som værende PC rent faktisk er PC.

Tabel 4: Resultat af SWIR-klassifikation af ikke-sortede plastemner. Tabellen viser at man vil kunne forvente at 88% af PC-plastemner vil blive klassificeret som værende PC. Omvendt vil man kunne forvente at 81% af de plastemner der bliver klassificeret/udsortet som værende PC rent faktisk er PC.

Type	Antal	Sensitivitet	Præcision
PE	13	92%	100%
PET	5	80%	67%
PP	12	100%	80%
PS	0	-	0%
PVC	2	100%	100%
PC	24	88%	81%
ABS	15	60%	100%
PMMA	4	100%	100%

Confusion-matricen for afprøvningen er vist i tabel 5. Her ses det at systemet blev afprøvet på 13 (=12+1) PE-plastemner, og 12 af disse blev klassificeret som værende PE. Af de emner som blev klassificeret til at være PP var 12 PP og så var der 5=(1+1+2+1) andre emner.

Bemærk at resultaterne herunder ikke er justeret efter hvor stor en mængde plast man kan tillade at lade gå videre til manuel sortering eller forbrænding - alle plastemner udsorteres - som enten den ene eller den anden type.

Tabel 5: Confusion-matrice for SWIR-klassifikation af ikke-sorte plastemner. Her ses det at systemet blev afprøvet på 13(=12+1) PE-plastemner, og 12 af disse blev klassificeret som værende PE. Af de emner som blev klassificeret til at være PP var 12 PP og så var der 5 (1+1+2+1) andre emner.

		Plasttype							
		PE	PET	PP	PS	PVC	PC	ABS	PMMA
Klassificeret type	PE	12	0	0	0	0	0	0	0
	PET	0	4	0	0	0	2	0	0
	PP	1	1	12	0	2	1	0	0
	PS	0	0	0	0	0	0	1	0
	PVC	0	0	0	0	0	0	0	0
	PC	0	0	0	0	0	21	5	0
	ABS	0	0	0	0	0	0	9	0
	PMMA	0	0	0	0	0	0	0	4

6.2.2 Sort plast

Vi har evalueret klassificeringen af MWIR-optagelserne med et datasæt bestående af 239 stykker sort plast af typerne: PE, PET, PP og PS.

Tabel 6 viser sensitivitet og præcision for de fire plasttyper anvendt til test. Sensitivitet udtrykker hvor stor en andel af en specifik plasttype der er fundet/klassificeret korrekt. Præcision udtrykker renheden af en klassifikation, altså hvor mange af plastemnerne klassificeret som en given type som rent faktisk er den givne type. Tabellen viser således at man vil kunne forvente at 65% af PE-plastemner vil blive klassificeret som værende PE. Omvendt vil man kunne forvente at 73% af de plastemner der bliver klassificeret/udsorteret som værende PE rent faktisk er PE.

Tabel 6: Resultat af MWIR-klassifikation af sorte plastemner. Tabellen viser at man vil kunne forvente at 65% af PE-plastemner vil blive klassificeret som værende PE.

Type	Antal	Sensitivitet	Præcision
PE	17	65%	73%
PET	54	26%	45%
PP	49	92%	69%
PS	119	83%	77%

Tabel 7: Confusion-matrice for MWIR-klassifikation af sorte plastemner. Her ses det at systemet blev afprøvet på 17(=11+2+1+3) PE-plastemner, og 11 af disse blev klassificeret som værende PE. Af de emner som blev klassificeret til at være PE var 11 PE og fire var PET. Herunder er resultaterne i simple box plot diagram.

		Plasttype			
		PE	PET	PP	PS
Klassificeret type	PE	11	4	0	0
	PET	2	14	1	14
	PP	1	13	45	6
	PS	3	23	3	99

6.2.3 Diskussion

Resultaterne for farvet plast er tilfredsstillende i form af høje træf rater. Disse er på niveau med øvrige produkter på markedet. Man bør dog være opmærksom på de numeriske størrelser er begrænsede og derfor kan resultaterne være behæftet med en vis statistisk usikkerhed. Resultaterne er dog en indikation for sensitiviteten og præcisionen.

Resultaterne for sort plast er også tilfredsstillende. Med hensyn til sort plast, er der kørt flere emner igennem systemet end for farvet plast, så resultaterne er også her en god indikation for sensitiviteten og præcisionen. PET skiller sig ud - og det skyldes at PET's spektrum er fladt (intet signal) i 3000-5500 nm-området dækket af MWIR-sensoren. Dette blev klart henimod slutningen af projektet (se også bilag 3), og løsningen er at udvide sensorens område til også at omfatte 2200 nm til 3000 nm området – da der her er en tydelig signatur for PET.

7. Plastaffald og økonomi

PolySort maskinen er tænkt som en sorteringsmaskine til store og mellemstore plastproducerende virksomheder, til sortering af restaffaldet fra kommunale NIR-scannere og til genbrugspladser og andre steder hvor man ønsker at undgå at transportere affaldet over store afstande.

7.1 Hvem vil have glæde af en PolySort maskine?

PolySort maskinen er, som den står i skrivende stund, en proto-type der er udviklet med fokus på alle de forskellige typer af plastaffald der er nævnt i indledningen – og som i projektet er repræsenteret af følgegruppens medlemmer. At maskinen således er udviklet til at kunne sortere både sort plast og farvet plast, husholdningsaffald, plast fra elektroniskrot, bygningsaffald og industriaffald, betyder desværre også at den ikke er optimeret til nogen af delene. Inden maskinen vil kunne sælges er det nødvendigt med en opgradering af systemet, således at maskinen bliver mere robust, at ledninger mm. pakkes ind og gemmes væk, at maskinen sikkerhedsgodkendes og CE-mærkes samt at den gøres mere transportvenlig. Endelig vil det software der er udviklet til maskinen også skulle opgraderes og gøres mere brugervenligt.

I forbindelse med denne opgradering, eller videreudvikling, vil det også være naturligt at udvikle nogle varianter af maskinen. Det kunne f.eks. være en variant der IKKE kan sortere sort plast, da det ikke er alle der har brug for det. Man kunne også tænke sig varianter med enten bredere eller smallere transportbånd, da ikke alle typer plastaffald passer med den bredde som den nuværende maskine har (80 mm). Endelig vil der være forskel på, hvor mange udsorteringer de enkelte kunder vil ønske. Nogle har brug for at kunne sortere mange typer eller farver fra (typisk husholdningsaffald og elektroniskrot) mens andre – f.eks. hvis et firma kun anvender et begrænset antal plasttyper i deres produkter – kan nøjes med 4 eller 6 spande (typisk industriaffald).

På grund af maskinens begrænsede kapacitet, sammenlignet med de kommercielt tilgængelige NIR-scannere, er de mest oplagte anvendelser indenfor husholdningsplast nok finsortering (dvs. sortering af affald der allerede er grovsorteret og derefter neddelt), udsortering af specielle plasttyper (f.eks. uønskede typer eller tilsætningsstoffer) eller sortering af plastaffald der er siet fra i større anlæg (store anlæg til husholdningsplast har ofte en sigte til at fjerne små plaststykker som f.eks. er under 30 mm).

Plast fra elektroniskrot er en oplagt mulighed for PolySort maskinen, fordi der anvendes et meget stort antal forskellige typer indenfor denne branche. Det vil derfor kræve et stort antal NIR-scannere at sortere denne type affald – uden at ende med en alt for stor restfraktion. Endelig er der også en række muligheder indenfor industriaffald, hvor f.eks. virksomheder med en stor produktion kunne forsvare at købe den mindre PolySort maskine for at sortere eget affald. En sortering af virksomhedens eget affald vil konvertere affaldet fra at være en udgift (det koster omkring 1000 kr. pr. ton at komme af med blandet plastaffald), til at være en indtægt. Samtidig vil det "se godt ud" i virksomhedens miljøregnskab. Nogle virksomheder vil formentlig også kunne genanvende den sorterede plast direkte i produktionen, og på den måde spare på materialeomkostningerne.

For virksomheder med et begrænset antal forskellige produkter, evt. kombineret med et begrænset antal forskellige farver og plasttyper, vil det muligvis slet ikke være nødvendigt at

anvende NIR og MIR sensorerne i PolySort maskinen. I disse tilfælde vil det almindelige kamera i maskinen kunne genkende de enkelte former eller farver, og foretage sorteringen på baggrund af et detaljeret kendskab til virksomhedens produkter. På den måde vil maskinen nærme sig de såkaldte "vision"-systemer der anvendes af mange robotter, kvalitetssikringssystemer og produktionsmaskiner.

7.2 Business case

På baggrund af det input og de kommentarer vi har modtaget fra følgegruppen, og fra andre personer eller organisationer der har fået kendskab til PolySort projektet, er det blevet klart at der er en vigtigt kommunikationsopgave omkring konceptet vi anvender.

Fra flere sider har vi f.eks. hørt at et smalt transportbånd gør det umuligt at sortere husholdningsaffald, samt at kapaciteten af PolySort maskinen vil være alt for lille. Vi er naturligvis ikke enige i disse påstande og derfor er der brugt tid på at lave nedenstående figurer og en business case, der viser at PolySort konceptet måske nok er anderledes end de konventionelle maskiner – men det er så absolut konkurrencedygtigt, både hvad angår kapacitet og økonomi!

De store konventionelle NIR-scannere har typisk en kapacitet på omkring 1000 kg pr. time, mens de mindre PolySort PLUS maskiner forventes af have en kapacitet på 200 kg pr. time. Der skal således fem PolySort PLUS maskiner der kører samtidigt (i parallel) til at opnå den samme kapacitet. Omvendt kan de konventionelle NIR-scannere kun udsortere én type plast (f.eks. PP), alle andre typer plast vil forblive usorteret (rest). For at få fat i alle de plasttyper der er mest af i Dansk husholdningsaffald, sætter man ofte flere NIR-scannere efter hinanden (i serie). Med tre scannere i serie kan f.eks. både PE, PP og PET sorteres fra (se eksemplet i bilag 2).

Tabel 8: Sammensætningen af typisk Dansk plastaffald fra husholdninger [estimeret på baggrund af Plastindustrien 2012, Econet 2013]. Affald indeholder omkring 5% (baseret på vægt) der slet ikke er plast, som derfor altid bliver en rest, og 10% der tilhøre plasttype 7 (other) som f.eks. ABS, PC, PA, .m.fl.

Nr.	Type	Farve	Fordeling (%)	Pris (kr./ton)	Værdi (kr.)
1	PET	klar	8%	4.200	336
1	PET	sort	1%	3.080	31
1	PET	farvet	3%	2.800	84
2 + 4	PE	klar	8%	3.150	252
2 + 4	PE	sort	4%	2.310	92
2 + 4	PE	farvet	28%	2.100	588
3	PVC		8%	1.500	120
5	PP	klar	4%	3.300	132
5	PP	sort	2%	2.420	48
5	PP	farvet	13%	2.200	286
6	PS	klar	3%	3.450	104
6	PS	sort	2%	2.530	51
6	PS	farvet	1%	2.300	23
7	Andre		10%	-	-
	Rest		5%	-	-
	I alt		100%		2.147

Ulempen ved de store NIR-scannere er, at de ofte IKKE kan se typen for sortfarvet plast samt at selv med tre scannere i serie kan man ikke sortere f.eks. polystyren (PS) eller PVC fra. Derfor ser man også at restproduktet for de tre kommercielle NIR-scannere er relativt højt (360 kg)

mod kun ca. 160 kg for fem PolySort PLUS maskiner. Disse tal gælder kun for PolySort PLUS maskiner med 10 udsorteringer (spande) som illustreret i bilag 2. I virkeligheden kan man forestille sig både færre og flere udsorteringer afhængigt af affaldet (og økonomien).

En anden mulighed kunne være at sætte en eller to PolySort PLUS maskiner til at sortere den rest på 360 kg som NIR-scannerne efterlader. Dermed vil det være muligt at komme ned på en endnu mindre rest, der nærmer sig de ca. 5% (50 kg) der slet ikke er plast men som består af f.eks. træ, metal, papir, jord, glas og andet affald.

Tabel 9: Beregning foretaget på baggrund af oplysningerne i tabel 8, med to forskellige sorteringsopstillinger (se også tegning i bilag 2). Begge opstillinger kan sortere 1000 kg plastaffald på en time.

Udsorteret pr. ton plastaffald					
5 PolySort maskiner i parallel			3 NIR-scannere i serie		
fraktion	kg	kr.	fraktion	kg	kr.
1 PET klar	80	336	PET klar+farvet	110	308
2 PET sort+farvet	40	126			
3 PE klar	80	252			
4 PE sort	40	92	PE klar+farvet	360	756
5 PE farvet	280	588			
6 PVC	80	120			
7 PP klar	40	132	PP klar+farvet	170	374
8 PP sort+farvet	150	330			
9 PS klar	30	104			
10 PS sort	20	51			
	840	2.131		640	1.438

I tabel 8 findes en estimering af de værdier som findes i sorteret plastaffald fra husholdninger. For at lave disse beregninger er det nødvendigt at gøre en række antagelser. For det første skal man vide hvilken fordeling af plasttyper som typisk Dansk plastaffald forventes af have. Til dette er anvendt dels en opgørelse fra Plastindustrien fra 2012 og dels en måling af tilfældigt udvalgt plastaffald fra en boligblok i København (Econet, "Analyse af plast indsamlet fra etageboliger", udført for Københavns Kommune, 2013). På baggrund af disse to kilder er en gennemsnitlig fordeling foreslået – ligesom det er estimeret af 10% af hver plasttype er sort og 20% af hver plasttype er klar plast. Dette gælder dog IKKE for PS idet det mest findes som klar plast eller som sort plast. Endelig er det også nødvendigt at kende den pris man kan sælge sorteret plastaffald for. Ved en række opslag på internettet i mart 2016, er de priser som ses i bilaget fundet. Priserne ændrer sig hele tiden – og følger i øvrigt olieprisen – ligesom det kan være svært at gennemskue om det plast som PolySort PLUS systemet kan leverer lever op til de krav der stilles for at opnå de nævnte priser. På baggrund af oplysningerne fra diverse internet "børser" er det ligeledes estimeret at prisen på sort plast er 10% højere end for farvet plast (uanset type) og at prisen for klar plast er 50% højere end farvet plast (kaldet "mixed colours").

Hvis de gennemsnitspriser pr. ton sorteret plastaffald som er beskrevet i tabel xx anvendes, er det muligt at regne på den økonomiske værdi af PolySort PLUS konceptet sammenlignet med den konventionelle måde at sortere på (de to situationer illustreret i figuren i bilag 2).

Et ton typisk Dansk plastaffald fra husholdninger har, fuldt sorteret, en værdi på 2.147 kroner – hertil kommer den pris man kan få for at modtage og sortere affaldet (aftales med kommunen eller forbrændingsanlægget og anghænger bl.a. hvor meget der genbruges mm.). I denne værdi på lidt over 2.000 kr. er kun medregnet de mest almindelige plasttyper (kategori 1-6), idet indholdet fra kategori 7 (der dækker over alle andre typer, som f.eks. ABS, PC, PA, POM,

PMMA, etc.) sættes til værdien nul – fordi det ikke kan udsorteres i nogen af konfigurationerne. Kategori 7 forventes at udgøre ca. 10% af den samlede mængde plastaffald fra husholdninger. På samme måde regnes med en værdiløs restfraktion, der typisk består af materialer der slet ikke er plast (pap, papir, metal, sten, sand, træ, etc.) og som forventes at udgøre ca. 5% af den samlede mængde. Det er naturligvis ærgerligt ikke at udnytte de 10% plastaffald der tilhører kategori 7, bl.a. fordi de koster mere end kategori 1-6. Man kunne også godt forestille sig andre konfigurationer end de to fra figur 1 der kunne udsortere plasttyper fra kategori 7 (f.eks. at sætte en enkelt PolySort PLUS maskine til dette arbejde efter de fem første har sorteret kategori 7 fra), men det vil naturligvis gøre beregningerne mere komplicerede og formodentlig også mere usikre – idet der ikke er noget klart billede af hvilken fordeling der er mellem de mange forskellige plasttyper i kategori 7.

Sammenlignes de to konfigurationer (begge fodres med et ton plastaffald på én time), fås at;

- den konventionelle metode, med tre NIR-scannere efter hinanden, kan udsortere 640 kg plastaffald pr. ton og det vil have en værdi på 1.438 kr.
- PolySort PLUS metoden, med fem PolySort PLUS maskiner ved siden af hinanden, kan udsortere 840 kg plastaffald pr. ton og det vil have en værdi på 2.117 kr.

Den væsentligste årsag til at PolySort PLUS maskinerne generer en højere værdi (og mængde) er at man får fat i det sorte plast og at maskinen og skelner mellem klar plast og farvet plast ("mixed colours").

Den konventionelle løsning med tre NIR-scannere vurderes at koste omkring 10 millioner kr., hvorimod løsningen med fem PolySort PLUS maskiner vurderes af koste omkring 5 millioner kr. I begge tilfælde kræves det at affaldet er vasket og neddelt i rimelige stykker (f.eks. at have stole taget fra). Dog vil PolySort maskinen kræve en højere grad af neddeling end de fleste NIR-scannere.

For tiden er det meget vanskeligt at afsætte PVC, og den pris der er angivet i tabel 8 for PVC er sandsynligvis alt for høj.

Det koster omkring 1000 kr. pr. ton at komme af med den rest af usorteret affald som begge sorteringslinjer vil producere. Det hører derfor med til regnestykket, at beregne udgiften til bortskafning af restmaterialet. Også her klarer PolySort maskinen sig bedre end de kommercielle NIR-scannere, idet vægten af restmaterialet er under det halve.

Det skal understreges at PolySort maskinen ikke i øjeblikket er i stand til at identificere klar plast, da objekt-detektoren er baseret på lys der kommer nedefra (gennem transportbåndet). Denne fremgangsmåde har desværre vist sig at gøre det umuligt for kameraet at "se" de transparente plaststykker. Uden at kunne håndtere transparent plast vil PolySort maskinen klare sig væsentligt dårligere, men det er dog et praktisk problem de vil kunne løses i fremtidige videreudviklinger af konceptet.

7.3 Anbefalinger og det videre arbejde

På baggrund af de opnåede resultater, de mål der oprindeligt var med PolySort og PolySort PLUS projekterne samt de mange input vi har modtaget undervejs i projektet – kan man opstille følgende punkter som videre arbejde:

- Problemet med at objekt-detektoren ikke kan se klar plast skal løses. Klar plast er en vigtig del af det meste plastaffald, og har i øvrigt også en højere pris end farvet plast, og derfor skal systemet kunne udsortere klar plast korrekt.
- MIR-sensoren skal udvides til at dække bølglængdeområdet 2,0-5,5 μm for bedre at kunne identificere PET (som har en markant spektralsignatur mellem 2,6 og 3,0 μm , se eksempler på dette i bilag 3)

- Der skal fremstilles yderligere træningssæt, så maskinen kan blive bedre til at genkende de plasttyper der ligger for lavt. Det gælder især ABS og PET (både sort og andre farver) med også sort PE.
- For at opnå den fulde kapacitet af systemet, vil de algoritmer der foretager klassificeringen skulle optimeres - således at transportbåndets hastighed kan øges. Den reelle kapacitet regnet i kg pr. time, vil dog stadig afhænge kraftigt af affaldets beskaffenhed (godstykkelse, størrelsesfordeling, etc.).
- Selve transportbåndet skal fremstilles i et mindre "klistret" materiale end det hvide bånd der blev anvendt i projektet. Dette vil mindske friktionen mellem plastaffald og båndet, og gøre det nemmere og mere præcist at skubbe emnerne af båndet på det rigtige tidspunkt.
- I princippet vil specielt MIR-sensoren kunne anvendes til at identificere visse typer fyldstoffer der anvendes i visse polymerer. Der bør derfor gøres endnu et forsøg på at identificere f.eks. brandhæmmere i plast fra elektronik, eller blødgørere i PVC, for på den måde at kunne sortere disse materialer fra.
- Den infrarøde lyskilde er nok lidt for kraftig og bør drosles ned i effekt – og evt. i fokusområdet udstrækning. Dermed vil risikoen for at plastaffaldet "vrider sig" under varmepåvirkningen mindskes – hvad der kan være et problem for meget tyndvæggede emner (folier).
- Selve sorteringsmaskinen skal "pakkes bedre ind" og både elektronik og mekanik skal gennemgås med henblik på at øge sikkerheden. Derefter vil maskinen kunne CE-mærkes.
- Procedurer til rengøring og vedligeholdelse af sorteringsmaskinen skal også udvikles, således at maskinen bliver mere robust og kan klare at sortere affald i døgndrift med et minimum af opsyn.

Ingen af de identificerede punkter på ovenstående liste er umulige at gennemføre. Nogle kræver ekstra udvikling – andre er blot opgaver der skal gennemføres (f.eks. CE-mærkning og rengøring/vedligehold).

Partnerne i PolySort og PolySort PLUS vil derfor arbejde videre med sorteringsmaskinen, og forsøge at gennemføre så mange som muligt af opgaverne fra ovenstående liste. Målet er at bringe maskinen i en stand hvor den kan produceres og sælges til interesserede købere i Danmark og Europa.

8. Konklusion

De to sammenhængende projekter PolySort og PolySort PLUS har leveret en funktionsdygtig testmaskine der kan sortere plastaffald efter type og farve. Ved hjælp af en ny sensor der kan "se" i det infrarøde område, kan maskinen også genkende sort plast. Maskinen fungerer anderledes end de kommercielle NIR-scannere der allerede findes på markedet, idet den er mindre, billigere og mere fleksibel. Den største forskel er dog nok, at PolySort maskinen kan udsortere flere forskellige plasttyper (eller farver) ved ét gennemløb. Dette er normalt ikke muligt med en NIR-scanner, og dette faktum kompenserer delvist for at PolySort maskinen er mindre og ikke har den samme kapacitet som de store NIR-scannere.

Kombinationen af en lille sorteringsmaskine med mange udsorteringer ser ud til at have ramt noget i markedet. Overraskende mange virksomheder, kommuner og enkeltpersoner har henvendt sig undervejs i projektet – bl.a. fordi PolySort maskinen ikke er større end at en virksomhed, eller en mindre kommune, vil kunne få råd til at investere i den. Da PolySort maskinen samtidig har mulighed for at genkende sort plast, bliver diskussionen omkring hvilken type sorteringsmaskine man skal købe hurtigt til en diskussion om kapacitet og mængder. Har man f.eks. meget store mængder af plastaffald, der fordeler sig på relativt få plasttyper, vil de store kommercielle NIR-scannere nok stadig være det bedste valg. Hvis plastaffaldet består af mange forskellige typer, eller svinger meget i sammensætning, vil PolySort maskinen kunne udsortere en største andel af plasten end en klassisk NIR-scanner. Denne pointe er forklaret i detaljer i afsnit 7.2 og i bilag 2.

Det er løbet af projektet lykkedes, at opbygge en testmaskine der kan sortere plastaffald efter type og farve. Udsorteringen sker mekanisk ved hjælp af en række "koste", der aktiveres på det rigtige tidspunkt. Først passerer plastaffaldet forbi en række sensorer, dernæst afgør en algoritme - baseret på input fra sensorerne – hvilken farve og type det enkelte stykke plastaffald tilhører. Endelig bliver plaststykket skubbet af transportbåndet med en "kost", så det faldet ned i den ønskede spand. I den fremstillede testmaskine er der mulighed for at udsortere 3 forskellige farver eller typer – og en fjerde spand anvendes til at opsamle det affald som ikke tilhører en af de 3 farver eller typer som systemet kigger efter.

Projektet har givet en masse viden omkring at detektere plast i både NIR og MIR områder, der er opbygges et simpelt med rimeligt effektivt mekanisk system til at "fodre" plastaffald ind i maskinen og både algoritmer, mekanik og sensorer er løbende blevet forbedret undervejs i projektet.

PolySort og PolySort PLUS projekterne har været omtalt ved en række konferencer og workshops undervejs i projektet. Det drejer sig bl.a. om:

1. "Introduktion til PolySort: Fleksibel sortering af plastaffald", Plastdagen, temadag om genanvendelse af plastaffald, Vestforbrænding, 18. juni (2015)
2. "Introduktion til PolySort: Fleksibel sortering af plastaffald", CLEAN markedsdialogmøde om plastsortering, 27. maj, København (2016)
3. "Introduktion til PolySort: Fleksibel sortering af plastaffald", indlæg ved konferencen "Plastaffald i den Cirkulære Økonomi", 28. februar, Nyborg (2017)
4. "Identification of black plastics using an upconversion based mid-infrared imaging spectrograph", indlæg ved "2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO /Europe-EQEC)", 27. juni, München (2017)
5. "Sortering af plastaffald og de fremtidige muligheder indenfor genkendelsesteknologi og sortering", indlæg ved DAKOFA konferencen "Indsamlingsordninger og sorteringsanlæg – hvad er status og hvor skal vi hen?", 22. august, København (2017)

Derudover har partnerne i PolySort og PolySort PLUS, enten samlet eller hver for sig, besøgt en række forskellige virksomheder, kommuner og affaldsbehandlere for at forklare om sorteringsmaskinen.

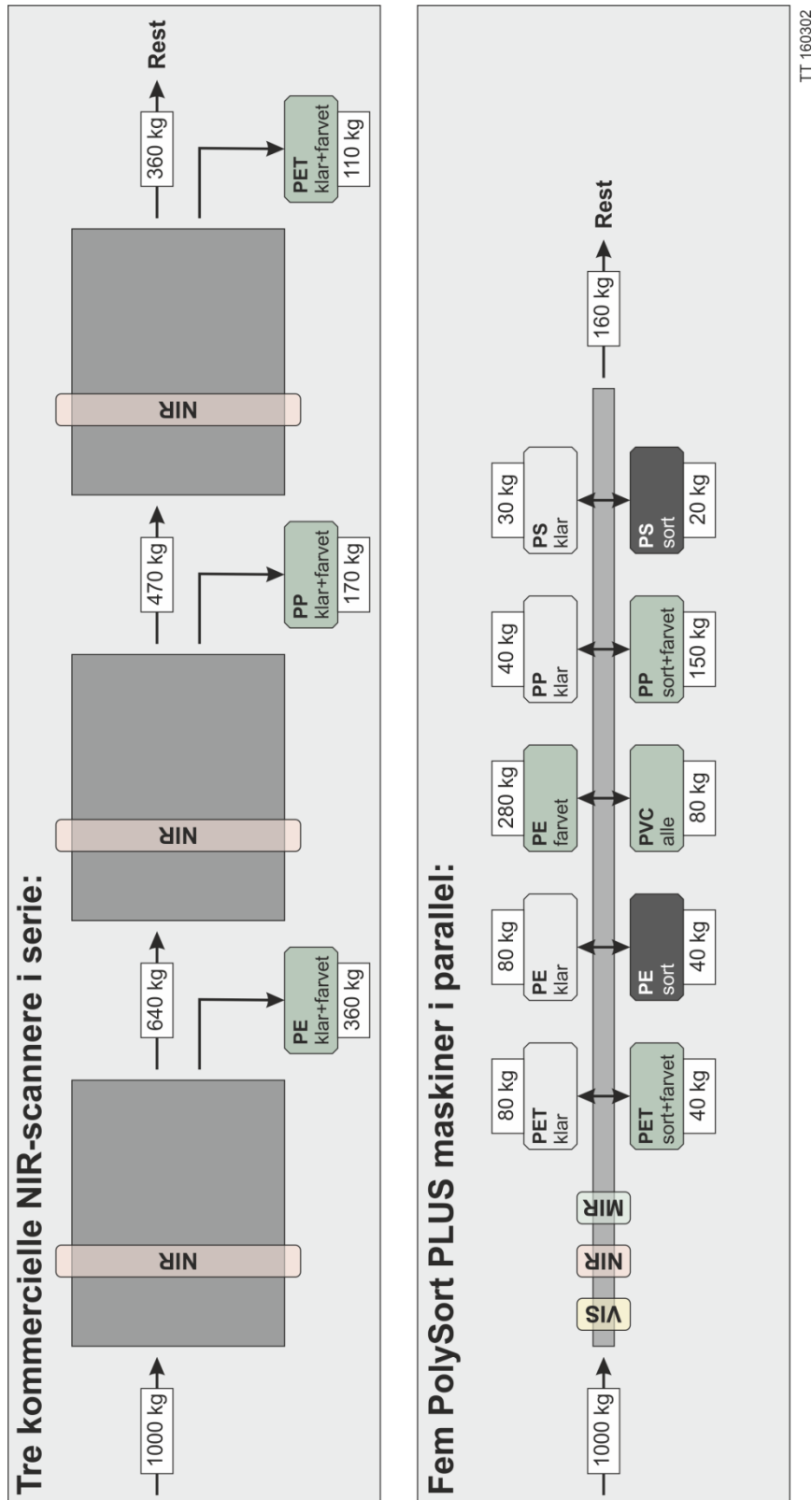
Testmaskinens kapacitet er begrænset af en række valg der er foretaget undervejs i projektet. Nogle af disse begrænsninger er uacceptable og bør ændres i fremtidige udgaver af maskinen. Det drejer sig bl.a. den tid algoritmen er om at fastlægge plasttypen, den varme plaststykkerne udsættes for ved den infrarøde sensor samt det faktum at transparente plaststykker ikke kan identificeres fordi objektdektoren er baseret på baggrundsbelysning (gennem det halvgennemsigtige transportbånd). Endelig giver materialet som transportbåndet er fremstillet af, en alt for høj friktion når plaststykkerne skal skubbes af båndet – hvad der nogle gange fører til at stykkerne bliver på båndet og dermed ikke sorteres fra korrekt. De fleste af - hvis ikke alle - disse udfordringer kan løses, og der arbejdes allerede på at forbedre maskinen på en række punkter.

Bilag 1. Referencer

- [1] "Mærkning af emballageplast", Plastindustrien i Danmark (www.plast.dk, april 2015)
- [2] "Anvendelse af termoplastmaterialer", Plastindustriens Uddannelser, AMU Syd, december (2010)
- [3] Plastic Zero rapport fra 2012, fundet på www.plastic-zero.com, med titlen "Plastic Zero action_3.1_collection_and_sorting_technologies_-_final_july_2012.pdf"
- [4] Plastic Zero rapport fra 2014, med titlen "Model for the assessment of future plastic waste amounts", hentet på www.plastic-zero.com
- [5] Talmateriale fra "Post-consumer plastic waste by polymers, Denmark 2012" modtaget fra Plastindustrien.dk af miljøkonsulent Jakob Clemen
- [6] Jonas Mortensen, master thesis, "Wasted opportunities - Plastic flows through Denmark and barriers for enhanced recycling of household plastic waste", Roskilde Universitets Center (2014)
- [7] Alam, M. K., Stanton, S. L., & Hebner, G. A. (1994) "Near-Infrared Spectroscopy and Neural Networks for Resin Identification". Spectroscopy 9, 30-40.
- [8] Alam, M. K., Stanton, S. L., & Hebner, G. A. (2007) "Resin Identification using Near-Infrared Spectroscopy and Neural Networks" in Handbook of Near-Infrared Analysis, ed. D. A. Burns, and E. W. Ciurczak, 699-709.
- [9] Hollstein, F., Wohlebe, M., Arnaiz, S., & Manjón, D. (2015), in conference proceedings page 71, OCM 2015, Optical Characterization of Materials
- [10] Masoumi, H., Safavi, S. M., & Khani, Z. (2012) "Identification and Classification of Plastic Resins using Near Infrared Reflectance Spectroscopy". World Academy of Science, Engineering and Technology 6, page 141-148
- [11] Scott, D.M., "A two-colour near-infrared sensor for sorting recycled plastic waste", Measurement Science and Technology, Vol. 6, no. 5, page 156 (1995)

Bilag 2. Husholdningsaffald

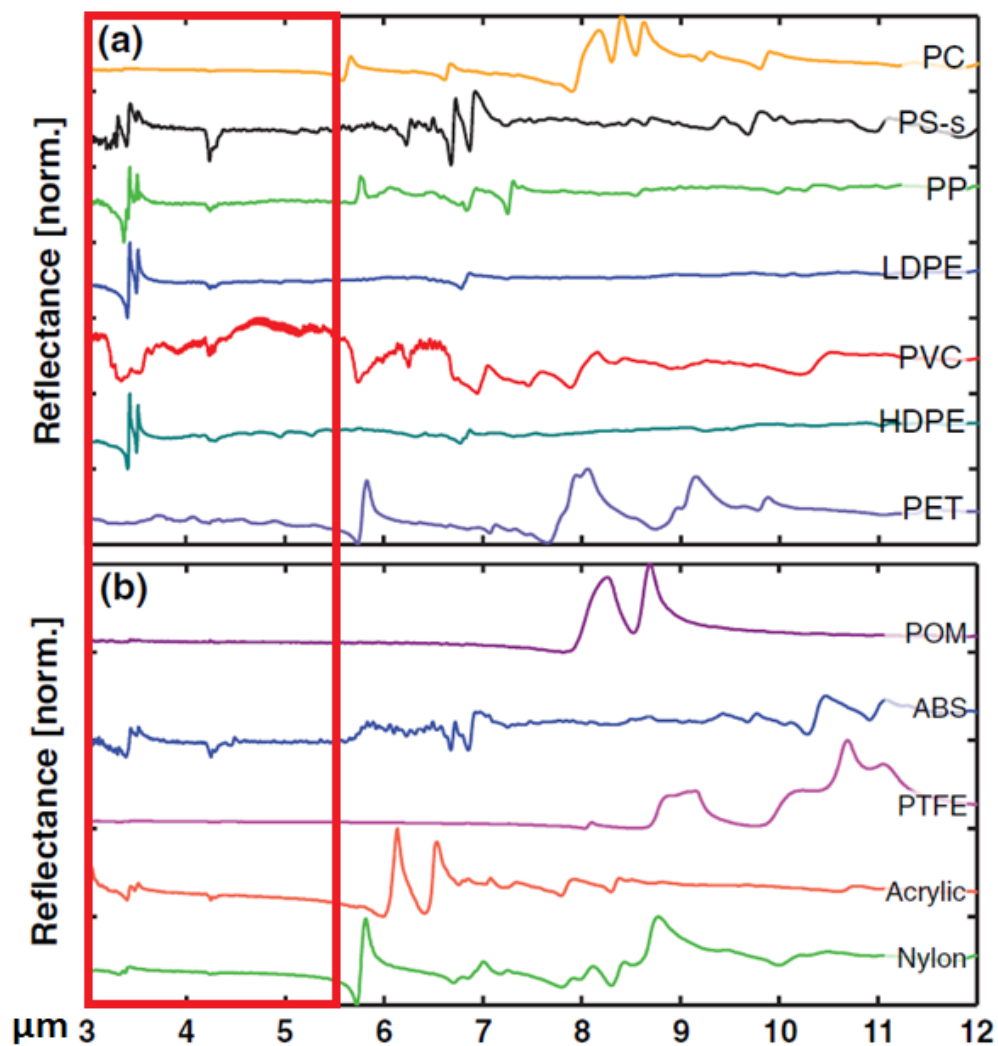
Figuren viser et tænkt sammenlignende eksempel hvor 3 NIR-scannere, og 5 PolySort maskiner, sættes til at sortere ét ton typisk dansk plastaffald fra husholdninger (se også afsnit 7.2).



Bilag 3. MIR-spektre

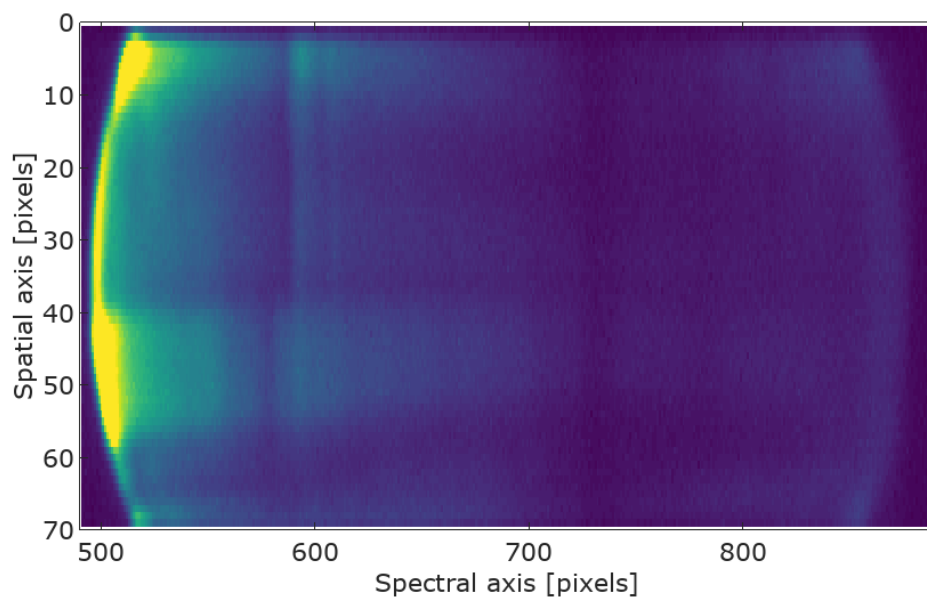
Dette bilag illustrerer nogle af de MIR spektre af sort plast der blev målt under projektet.

MIR spektre af plast



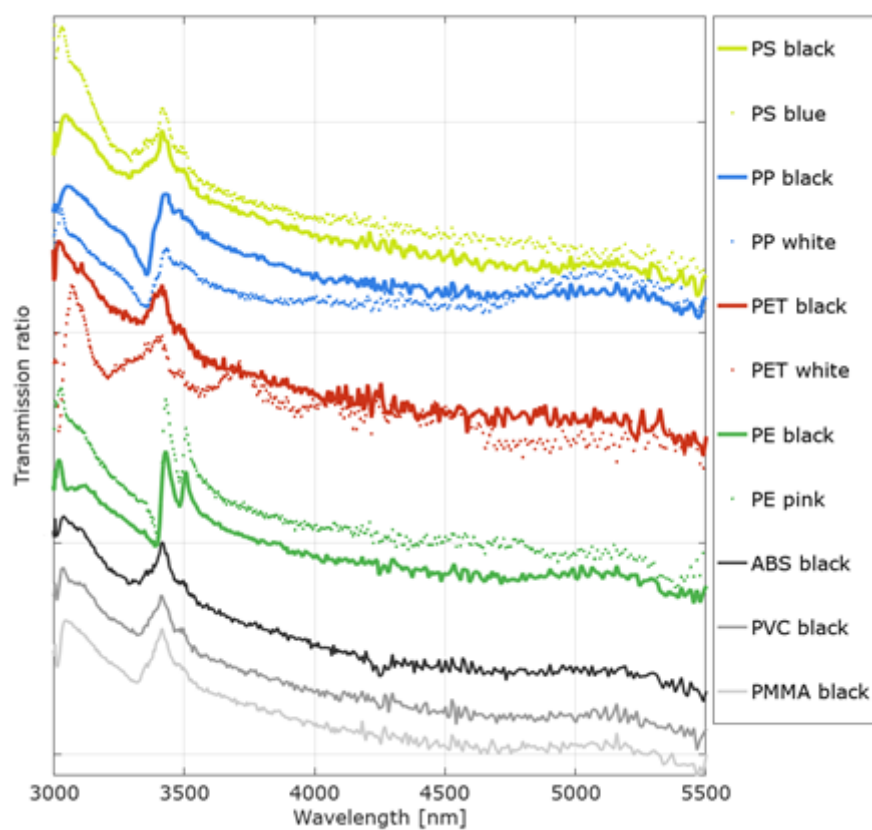
MIR reflektionsspektre af plast (FTIR målinger) ifølge litteraturen. Polysort Plus MIR linjeskanners spektre dækker området 3-5,5 μm (det røde område).

MIR billeddannelse

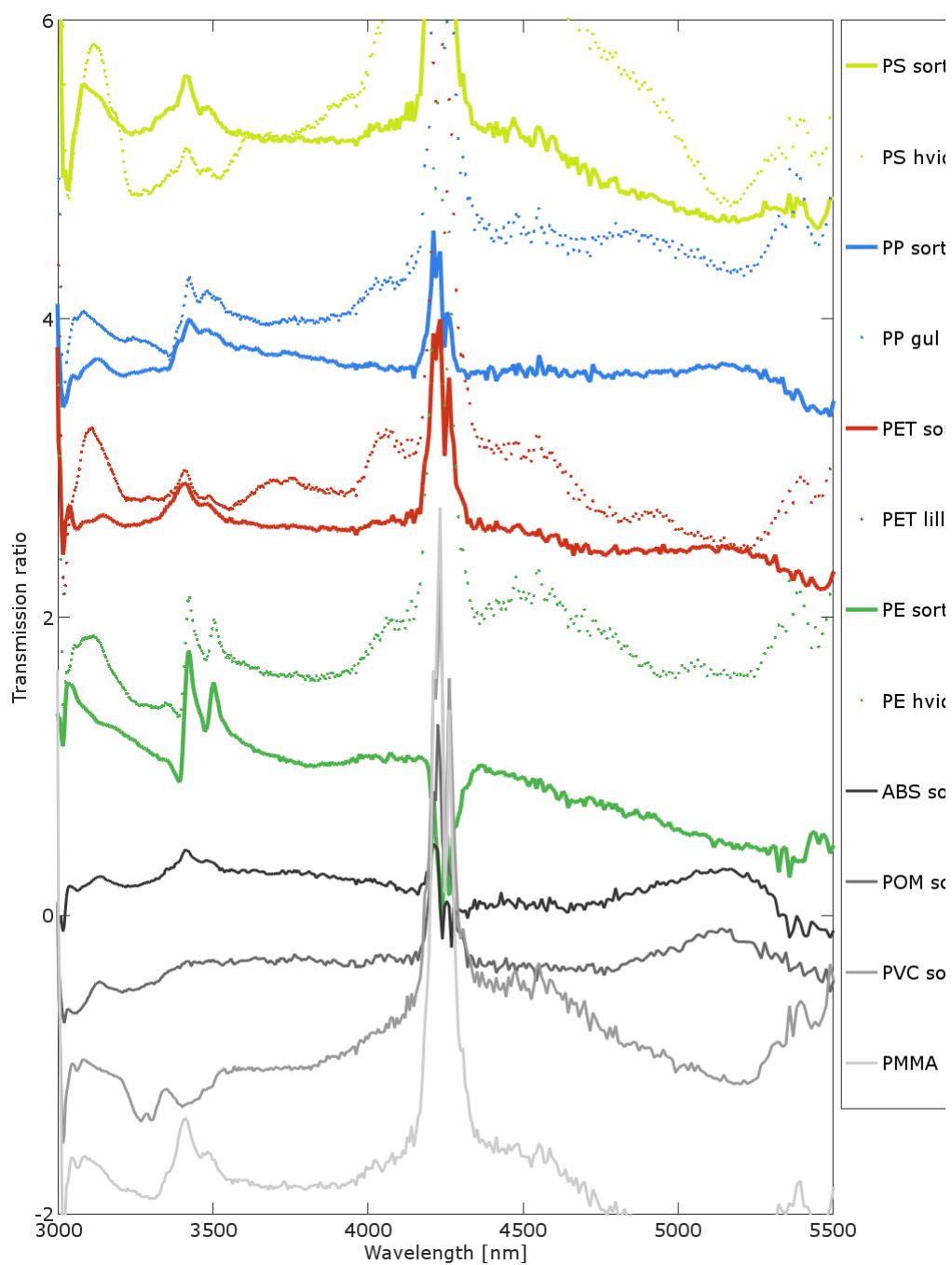


Rå-billede fra MIR linjeskanneren som spektret findes ud fra.

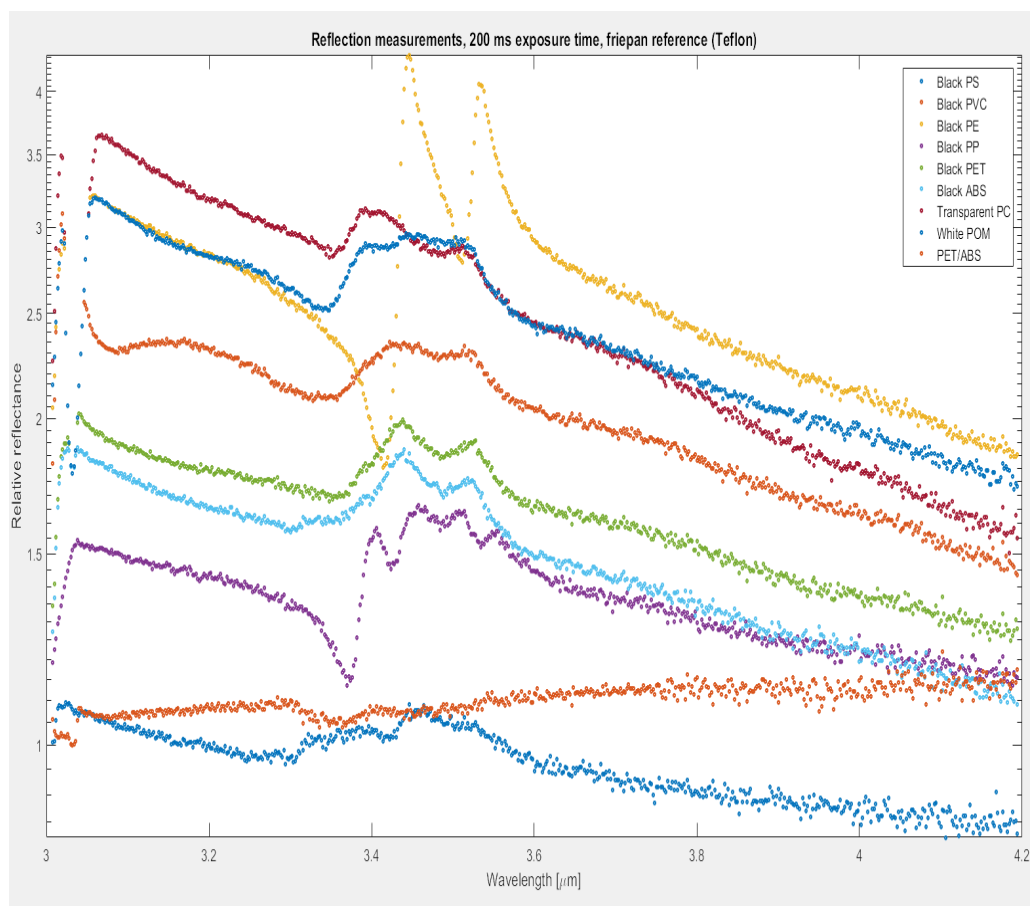
MIR spektre fra forskellige plasttyper



Spektre af sort plast vs. farvet/klar plast.

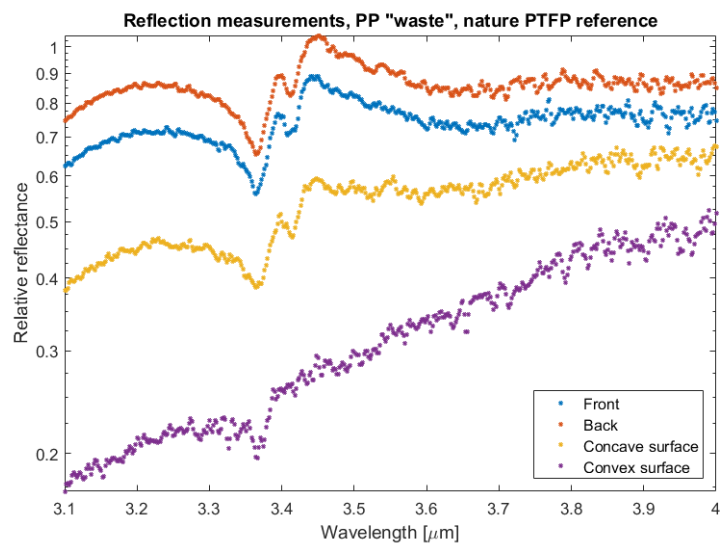


Spektre af sort plast (og farvet/klar plast) med tydeligt CO₂ bånd (omkring 4250nm).

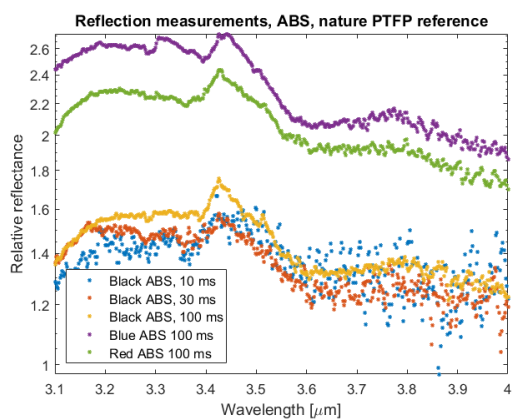
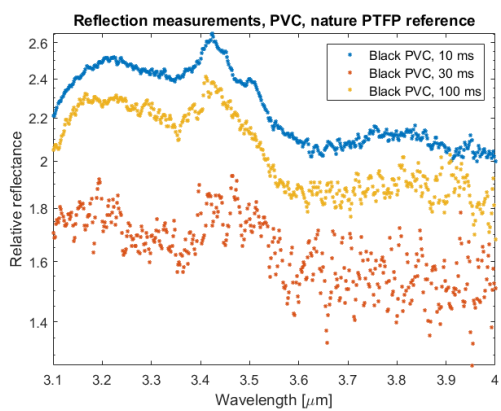
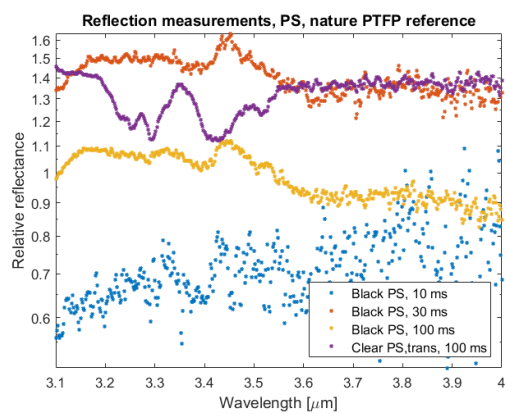
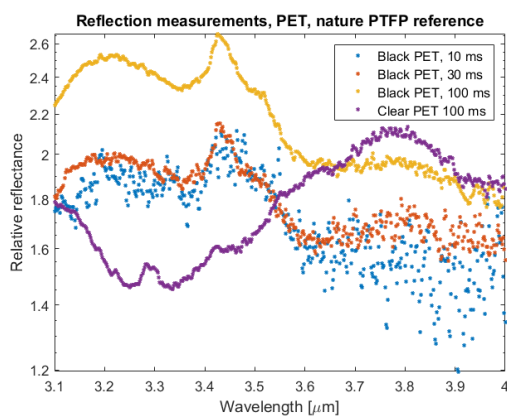
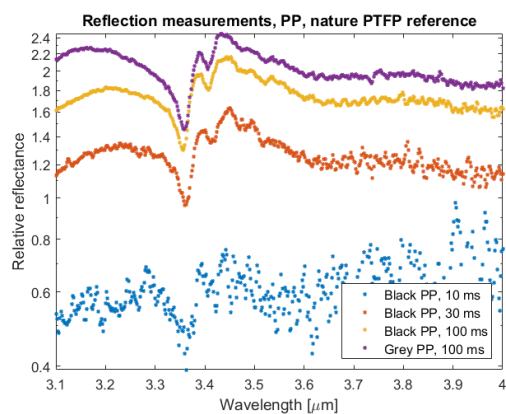
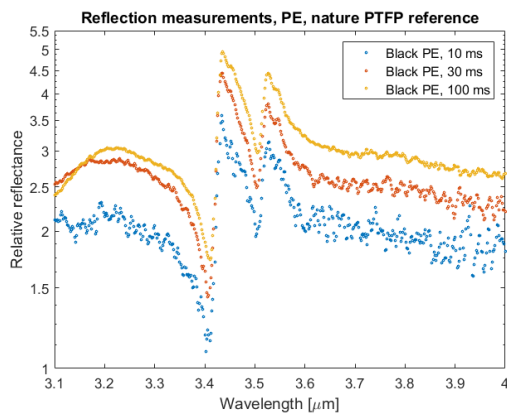


Spektre af sort plast.

MIR spektre af enkelte plasttyper



Spektre af sort PP vs. overflade valg / overflade form.

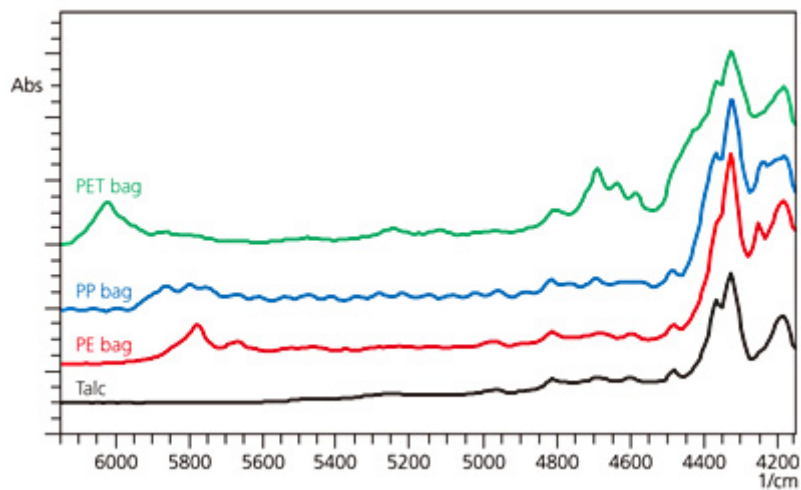


Spektre af sort plast vs. eksponeringstid

PETs spektrum i bølglængdeområdet fra 2,6 - 3,0 μm

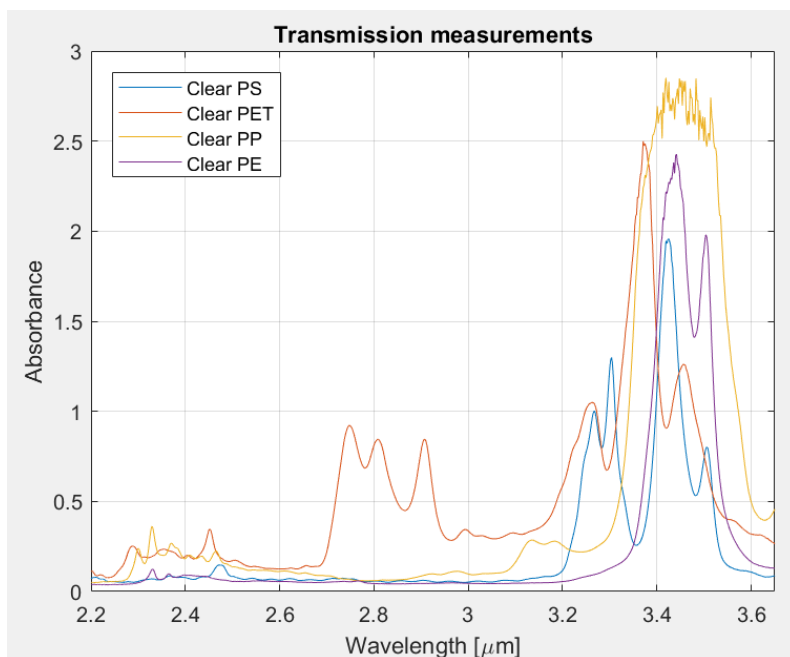
Udvides MIR-sensoren til også at dække bølglængdeområdet 2,6-3,0 μm , vil den bedre kunne identificere PET som har en markant spektralsignatur i området omkring 2,6-3,0 μm

MIR spektre af PET

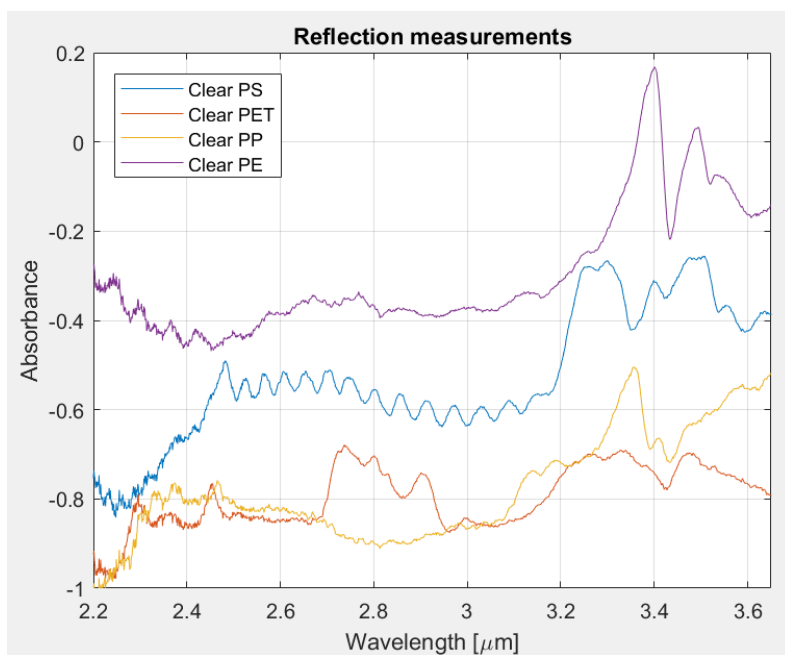


MIR spektre af plast (tredjeparts FTIR målinger).

Målinger af PETs MIR spektrum 2,2-3,6 μm



MIR transmissionsspektre af klar plast (punkt målinger af IRSee, foretaget med en helt ny sensor efter projektets afslutning). PETs markante signatur ved 2,6-3,0 μm ses tydeligt.



MIR reflektionsspektre af klar plast (punkt målinger af IRSee, ligeledes foretaget efter projektets afslutning). PETs signatur ved 2,6-3,0 μm er også markant i reflektion.

PolySort og PolySort PLUS

Denne slutrapport forklarer om baggrunden for PolySort sorteringsmaskinen, hvilke typer af plastaffald maskinen kan sortere samt gennemgår de resultater som er opnået gennem projekterne. Endelig indeholder rapporten en business case for anvendelse af PolySort maskinen til sortering af plastaffald fra husholdninger, samt nogle betragtninger omkring hvem der ellers kunne have glæde af en PolySort sorteringsmaskine.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk