

TNO-rapport

**Recycling non-ferrometaal/
kunststofcombinaties (NFKC's)**
Eindrapport deel 2:
Recyclen van TV-onderdelenfracties

Referentienummer 94-431
Dossiernummer 112322-23558
Datum december 1994
NP

Auteurs
C. Verschut
Ing. B.J.N. Linger
J.C. Pisa

Trefwoorden
— composition
— disassembling
— electronic scrap
— grinding
— non-ferro
— recycling
— separation
— wastes

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Bestemd voor
Programmabureau IOP-MT/Recycling
Senter
Drs. K.E. Knol
Postbus 30432
2500 GS Den Haag

In het kader van
IOP-Milieutechnologie/Recycling
(Projectnummer 91916)

Voorwoord

De centrale doelstelling van het afvalbeleid, afgeleid uit het Nationaal Milieu Plan (NMP), kan als volgt worden samengevat:

“Minder afval en lekvrij verwijderen”.

Om deze doelstelling te realiseren is een plan van aanpak geformuleerd dat onder andere materiaalhergebruik moet bevorderen.

Om dit materiaalhergebruik mogelijk te maken, is innovatief onderzoek op het gebied van technieken voor het terugwinnen van vaste materialen uit bulkafvalstromen noodzakelijk. In het kader van het Innovatiegericht Onderzoek Programma-Milieu-technologie (IOP-MT)/Recycling is, binnen de onderzoekslijn Bulkscheiding en Herkennings technieken, door TNO-Milieu en Energie in samenwerking met TU-Delft, faculteit Mijnbouwkunde en Petroleumwinning, een onderzoek uitgevoerd met als doelstelling het ‘concentreren van afzetbare materialen’, zoals die in audiovisuele apparatuur voorkomen. De titel van dit onderzoek is:

“Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)”.

Dit onderzoek met een looptijd van drie jaar is gestart op 01-12-1991. Binnen dit onderzoek zijn verwerkingsroutes voor audiovisuele apparatuur ontwikkeld waarmee de hierin aanwezige materialen kunnen worden geconcentreerd tot afzetbare grondstoffen. Het onderzoek is afgerond en de gegevens verkregen uit dit onderzoek zijn weer gegeven in een drietal TNO eindrapporten. In de afzonderlijke delen worden de volgende resultaten gepresenteerd:

Deel 1: “Karakterisering van TV toestellen/Selectieve demontage van TV onderdelen”. TNO-rapport nr. 94-442.

Enige honderden TV's zijn vergaand gedemonteerd en uit de hierbij verkregen gegevens zijn in combinatie met andere gegevens de onderdeel- en materiaalsamenstellingen van TV's nauwkeurig in kaart gebracht. Vervolgens is met deze kennis berekend welke TV onderdelen in relatie tot het hoofddoel ‘concentreren van materialen’, wel en niet moeten worden gedemonteerd.

Deel 2: “Recyclen van TV onderdelenfracties”. TNO-rapport nr. 94-431.

Met de, via demontage van enige honderden TV's, verkregen onderdelenfracties zijn een groot aantal verkleinings- en scheidingstechnieken onderzocht. Uit de verkregen resultaten is een voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van TV onderdelenfracties afgeleid.

Deel 3: “Werkgebied van droge deeltjes scheidingsapparatuur”. TNO-rapport nr. R95-032.

De effecten van apparaat- en materiaalvariabelen op de prestaties van onder andere de luchttafel, de zig-zagzifter, de Eddy current-scheider, de elektrostatische scheider zijn onderzocht. De materialen, die zijn gebruikt in dit onderzoek zijn veelal mengsels van kunststoffen en non-ferrometalen, afkomstig uit praktijkafvalstromen.

Samenvatting

In de huidige samenleving is het gebruik van allerlei elektrische apparatuur de gewoonste zaak van de wereld. Wasmachines, koelkasten, TV's, radio's, videorecorders en CD-spelers zijn niet langer luxe artikelen, maar behoren tot de basisuitrusting van huishoudens. Na een bepaalde periode van gebruik worden deze apparaten echter afgedankt. In Nederland alleen al komt per jaar ongeveer 30.000 ton 'bruingoed' (audio/video-apparatuur) en ongeveer 85.000 ton 'witgoed' (wasmachines/koelkasten en dergelijke) als afval vrij.

De overheid heeft een plan van aanpak opgesteld, dat moet resulteren in preventie en hergebruik van afval. Daarin wordt per afvalstroom aangegeven wat er in het jaar 2000 moet zijn gerealiseerd, bijvoorbeeld welk deel voor hergebruik in aanmerking komt en welk deel moet worden gestort of verbrand. Voor 'wit'- en 'bruingoed' is de taakstelling 80 à 85% materiaalhergebruik. Om deze taakstelling te realiseren wordt overleg gepleegd tussen overheid, producenten/importeurs en gebruikers.

Daarnaast wordt door diverse onderzoeksinstituten onderzoek uitgevoerd naar verwerkingsroutes, waardoor hergebruik van onderdelen of materialen mogelijk wordt. Direct en indirect hebben al deze activiteiten de volgende positieve milieu-effecten als doel.

- Minder gebruik van grondstoffen, energie en ruimte.
- Minder kans op vervuiling van lucht, water en bodem.

In het kader van het Innovatiegericht Onderzoek Programma-Milieutechnologie (IOP-MT)/recycling is ervoor gekozen de problematiek van het scheiden van complexe afvalstromen, zoals 'bruingoed', op een meer fundamentele manier aan te pakken.

In opdracht van SENTER heeft TNO, afdeling Milieutechnologie, een onderzoek uitgevoerd waarbij verwerkingsroutes zijn ontwikkeld om non-ferrometalen en kunststoffen, afkomstig uit complexe afval, zoals bijvoorbeeld bruingoed, te kunnen terugwinnen. Deze verwerkingsroutes hebben als hoofddoel het 'concentreren van materialen' en bestaan in principe uit een combinatie van de volgende drie processtappen:

- selectieve demontage;
- verkleinen/ontsluiten;
- scheiden.

De noodzaak om materialen te concentreren is direct of indirect gebaseerd op economische motieven. Enerzijds worden materialen voor hergebruik teruggewonnen die een zekere marktwaarde vertegenwoordigen. Anderzijds worden milieubelastende materialen geconcentreerd, waardoor de verwerkingskosten hiervan (chemisch, thermisch, storten) worden verlaagd.

Door middel van een goede onderlinge afstemming van de drie processtappen kan de kosten/baten-verhouding voor het recyclen van complexe afval worden geoptimaliseerd.

Bij de uitvoering van dit onderzoek is als voorbeeld afvalstroom gekozen voor het produkt TV; dit met name vanwege het gegeven dat dit produkt ruim 50% van het gewicht van de bruingoed afvalstroom vertegenwoordigt.

Voor de processtap 'selectieve demontage' zijn enige honderden TV's vergaand gedemonteerd. Uit de hiermee verkregen gegevens zijn in combinatie met literatuurgegevens de materiaalsamenstellingen van TV's berekend (zie eindrapport deel 1 (ref. nr. 94-442) van het project 'Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)).

Met deze kennis kan voor de processtap 'selectieve demontage' worden aangegeven welke onderdelenfracties in het kader van het hoofddoel 'concentreren' moeten worden verwijderd. Hieruit blijkt dat door selectieve demontage van de onderdelen:

- beeldbuis, omkasting, panelen en deflectie-unit - fracties worden verkregen waarin 'concentratie van materialen' wordt gerealiseerd. Verdergaande demontage draagt niet wezenlijk bij aan het 'concentreren van materialen' en is daarom uit kostenoverwegingen niet aan te bevelen.

Voor het uitvoeren van het onderzoek voor de processtappen 'verkleinen/ontsluiten' en 'scheiden' zijn drie onderdelenfracties via selectieve demontage van enige honderden TV's geproduceerd. Deze onderdelenfracties zijn:

- a. deflectie-unit;
- b. onderdelenmix (totale TV exclusief beeldbuis, omkasting en panelen);
- c. panelen.

Het doel van de verwerking van deze onderdelenfracties is het terugwinnen van afzetbare materialen. Daarnaast is als referentie een onderzoek met een totale TV uitgevoerd. Dit om na te gaan of, ook zonder de relatief kostbare selectieve demontage processtap, de aanwezige materialen in de TV voldoende zuiver kunnen worden teruggewonnen. Voor het verkleinings- en scheidingsonderzoek zijn in principe combinaties van bestaande of door TNO geoptimaliseerde apparatuur toegepast. Via dit onderzoek zijn gegevens gegenereerd over de toepasbaarheid van apparatuur voor het 'concentreren van materialen' tot afzetbare producten. Met deze kennis kunnen voorkeur verwerkingsroutes voor het recyclen van elektronica afvallen worden geformuleerd.

De conclusies afgeleid uit de resultaten van het onderzoek zijn:

- De verwerkingsroute die wordt toegepast voor het opwerken van 'bruingoed' afvallen wordt in principe gedicteerd door de relatie prijs versus kwaliteit die de afzetmarkt aan teruggewonnen materialen stelt.

Voor ferro- en non-ferrometalen bevattende afvallen is al een afzet mogelijk voor fracties met relatief lage metaalconcentraties. Indien afvallen edele metalen bevatten zijn deze reeds met concentraties van $< 0,05$ gew% edelmetaal afzetbaar. Verhoging van de metaalconcentraties in afvallen wordt alleen uitgevoerd indien dit economisch interessant is. Voor kunststofafvallen echter is momenteel de afzet van licht verontreinigde kunststoffracties al problematisch. Hier worden zuiverheden van meer dan 99% geëist. Verhogen van de zuiverheden van kunststofafvallen zal, ook al is dit theoretisch haalbaar, meestal economisch niet aantrekkelijk zijn.

- Voor de realisatie van de taakstelling van 80 à 85% materiaalhergebruik, is voor beeldbuis bevattend 'bruingoed' minstens de selectieve demontage van de beeldbuis en de omkasting noodzakelijk. De resultaten van het onderzoek met betrekking tot de verwerking van de totale TV hebben aangetoond dat slechts 25% materiaalhergebruik mogelijk is. Dit vanwege het gegeven dat het glas en de kunststoffractie, die worden teruggewonnen bij de verwerking van totale TV's, niet afzetbaar zijn vanwege te lage zuiverheden.
- Bij verwerking van de, via selectieve demontage van TV's verkregen, onderdelenfracties: deflectie-unit, onderdelenmix (totale TV exclusief beeldbuis, omkasting en panelen) en panelen is een materiaalhergebruik van 70 à 80% realiseerbaar. De teruggewonnen materialen zijn ferro- en non-ferro concentraten met een zuiverheid van meer dan 95%. De kunststof bevattende restfractie is naar verwachting niet afzetbaar omdat hierin te veel verontreinigingen aanwezig zijn.
- De voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de, via selectieve demontage van TV's verkregen, onderdelenfracties bestaat uit de volgende processtappen:
 - voorverkleinen met hoog toerental maalapparatuur;
 - verwijderen van ferrofractie met bovenband- en koprolmagneet;

Summary

In our present society the use of all types of electrical equipment is very widespread. Washing machines, refrigerators, TVs, radios, VCRs and CD players are no longer luxury articles, but represent fundamental household equipment. After a certain period of use, however, this equipment is scrapped. In the Netherlands alone, approx. 30,000 tonnes of brown goods (audio/video equipment) and around 85,000 tonnes of white goods (washing machines, refrigerators and such like) are disposed of annually as waste.

The Government has drafted a plan of action aimed at prevention and re-use of waste. This specifies for each waste stream what must be achieved by the year 2000, e.g. what proportion must be dealt with by recycling, and what proportion will be landfilled or incinerated. The target for white and brown goods is for 80 - 85% recycling of materials. Consultation has taken place between government, producers/importers and users to achieve this target.

In addition, research has been carried out by various research bodies into processing routes that enable components or materials to be recycled. All these activities have the following positive environmental effects as direct and indirect targets:

- Reduced consumption of raw materials, energy and space.
- Reduced rise in air, water and soil pollution.

It was decided to approach the problem of the separation of complex waste streams such as brown goods in a more fundamental manner within the context of the recycling section of the Innovative Research Program on Environmental Technology [*Innovatiegericht Onderzoek Programma-Milieutechnologie - IOP-MT*].

TNO Environmental Technology, a division of the Dutch Organization for Applied Scientific Research (TNO), carried out a research on behalf of SENTER in which processing routes were developed to enable non-ferrous metals and plastics to be reclaimed from complex waste such as brown goods. The main aim of these processing routes is to 'concentrate materials', and they consist in principle of a combination of three process stages:

- selective dismantling;
- reduction/detachment;
- size reduction/opening-up;
- separation.

The necessity for concentrating materials is directly or indirectly based on economic motives. On the one hand, materials are reclaimed for recycling that have a definite market value. On the other hand, environmentally polluting materials are concentrated, as a result of which the treatment costs for this (chemical treatment, incineration, landfill) are reduced.

By ensuring good mutual co-ordination of the three process stages the cost/benefit ratio for recycling complex waste can be optimised.

The sample waste stream chosen when carrying out this research was TV sets, in particular because this product represents around 50% of the weight of the brown goods waste stream.

For the 'selective dismantling' process stage a few hundred TV sets were substantially dismantled. The material compositions of TVs were calculated from the resulting data in conjunction with data from the literature (see final report, part 1, ref. no. 94-442) of the 'Recycling of non-ferrous metal/plastic combinations' project.

Using this knowledge, it is possible to state what component fractions must be dismantled in the context of the 'concentration of materials' main goal. From this it can be seen that through selective dismantling of the following components:

- CRT, housing, printed circuit boards and deflection unit fractions can be obtained in which the 'concentration of materials' is achieved. Further dismantling does not contribute greatly to the 'concentration of materials' and is therefore not recommended because of cost considerations.

To carry out the research for the 'size reduction/opening-up' and 'separation' stages three component fractions were produced by means of selective dismantling of a few hundred TVs. The component fractions in question are:

- a. deflection unit;
- b. component mix (entire TV minus CRT, housing and printed circuit boards);
- c. printed circuit boards.

The objective of processing these component fractions is to reclaim saleable materials. In addition, a trial was carried out with an entire TV for reference purposes. This was done to establish whether, without the relatively costly selective dismantling process stage, the materials present in the TV can be reclaimed sufficiently pure. For the size reduction and separation trials, combinations of existing equipment and equipment optimised by TNO were used in principle. This research yielded data on the usability of equipment for the 'concentration of materials' into saleable products. This knowledge will enable preferred processing routes for the recycling of electronic waste to be formulated.

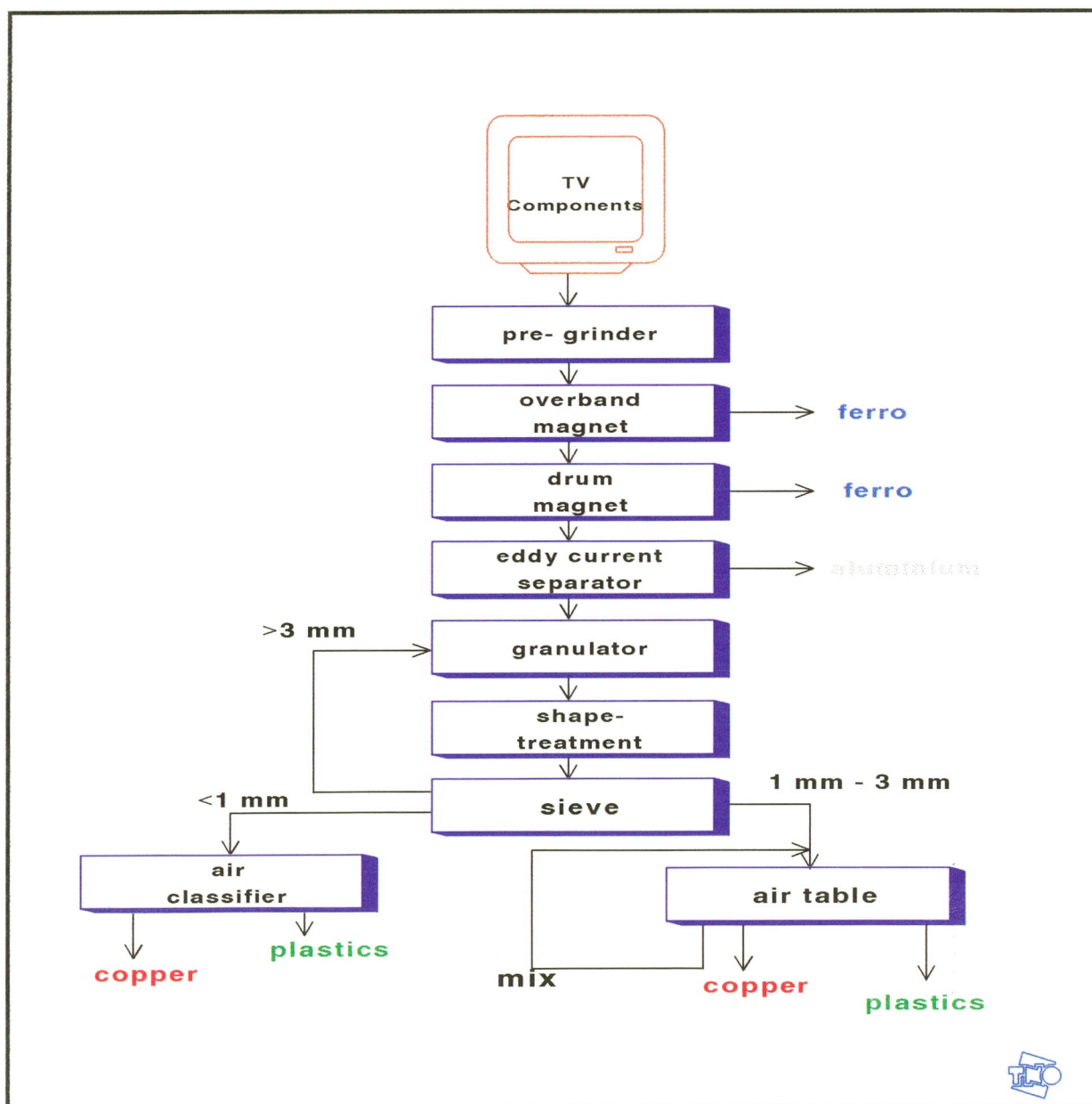
The conclusions derived from the results of the research are:

- The processing route used for reprocessing brown goods waste is dictated in principle by the price/quality ratio set by the market for reclaimed materials.
It is already possible to sell waste containing relatively low concentrations of ferrous and non-ferrous metals. Waste that contains precious metals is saleable at concentrations as low as $< 0.05\%$ w/w precious metals. The metal concentration in waste is only increased if this is economically worthwhile. In the case of plastic waste, however, the sale of even slightly impure plastic fractions is problematic at present.
Purity in excess of 99% is required for these materials. Even if theoretically feasible, it will not usually be economically viable to increase the purity of plastic waste.
- With brown goods containing CRTs the selective removal of at least the CRT and the housing is necessary if the goal of 80 - 85% material recycling is to be met. The results of the research relating to the processing of entire TVs showed that only 25% material recycling is feasible. The reason for this is that the glass and the plastic fraction reclaimed in the processing of entire TVs cannot be sold because of insufficient purity.
- A material recycling rate of 70 - 80% is achievable in the case of the processing of the deflection unit, component mix (entire TV minus the CRT, housing and printed circuit boards) and printed circuit boards component fractions obtained by means of selective dismantling of TVs. The reclaimed materials are ferrous and non-ferrous concentrates with a purity in excess of 95%. It is expected that it will not be possible to sell the residual, plastic-containing fraction because it contains too many impurities.
- The preferred processing route for recycling component fractions obtained by the selective dismantling of TVs consists of the following process stages.
 - preliminary size reduction using high-speed grinding equipment;
 - removal of the ferrous fraction using a overband and drum magnet;
 - removal of coarse aluminium using the Eddy current separator;

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties

- subsequent size reduction using a granulator;
- shape treatment with impact crushers;
- separation into particle sizes of < 1 mm, 1 - 3 mm and > 3 mm with sieves;
- subsequent reduction of > 3 mm sieve fraction using granulator;
- separation of < 1 mm sieve fraction using zigzag air classifier;
- separation of 1 - 3 mm sieve fraction with an air table.

A plan of the process is shown in the figure below.



Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	5
Summary	9
1 Inleiding	15
2 Technieken voor het voorverkleinen/verkleinen van TV onderdelenfracties	17
2.1 Algemeen.....	17
2.2 Voorverkleinen.....	17
2.3 Naverkleinen.....	18
2.4 Vormbehandelen.....	18
3 Technieken voor het scheiden van verkleinde TV onderdelenfracties	19
3.1 Algemeen.....	19
3.2 Zeeftechniek	19
3.3 Windzifttechniek.....	20
3.4 Luchttafeltechniek.....	21
3.5 Luchtjigtechniek	22
3.6 Ferromagnetische techniek	22
3.7 Wervelstroom (Eddy current) techniek.....	23
3.8 Elektrostatische techniek	23
3.9 Vrije val techniek.....	24
3.10 Toepassingsgebied, capaciteit en kosten van scheidingstechnieken	25
4 Recyclen van de deflectie-unit	27
4.1 Algemeen.....	29
4.2 Voorverkleinen/ontsluiten van de deflectie-unit.....	29
4.3 Scheiden van de voorverkleinde deflectie-unit in materiaalstromen.....	30
4.4 Evaluatie.....	36
4.5 Voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de deflectie-unit ...	36
5 Recyclen van de onderdelenmix	39
5.1 Algemeen.....	41
5.2 Voorverkleinen/ontsluiten van de onderdelenmix	41
5.3 Scheiden van de voorverkleinde onderdelenmix in materiaalstromen.....	42
5.3.1 Afscheiden van ferrofractie.....	43
5.3.2 Afscheiden van grove non-ferrofractie.....	44
5.3.3 Afscheiden van fijne non-ferrofracties	44
5.4 Evaluatie.....	57
5.5 Voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de onderdelenmix.....	58

6	Recyclen van de panelen	61
6.1	Algemeen	63
6.2	Voorverkleinen/ontsluiten van het paneel	63
6.3	Scheiden van de voorverkleinde panelen in materiaalstromen	64
6.3.1	Afscheiden van ferrofractie	65
6.3.2	Afscheiden van grove non-ferrofractie	66
6.3.3	Afscheiden van fijne non-ferrofracties	66
6.4	Gedetailleerde samenstelling van de panelen	70
6.4.1	Samenstelling van de fijne non-ferrofractie afkomstig uit panelen	70
6.4.2	Aanwezigheid van potentieel milieubelastende materialen in panelen	71
6.4.3	PCB gehalten in afgescheiden fracties van panelen	71
6.5	Evaluatie	72
6.6	Voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de panelen	73
7	Recyclen van de totale TV	75
7.1	Algemeen	77
7.2	Voorverkleinen/ontsluiten van de totale TV	77
7.3	Scheiden van de voorverkleinde TV's in materiaalstromen	78
7.3.1	Afscheiden van ferrofractie	79
7.3.2	Afscheiden van grove non-ferrofractie	80
7.3.3	Afscheiden van fijne non-ferrofractie	81
7.3.4	Afscheiden van glasfractie	81
7.4	Evaluatie	83
8	Conclusies	85
9	Literatuur	87
10	Verantwoording	91

1 Inleiding

In opdracht van SENTER heeft TNO, afdeling Milieutechnologie, in het kader van het Innovatiegericht Onderzoek Programma-Milieutechnologie (IOP-MT)/Recycling een onderzoek uitgevoerd. Op basis van de resultaten van dit onderzoek zijn verwerkingsroutes ontwikkeld waardoor non-ferrometalen en kunststoffen, afkomstig uit complexe afvallen, zoals bijvoorbeeld bruingoed, kunnen worden teruggewonnen. Deze verwerkingsroutes hebben als hoofddoel het 'concentreren van materialen' en bestaan in principe uit een combinatie van de drie processtappen:

- selectieve demontage;
- verkleinen/ontsluiten;
- scheiden.

De noodzaak om materialen te concentreren is direct of indirect gebaseerd op economische motieven. Enerzijds worden materialen voor hergebruik teruggewonnen die een zekere marktwaarde vertegenwoordigen. Anderzijds worden milieubelastende materialen geconcentreerd waardoor de opwerkingskosten hiervan (chemisch, thermisch, storten) worden verlaagd.

Door middel van een goede onderlinge afstemming van de drie processtappen kan de kosten/baten verhouding voor het recyclen van complexe afvallen worden geoptimaliseerd.

Bij de uitvoering van dit onderzoek is als voorbeeld afvalstroom gekozen voor het produkt TV; dit met name vanwege het gegeven dat dit produkt ruim 50% van het gewicht van de bruingoed afvalstroom vertegenwoordigt.

Voor de processtap 'selectieve demontage' zijn enige honderden TV's vergaand gedemonteerd. Uit de hiermee verkregen gegevens zijn in combinatie met literatuurgegevens de materiaalsamenstellingen van TV's berekend. Met deze kennis kan voor de processtap 'selectieve demontage' worden aangegeven welke onderdelenfracties in het kader van het hoofddoel 'concentreren' moeten worden verwijderd.

Dit eindrapport, deel 2 van het IOP-project 'Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)', bevat de resultaten van het verkleinings- en scheidingsonderzoek dat is uitgevoerd met de volgende TV onderdelenfracties:

- deflectie-unit;
- onderdelenmix bestaande uit deflectie-unit, bekabeling, speakers, trafo, degausing ring, netsnoer en rest;
- panelen;
- totale TV toestel.

In hoofdstuk 2 worden de technieken, toegepast voor het verkleinen van TV onderdelenfracties behandeld. De technieken toegepast voor het scheiden van de verkleinde TV onderdelenfracties in materiaalstromen worden in hoofdstuk 3 behandeld. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 tot en met 7 de resultaten van het onderzoek met betrekking tot het recyclen van de diverse onderdelenfracties gepresenteerd. Tenslotte bevat hoofdstuk 8 de conclusies.

2 Technieken voor het voorverkleinen/verkleinen van TV onderdelenfracties

2.1 Algemeen

Het voorverkleinen/verkleinen van TV onderdelenfracties heeft als doelen:

- Het hanteerbaar maken van de onderdelen voor vervolg processtappen zoals verwijderen van de grote metaaldelen en scheiden van het mengsel van metalen/kunststoffen.
- Het ontsluiten van materialen.

Met ontsluiten wordt bedoeld het verbreken van verbindingen tussen materialen.

2.2 Voorverkleinen

Voor het onderzoeken van de prestaties van voorverkleiners zijn vier apparaten, die qua maalsysteem verschillen, uitgetest.

Deze apparaten zijn:

- Alpine UZ type 40/125;
- Moco AZ 121;
- Lindemann ZB 90*73;
- Scandinavian Recycling ringshredder 8/10.

De voorverkleiners van Alpine en Moco zijn laag toerental (< 100 rpm) machines waarin materialen door messenparen worden gesneden. De Lindemann en Scandinavian Recycling voorverkleiners zijn hoog toerental (> 500 rpm) machines waarin de materialen met hamers of ringen worden stuk geslagen.

In tabel 2.1 worden enige algemene gegevens van deze voorverkleiners gegeven.

Tabel 2.1 Gegevens voorverkleiners

Voorverkleiner type	Rooster soort/afmeting	Capaciteit (ton/uur)	Energieverbruik (kWh/ton)
Alpine UZ 40/125	Staaf 100 mm	3 - 5	10
Moco AZ 121	Geen messen 45 mm	1 - 2	10
Lindemann ZB 90x73	Sleuven 30 x 60 mm	2 - 3	25
SR ringshredder 8/10	Sleuven 100 x 30 mm	5 - 7	25

De produkten verkregen uit deze voorverkleiners worden geanalyseerd op deeltjesgrootte verdeling en percentage ontsluiting van de materialen in de onderdelen. De resultaten van deze analyses zijn in de hoofdstukken 4 tot en met 7 weergegeven.

De samenvattende conclusies van dit onderzoek zijn:

Ten aanzien van het voorverkleinen/ontsluiten van complexe goederen presteren de hoog toerental machines aanzienlijk beter dan de laag toerental machines. Na één maalstap is bij een hoge capaciteit een gemiddelde deeltjesgrootte van < 10 mm realiseerbaar en wordt het materiaal voor vrijwel 100% ontsloten. Hierdoor zijn na deze voorverkleinstap de ferro en de grotere non-ferrodelen compleet te verwijderen. De ontsluiting bij de laag toerental machines is meestal $< 75\%$. Ook na meerdere passages over deze machines wordt geen optimale ontsluiting bereikt en moet alsnog voor voldoende ontsluiting aanvullend een verkleining met een hoog toerental molen plaatsvinden.

2.3 Naverkleinen

Voor het succesvol kunnen scheiden van materialenmengsels zijn deeltjesgrootte en deeltjesvorm belangrijke parameters. Na de onder 2.2 beschreven voorverkleining is, met uitzondering van het afscheiden van grotere metaaldelen met behulp van magneten of Eddy current apparatuur, de hiermee gerealiseerde deeltjesgrootte niet optimaal voor het toepassen van scheidingstechnieken. Een verdere naverkleining respectievelijk vormaanpassing moet worden uitgevoerd. Hiervoor worden meestal zogenaamde granulatoren toegepast. Het principe van deze molens is dat de materialen worden geknipt tussen messenparen. De messen worden aangebracht op de sneldraaiende rotor (dynamische messen) en in het maalhuis (statische messen). Granulatoren zijn gevoelig voor beschadiging en slijtage van de messen en worden in principe alleen toegepast voor het vermalen van relatief zachte produkten. Ook de zachtere metalen, zoals koper en aluminium, kunnen met deze granulatoren succesvol worden verkleind. De in het maalhuis geplaatste zeefconstructie bepaald de maximale stukgrootte van het maalgoed. De minimale deeltjesgrootte die met deze granulatoren kan worden gerealiseerd ligt op circa 1 mm.

2.4 Vormbehandelen

Bij het naverkleinen van materialenmengsels met een onder 2.3 beschreven granulator worden dunne (< 1 mm) koperdraadjes in stukjes geknipt. De lengte van deze stukjes kan oplopen tot > 10 mm. Door deze dunne draadachtige vorm hebben deze stukjes sterk de neiging om in elkaar te haken. Dit werkt verstrend bij toepassing van alle daaropvolgende scheidingstechnieken waarbij het te scheiden mengsel in een laag wordt verwerkt. Voor het kunnen toepassen van deze scheidingstechnieken is het noodzakelijk dat de deeltjesvorm wordt aangepast. Deze aanpassing, waarbij de draadachtige vorm wordt omgezet in een meer bolachtige vorm, kan worden uitgevoerd met een zogenaamde prallmolen voorzien van een speciaal maalwerk met maalbaan.

3 Technieken voor het scheiden van verkleinde TV onderdelenfracties

3.1 Algemeen

Voor het afscheiden/scheiden van non-ferro's uit mengsels maakt men gebruik van verschillen in fysische eigenschappen waardoor materialenmengsels te splitsen zijn in deelstromen.

In principe komen alle fysisch/mechanische eigenschappen van materialen in aanmerking om scheiding tussen materialen te realiseren. De meest toegepaste scheidingstechnieken zijn echter gebaseerd op verschillen in de waarden van enkele fysische materiaaleigenschappen en deeltjeseigenschappen zoals vorm, dichtheid, magnetische, elektrische en optische eigenschappen.

Met behulp van deze scheidingstechnieken worden in het algemeen materialen niet voor 100% van elkaar gescheiden. Veelal past men deze technieken toe om materialen te concentreren. De uiteindelijk te bereiken zuiverheid van de afgescheiden materialen wordt enerzijds bepaald door de materiaal eigenschappen en de uitvoering van de scheidingsapparatuur. Anderzijds is vooral de voorbewerking (ontsluiten en verkleinen) van de te scheiden materialen bepalend voor de prestaties van de scheidingsapparatuur.

De prijs/kwaliteit-verhouding, die de potentiële afzetmarkt voor afgescheiden materialen stelt, bepaalt voor een belangrijk deel de toepasbare combinaties van voorbewerkings- en scheidingstechnieken.

Hierna worden de in dit onderzoek toegepaste scheidingstechnieken beschreven. Het betreft technieken die toegepast worden in het opwerkingstraject om direct afzetbare concentraten voor de basismetalaalindustrie af te scheiden. In deze industrie worden met name pyro- en/of hydrometallurgie processen toegepast.

3.2 Zeeftechniek

Het principe hiervan berust op het scheiden van deeltjes naar grootte en/of vorm.

Materialenmengsels worden hiertoe op een zeefoppervlak gedoseerd. Dit zeefoppervlak is voorzien van openingen. Deze openingen kunnen qua vorm en afmetingen variëren. Voor het passeren van deeltjes door de zeefopeningen moeten de deeltjes ten opzichte van het zeefoppervlak bewegen. Dit wordt gerealiseerd door het bewegen van het zeefoppervlak (trilzeef, schudzeef) of het onder een hoek opstellen van het zeefoppervlak (trommelzeef) waardoor de materialen onder invloed van de zwaartekracht over het zeefoppervlak bewegen.

Zeven is bij uitstek een methode om selectief deeltjes van een bepaalde grootte of vorm af te scheiden. De zuiverheid van de afgescheiden materialen wordt vooral bepaald door het verschil in deeltjesgrootte en/of vorm tussen de te scheiden materialen. Goed gedefinieerde verschillen in deeltjesgrootte en/of vorm tussen te scheiden materialen kunnen mogelijk via selectieve verkleining worden gerealiseerd. Meestal blijkt dit in de praktijk maar zeer zelden uitvoerbaar.

Het scheiden van materialenmengsels met behulp van zeven in verschillende deeltjesgrootte-categorieën wordt echter zeer vaak toegepast als voorbewerking voor schei-

dingstechnieken, die gebaseerd zijn op verschillen in dichtheid en elektro/magnetische eigenschappen van de te scheiden materialen. Gelijkmatische voeding en uniforme deeltjesgrootte hebben bij deze technieken een enorme invloed op het scheidend vermogen.

3.3 Windzifttechniek

Het principe hiervan berust op het scheiden van deeltjes op grond van verschillen in dichtheid, vorm en grootte.

Windziften is een techniek waarbij deeltjes worden gescheiden op hun valgedrag in een luchtstroom. 'Lichte' deeltjes met een relatief groot oppervlak worden eerder met de luchtstroming meegenomen dan 'zware' deeltjes met een relatief klein oppervlak. Bij alle uitvoeringsvormen van windzifters worden de te scheiden materialenmengsels in een regelbare luchtstroom gebracht. Deze luchtstroom is dwars of tegengericht aan de materiaalstroom; ook combinaties van dwars- en tegenstroom komen voor. Afhankelijk van de materiaaleigenschappen worden materialen wel of niet door de luchtstroom meegevoerd. De met de luchtstroom meegevoerde lichte fractie moet vervolgens nog wel van de lucht worden gescheiden. Hiervoor worden meestal cyclonen of filterinstallaties toegepast. Op deze manier ontstaan verschillende materiaalfracties.

Er zijn vele uitvoeringsvormen van windzifters. Apparaten met rechthoekige, ronde en zigzag-vormige kanalen komen voor. Daarnaast kunnen kanalen roterend worden uitgevoerd. Een veel toegepaste windzifter is de zig-zagzifter. Het voordeel van deze zifter is dat materialen meerdere malen in één apparaat aan het ziftproces worden onderworpen. Deze zifteruitvoering is ook toegepast in dit onderzoek.

Belangrijke invloed op het scheidend vermogen en rendement van windzifters hebben:

Deeltjesgrootte, deeltjesgrootte verdeling, dichtheidsverschil van de te scheiden materialen, verhouding vaste stof/lucht en luchtsnelheid.

Optimalisatie van windzifters wordt vaak proefondervindelijk uitgevoerd.

Windziften wordt in de recyclingindustrie vaak toegepast voor het afscheiden van niet bruikbare stof-/vuilfracties. Van het bruikbare produkt dat na windziften resteert, worden vervolgens de materialen die moeten worden teruggewonnen met andere technieken verder geconcentreerd.

Voordelen

- de techniek is toepasbaar voor een breed scala aan afvallen;
- vele uitvoeringsvormen, aangepast aan de te scheiden materialen, zijn verkrijgbaar;
- er worden geen tussenfracties geproduceerd.

Nadelen

- het energieverbruik is relatief hoog;
- de kosten/ton zijn relatief hoog;
- de techniek is als definitieve scheidingsstap beperkt inzetbaar.

Ontwikkelingen

Aangezien deze techniek reeds tientallen jaren wordt toegepast, zijn geen echte nieuwe ontwikkelingen te verwachten. Wel kunnen bestaande ziftertypes worden geopti-

maliseerd ten aanzien van het energieverbruik. TNO heeft kennis en faciliteiten om, met name voor recycling van diverse afvalfen, de zigzagzifters meer produktgericht te ontwerpen. Door deze ontwikkelingen kunnen windzifters bij de recycling van afvalfen mogelijk als relatief goedkope definitieve scheidingsstap worden toegepast.

3.4 Luchttafeltechniek

Het principe hiervan berust voornamelijk op het scheiden van deeltjes op grond van verschillen in dichtheid. Afhankelijk van de tafelluitvoering spelen ook vorm en grootte hierbij een rol.

De luchttafelluitvoering toegepast in dit onderzoek is:

Tafel met een luchtdoorlatend, schuin opgesteld en vibrerend oppervlak.

Het principe hiervan is gebaseerd op het verschil in dichtheid tussen deeltjes. Vorm en grootte van de deeltjes hebben wel een grote invloed op de prestaties van deze techniek.

Wordt een mengsel van materialen op een oppervlak gebracht, waardoor lucht wordt geblazen, dan zullen deeltjes afhankelijk van hun dichtheid zweven of niet van het tafelloppervlak los komen. De deeltjes die op het oppervlak blijven, zullen als gevolg van de trilbeweging, die tegengesteld gericht is aan de op de deeltjes werkende zwaartekracht, zich bij een juiste instelling van de apparatuurparameters bewegen in de richting van de trilbeweging. De deeltjes die zweven zullen zich echter bewegen in de richting van de zwaartekracht. Zware en lichte deeltjes verplaatsen zich dus in tegengestelde richtingen waardoor scheiding wordt gerealiseerd.

Men kent verschillende uitvoeringen van dit apparaat. Er zijn tafels die alleen in de lengterichting schuin kunnen worden versteld, maar ook uitvoeringen waarbij de tafel zowel in de lengte- als in de dwarsrichting kan worden versteld.

Bij tafels die alleen in de lengterichting kunnen worden versteld, bewegen lichte en zware deeltjes zich in tegengestelde lengterichting. Hierbij ontstaan dus twee materialenfracties die aan de twee uiteinden van de tafel worden afgetapt.

Bij tafels met zowel in de lengte-, als in de dwarsrichting verstelmogelijkheden bewegen de materialen zich gedeeltelijk tegengesteld (lengterichting) en gedeeltelijk parallel (dwarsrichting). Materialen worden in de dwarsrichting afgetapt. Door deze uitvoering ontstaat een overgangsgebied tussen lichte en zware materialen, de zogenaamde mengfractie. Deze mengfractie kan mogelijk worden teruggevoerd naar de voeding, die het scheidingsproces ondergaat.

Luchttafeltechnieken worden algemeen toegepast bij het scheiden van metaal/kunststof mengsels. Grootste toepassingsgebied is de kabelrecycling.

Voordelen

- methode is technisch eenvoudig;
- proces is visueel regelbaar.

Nadelen

- het hoge energieverbruik resulteert in relatief hoge kosten/ton;
- de techniek is slechts beperkt toepasbaar en is vrijwel alleen geschikt voor de scheiding van koper/kunststof granulaten met homogene deeltjesgrootte;
- toepassing van de techniek geeft meestal ook een niet gescheiden mengfractie;
- de methode is gevoelig voor fluctuaties in voedingsdebiet en samenstelling.

Ontwikkelingen

Luchttafeltechnieken zijn in principe ook geschikt voor het scheiden van andere materialenmengsels dan koper/kunststof. Hiervoor moeten optimalisaties aan luchtverdeling, luchtsnelheid, tafelbeweging en tafeloppervlak worden uitgevoerd.

3.5 Luchtjigtechniek

Het principe hiervan is gebaseerd op het verschil in bewegingssnelheid tussen lichte en zware deeltjes als gevolg van de zwaartekracht.

Daartoe worden de te scheiden materialenmengsels in een pulserende opwaartse luchtstroom gebracht. Door deze pulserende luchtstroom worden de materialen constant opgeschud. Bij het wegvallen van de luchtstroom bezinken de zwaarste deeltjes sneller dan de lichte deeltjes waardoor een scheiding optreedt. Eventueel kan een medium (glazen of stalen kogels) worden toegepast. Hierdoor worden de door de deeltjes af te leggen afstanden en het relatieve snelheidsverschil tussen de te scheiden materialen vergroot.

De luchtjigtechniek wordt zeer beperkt toegepast in de kabelrecycling branche.

Voordelen

- goede zuiverheid van de gescheiden materialen.

Nadelen

- hoog energieverbruik gekoppeld aan lage capaciteit resulteert in relatief hoge kosten/ton;
- keuze van het tussenmedium(kogels) is van grote invloed op de prestaties;
- procesregeling en de keuze van medium vereist ervaring.

Ontwikkelingen

Er zijn geen noemenswaardige ontwikkelingen te noemen.

3.6 Ferromagnetische techniek

Het principe hiervan berust op het gegeven dat ferromagnetische of zeer sterk paramagnetische materialen worden aangetrokken door een magneet en zo-doende kunnen worden gescheiden van materialen die niet worden aangetrokken. Vele uitvoeringsvormen komen voor, waarvan de meest toegepaste de bovenband- en koprolmagneet zijn. Als magneet worden zowel elektro- als permanente magneten toegepast. Deze techniek wordt op brede schaal toegepast om magnetische materialen uit afvalstromen te verwijderen. Dit verwijderen van magnetische materialen is meestal noodzakelijk alvorens meer specifieke non-ferro scheidingstechnieken worden toegepast.

3.7 Wervelstroom (Eddy current) techniek

Het principe hiervan berust op het gegeven dat indien men een geleidend metaaldeeltje in een wisselend magneetveld brengt er een wervelstroom (Eddy current) in het deeltje gaat lopen. Deze wervelstroom verwekt op zijn beurt een magneetveld dat tegengesteld gericht is aan het aangelegde veld. Hierdoor wordt het deeltje afgestoten. Daarbij is de afstotende kracht groter naarmate de opgewekte wervelstroom in het deeltje groter is. De opgewekte wervelstroom in een deeltje wordt bepaald door de geleidbaarheid, grootte, en vorm van het deeltje. Daarnaast speelt de dichtheid van het deeltje een belangrijke rol. De verhouding geleidbaarheid/dichtheid is met name bepalend voor de afstand waarover het deeltje wordt afgestoten.

Bij de huidige wervelstroom scheidingsapparaten worden zeer sterke permanente magneten (neodymium, ijzer, bromium) toegepast. Deze magneten maken deel uit van een roterende trommel. Afhankelijk van de uitvoering van de wervelstroom scheider kunnen deeltjes tussen 1 tot circa 100 mm worden gescheiden. Ferromagnetische materialen moeten vooraf worden verwijderd omdat het hechten hiervan aan de magneetrol de apparatuur ernstig kan beschadigen.

Van alle specifieke non-ferro scheidingstechnieken wordt alleen wervelstroomscheiding op redelijk grote schaal toegepast. Wervelstroom scheidingsapparatuur wordt meestal toegepast in installaties voor het verwerken van autowrakken, huisvuilscheidingsinstallaties, verbrandingsinstallaties en in installaties voor de recycling van wit- en bruingoed.

Voordelen

- techniek is toepasbaar voor deeltjes tot 100 mm. Hierdoor zijn voorbehandelingskosten (malen, zeven) betrekkelijk gering;
- techniek is redelijk uitontwikkeld.

Nadelen

- non-ferrometalen onderling zijn hiermee nauwelijks goed te scheiden;
- materialen moeten volkomen vrij zijn van ferro-metalen;
- minimale toepasbare deeltjesgrootte is circa 2 mm.

Ontwikkelingen

Voor zover bekend lopen bij de producenten van deze apparatuur op het gebied van ontwikkelingen nauwelijks acties.

TNO ziet als mogelijke ontwikkelingen:

- Optimaliseren van de Eddy current rotor qua constructie en veldsterkte;
- Optimaliseren van de voedingsmethode naar de Eddy current rotor.

3.8 Elektrostatische techniek

Het principe hiervan berust op het gegeven dat, indien men een geladen deeltje in een elektrisch veld brengt, de deeltjes op basis van hun lading worden aangetrokken of afgestoten. In een elektrisch veld zullen gelijk geladen deeltjes elkaar afstoten en ongelijk geladen deeltjes elkaar aantrekken. Voor het opladen van deeltjes kunnen verschillende technieken worden toegepast. Door wrijving krijgen deeltjes

van verschillende materialen tegengestelde ladingen. Ook kunnen deeltjes worden opgeladen door ze met ionen te bestoken.

Elektrostatistische scheiding van een mengsel is mogelijk wanneer deze elektrostatistische krachten groot genoeg zijn om de zwaarte- of traagheidskrachten te overwinnen. De deeltjes mogen niet te klein (< 75 micron) zijn omdat anders de scheiding verstoord wordt door luchtwervelingen. Verwerking van grote deeltjes (> 2 mm) heeft tot gevolg dat de hoeveelheid lading op het oppervlak te klein is in vergelijking met de zwaartekracht. Verder is het belangrijk dat het materiaal niet te nat is of voorzien is van een al dan niet geleidende oppervlaktelaag.

Deze techniek kan zeer algemeen worden toegepast, omdat ze in principe geschikt is om mengsels van wel en niet of slecht geleidende materialen te scheiden. Op dit moment staat de techniek sterk in de belangstelling bij verwerkers van elektronica afval. De redenen hiervoor zijn vooral gelegen in het feit dat bij recycling van elektronica afval scheiding, van de hierin aanwezige metalen/kunststof combinaties, alleen mogelijk is indien de afvallen zeer fijn (deeltjesgrootte < 1 mm) worden gemalen. Beneden een deeltjesgrootte van 1 mm zijn andere scheidingstechnieken zoals tafel- en wervelstroomtechniek niet toepasbaar terwijl echter de elektrostaat de beste prestaties levert met deeltjes van < 1 mm.

Voordelen

- scheiding van deeltjes < 1 mm is mogelijk;
- energieverbruik is gering.

Nadelen

- kostprijs/ton is vrij hoog;
- techniek is toepasbaar voor deeltjes met een grootte van maximaal 5 mm. Hierdoor is de kostprijs voor het verkleinen van de materialen relatief hoog;
- vervuilingen en coatings op het deeltjesoppervlak werken storend;
- materiaal moet droog zijn;
- vonkoverslag kan brand of explosies veroorzaken.

Ontwikkelingen

Naar verwachting zijn er weinig mogelijkheden voor verdere ontwikkelingen. Toepassingen blijven beperkt tot bijvoorbeeld het terugwinnen van non-ferrometalen uit fijn gemalen elektronica afval of voor de verwijdering van metaalverontreinigingen uit kunststoffen.

3.9 Vrije val techniek

Het principe hiervan berust, net als bij de windzifters, op het scheiden van deeltjes op grond van verschillen in dichtheid, grootte en vorm.

Bij de vrije val separator worden de te scheiden materialenmengsels niet in een tegen-gerichte luchtstroom gebracht, maar worden de deeltjes met een bepaalde horizontale snelheid weggegooid in een valkoker waarna de deeltjes als gevolg van de zwaartekracht vallen. De valbaan die de deeltjes beschrijven wordt hierbij bepaald door de volgende variabelen:

- horizontale aanvangssnelheid;
- dichtheid van het deeltje;

- diameter van het deeltje;
- luchtweerstand van het deeltje.

Indien de factor $\text{dichtheid} \times \text{diameter}$ gelijk is zullen deeltjes van dezelfde vorm bij een gelijke horizontale aanvangssnelheid ongeveer dezelfde valbaan hebben. Omdat deeltjes niet altijd gelijk van vorm zijn, wat met name invloed heeft op de luchtweerstand van de deeltjes, zullen de valbanen van ongelijk gevormde deeltjes ook verschillen.

Met de vrije val separator kunnen daarom in principe de volgende materialenmengsels worden gescheiden.

- deeltjes met gelijke grootte en vorm die qua dichtheid verschillen;
- deeltjes met gelijke dichtheid en vorm die qua grootte verschillen;
- deeltjes met gelijke dichtheid en grootte die qua deeltjesvorm verschillen

Als deeltjes op twee van de drie eigenschappen (dichtheid, grootte en vorm) van elkaar verschillen kunnen de materialen niet meer goed worden gescheiden. Dit geldt trouwens algemeen voor de meeste scheidingstechnieken.

Alhoewel voor de hand liggend wordt deze techniek momenteel niet of nauwelijks toegepast.

Voordelen

- het in de vrije val scheiden op verschil in deeltjesgrootte en vorm is mogelijk;
- energieverbruik is zeer laag;
- enorme capaciteiten/uur zijn realiseerbaar;
- geen scheiding/reiniging van luchtstroom noodzakelijk.

Nadelen

- ruimtebeslag valkoker;
- toepasbaar voor deeltjes tot maximaal 10 mm.

Ontwikkelingen

TNO-ME heeft een vrije val separator gebouwd om hiermee ervaring op te doen. Optimalisaties met betrekking tot het realiseren van een uniforme, gelijkgerichte horizontale snelheid zijn noodzakelijk.

De ontwikkeling van systemen waarmee de valbaanverschillen van de te scheiden deeltjes kunnen worden vergroot moet nog worden gestart.

3.10 Toepassingsgebied, capaciteit en kosten van scheidingstechnieken

Voor het maken van de juiste keuze van de toe te passen scheidingstechniek moet bekend zijn op basis van welke fysische eigenschappen wordt gescheiden en welke eisen de apparatuur stelt aan de deeltjesgrootte. De gegevens in tabel 3.1 presenteren hiervan een overzicht. In deze tabel is daarnaast aangegeven in hoeverre de techniek materiaalspecifiek is voor het afscheiden/scheiden van non-ferro's. Materiaalspecifiek wil zeggen, dat voor de scheiding gebruik wordt gemaakt van fysische eigenschappen, die alleen de non-ferrometalen bezitten. Hierbij valt op dat slechts enkele technieken echt specifiek zijn voor non-ferro's en dat voor de afscheiding/scheiding van non-ferro's ook veel technieken, die berusten op verschillen in dichtheid, kunnen worden toegepast.

Daarnaast bevat de tabel getallen over capaciteit, energieverbruik, de investeringen en de kosten van de diverse technieken. Daarbij moet worden aangetekend dat het hierbij om globale cijfers gaat. Veel van deze grootheden zijn namelijk sterk produkt- en leverancier-afhankelijk. Bovendien worden door de meeste leveranciers van apparatuur geen algemeen geldende gegevens verstrekt over deze grootheden. Voor het berekenen van de kosten/ton is uitgegaan van de volgende aannamen:

- Afschrijving + rente + onderhoud = 30% van de investeringen/jaar;
- Energie prijs = 0,25 f/kWh;
- Aantal productie uren bedraagt 2000/jaar.

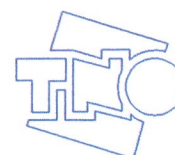
In deze kostenberekeningen zijn dus geen personeelskosten opgenomen!!!

Verder zijn de uitkomsten van deze berekeningen afgerond (onder de f 5 op hele gulden en boven de f 5 op vijf hele gulden).

Tabel 3.1 Overzicht technieken

Techniek	Materialen afvalsoort	Scheiding op basis van verschillen in	Specifiek voor non-ferro's	Granulaat grootte (mm)	Capaciteit (t/h)	Energie (kWh/t)	Investering (kf)	Kosten (f/t)
Zeef-techniek	Huishoud-bouw/sloop-shredderafval	Grootte/vorm	Nee	0,5 mm	1 - 100	1 - 3	10 - 300	1 - 2
Windzift-techniek	Huishoud metaal/kunststof shredder	Dichtheid grootte/vorm	Nee/ja	0,1 - 10 mm	1 - 50	5 - 10	100 - 200	2 - 20
Luchttafel-techniek	Shredder metaal/kunststof	Dichtheid grootte/vorm	Nee/ja	1 - 10 mm dr 0,1 - 5 mm n	0,5 - 2	10 - 20	50 - 100	10 - 20
Luchtjig-techniek	Metaal/kunststof	Dichtheid grootte	Nee	1 - 10 mm	0,25 - 1	20 - 30	150 - 250	40 - 80
Ferro-magnetische techniek	Ferro's	Magnetische eigenschappen	Nee	+0,2 mm	1 - 20	1 - 2	10 - 50	1 - 2
Wervelstroom-techniek	Non-ferro	Geleidbaarheid dichtheid	Ja	2 - 100 mm	0,5 - 10	2 - 3	100 - 300	5 - 30
Elektro-statische techniek	Metaal/kunststof	Geleidbaarheid	Ja	0,1 - 5 mm	0,5 - 2	1 - 2	150 - 300	25 - 50
Vrije val techniek	Diversen	Dichtheid grootte vorm	Nee	0 - 10 mm	10 - 20	< 0,5	100 - 150	1 - 2

4 Recyclen van de deflectie-unit



4.1 Algemeen

Een van de onderdelen in een TV toestel is de zogenaamde deflectie-unit of afbuigspoel. De deflectie-unit vertegenwoordigt 3,2% van het totale gewicht van de TV. Het selectief demonteren hiervan, gevolgd door separate verwerking is mogelijk zinvol en is nader toegelicht in het eindrapport, deel 1¹⁾.

De materialen aanwezig in de deflectie-unit zijn:

koper	40 gew%;
ferro	38 gew%;
kunststoffen/rest	22 gew%.

Deze materiaalsamenstellingsgegevens zijn berekend op basis van de resultaten van dit onderzoek.

De materialen aanwezig in de deflectie-unit kunnen via de processtappen verkleinen en scheiden worden teruggewonnen. Daarbij ligt de nadruk op het terugwinnen van koper. Het onderzoek van deze processtappen is met een partij deflectie-units van circa 1000 kg uitgevoerd.

4.2 Voorverkleinen/ontsluiten van de deflectie-unit

Voor de eerste verkleinstap zijn een viertal voorverkleiners, zoals beschreven in 2.2, die qua maalsysteem verschillen uitgetest. Deze voorverkleiners zijn op te delen in twee soorten, respectievelijk:

Soort 1: toerental < 100 rpm, verkleinen met behulp van messenparen.

Soort 2: toerental > 500 rpm, verkleinen met behulp van hamers of ringen.

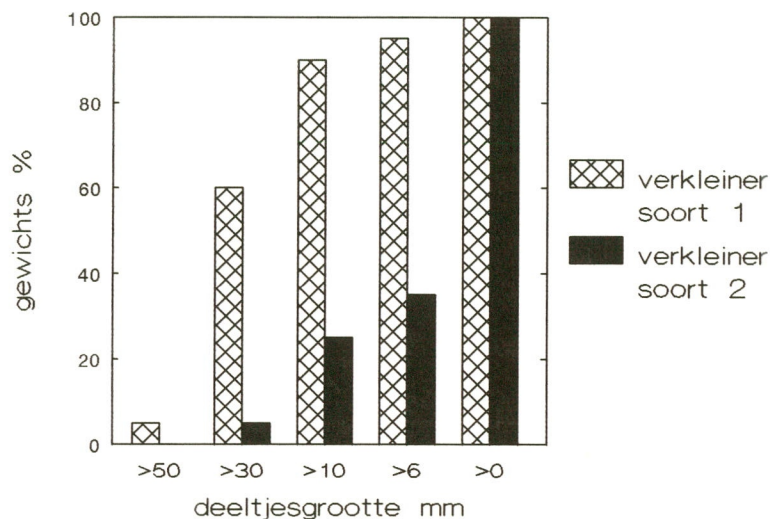
De maalfracties verkregen met de diverse voorverkleiners zijn onder andere gekarakteriseerd door deeltjesgrootteverdeling en ontsluiting.

De resultaten van de voorverkleiningsexperimenten met deflectie-units zijn samengevat in de hierna volgende tabel 4.1 en figuur 4.1.

Tabel 4.1 Resultaten voorverkleiningsexperimenten met deflectie-units

Deeltjesgrootte (mm)	Voorverkleiner Soort 1	Voorverkleiner Soort 2
> 50 mm	5%	0%
> 30 mm	60%	5%
> 10 mm	90%	25%
> 6 mm	95%	35%
Ontsluiting	< 50%	> 95%

¹⁾ TNO-rapport nr. 94-442.



Figuur 4.1 Resultaten voorverkleiningsexperimenten met deflectie-units

Voor de conclusies die kunnen worden getrokken uit dit onderzoek wordt verwezen naar 2.2.

4.3 Scheiden van de voorverkleinde deflectie-unit in materiaalstromen

De prestaties van een scheidingsstap, voor een bepaald materiaal, worden beoordeeld door het bepalen van de concentratie en het rendement van dat materiaal. Daarbij worden de volgende definities gehanteerd:

De 'concentratie' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een fractie gedeeld door de totale gewichtshoeveelheid van de fractie $\times 100\%$.

Het 'rendement' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een afgescheiden fractie gedeeld door de gewichtshoeveelheid van dat materiaal in het onderdeel $\times 100\%$.

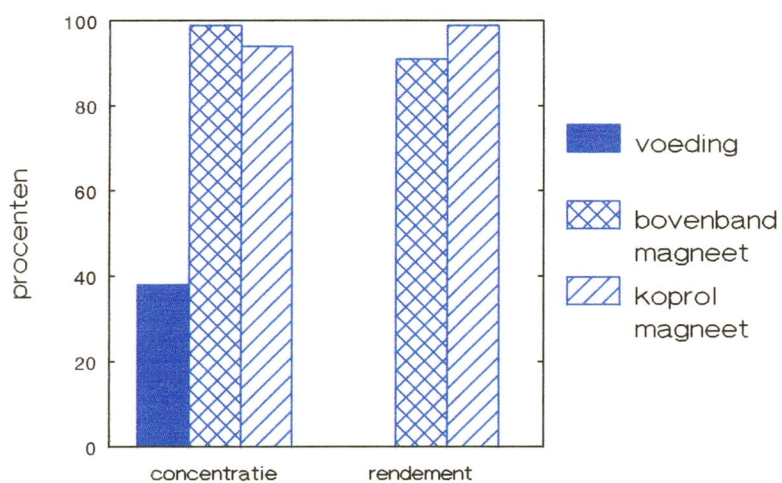
De eindresultaten van de scheidingsexperimenten worden in de volgende hoofdstukken gepresenteerd en toegelicht.

Voordat de voorverkleinde deflectie-units in materiaalstromen kunnen worden gescheiden is het noodzakelijk dat verder wordt naverkleind.

Alvorens wordt naverkleind wordt altijd magnetisch materiaal met een bovenbanden/of koprolmagneet verwijderd. Ditzelfde geldt, indien aanwezig, voor de grove non-ferrodelen die met een Eddy current-scheider worden verwijderd. De resultaten van het afscheiden van magnetisch materiaal uit de voorverkleinde deflectie-units worden weergegeven in tabel 4.2 en figuur 4.2.

Tabel 4.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit deflectie-units

	Ferro concentratie (%)	Ferro rendement (%)
Deflectie-unit (als voeding)	38	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	99	91
Koprolmagneet	94	99



Figuur 4.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit deflectie-units

Voor de meeste hierna toegepaste scheidingstechnieken dient de gewenste deeltjes-grootte ruim beneden de 10 mm te liggen. Ook is, vanwege de aanwezigheid van dunaderig koperdraad in elektronica afvallen, meestal een vormbehandeling (zie 2.4) gewenst.

Voor de naverkleining en vormbehandeling van het deflectie-unit materiaal is gebruik gemaakt van de onder 2.3 en 2.4 beschreven apparatuur.

Het naverkleinde en het naverkleinde/vormbehandelde deflectie-unit materiaal is gebruikt voor het uitvoeren van scheidingsonderzoek.

In dit onderzoek met de deflectie-units zijn diverse scheidingsapparaten uitgetest en qua prestatie met elkaar vergeleken.

Deze scheidingsapparaten zijn:

- luchttafel;
- zig-zagzifter;

- elektrostaat;
- luchtig.

Op basis van de gegevens verkregen uit de scheidingsproeven kan de samenstelling van de deflectie-unit worden berekend.

Deze is:

ferro	38 gew%;
koper	40 gew%;
kunststoffen/rest	22 gew%.

Voor de materialen koper en kunststof geven de tabellen 4.3 en 4.4 de resultaten, in de vorm van % concentratie en % rendement, na een bepaalde behandelings- en scheidingsstap weer. Al deze resultaten zijn verkregen na één scheiding met de desbetreffende scheidingsapparatuur. Eventuele mengfracties, zoals die ontstaan bij experimenten met de luchttafel en de elektrostaat, zijn niet teruggevoerd.

Tabel 4.3 Scheidingsresultaten koper uit deflectie-units

	Koper concentratie (%)	Koper rendement (%)
Deflectie-unit (als voeding)	40	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	61	99
Koprolmagneet	64	97
Na scheiding met		
Luchttafel A ¹⁾	99,5	85
Luchttafel B ²⁾	100	91
Na scheiding met		
Zig-zagzifter A	81	92
Zig-zagzifter B	77	88
Na scheiding met		
Elektrostaat A	98	81
Elektrostaat B	99,5	84
Na scheiding met		
Luchtig A	100	95
Luchtig B	100	95

¹⁾ A = voeding naverkleinde deflectie-unit.

²⁾ B = voeding naverkleinde/vormbehandelde deflectie-unit.

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties

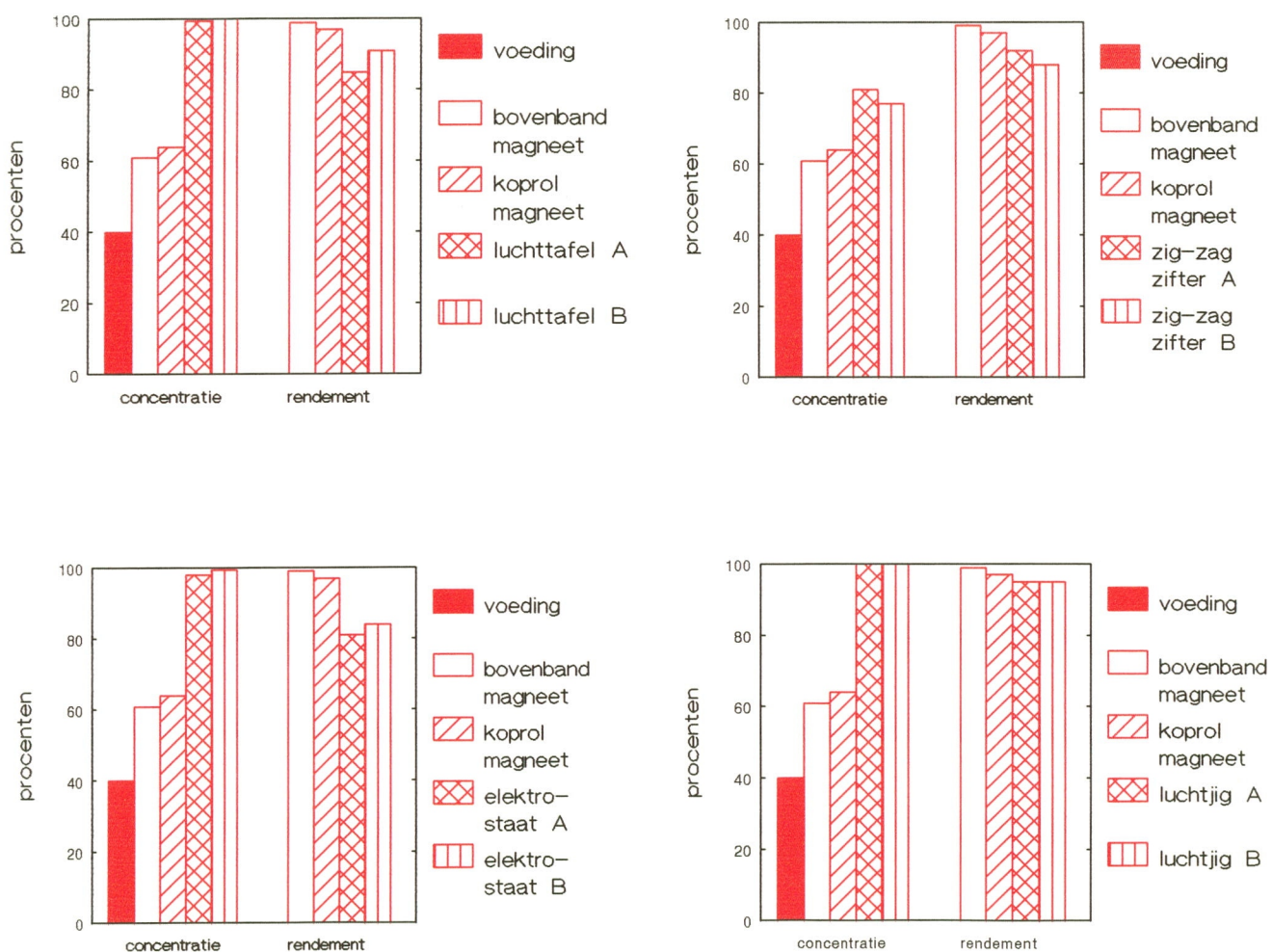
Tabel 4.4 Scheidingsresultaten kunststof uit deflectie-units

	Kunststof concentratie (%)	Kunststof rendement (%)
Deflectie-unit (als voeding)	22	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	34	100
Koprolmagneet	35	95
Na scheiding met		
Luchttafel A ¹⁾	97	68
Luchttafel B ²⁾	96	77
Na scheiding met		
Zig-zagzifter A	79	41
Zig-zagzifter B	81	56
Na scheiding met		
Elektrostaat A	70	17
Elektrostaat B	82	21
Na scheiding met		
Luchtig A	96	95
Luchtig B	97	95

¹⁾ A = voeding naverkleinde deflectie-unit.

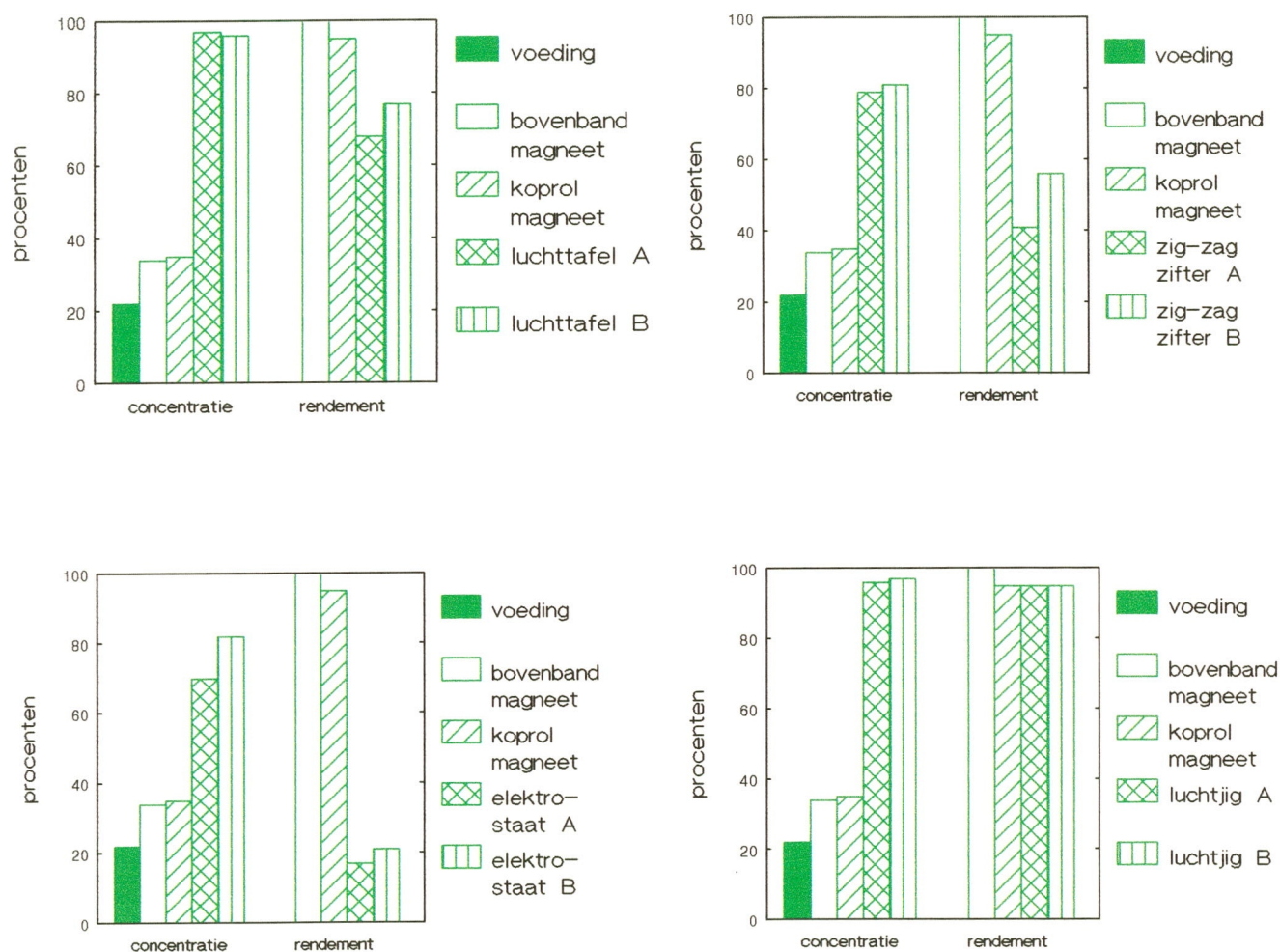
²⁾ B = voeding naverkleinde/vormbehandelde deflectie-unit.

In de figuren 4.3 en 4.4 wordt voor de diverse materialen weergegeven hoe het verloop van concentratie en rendement is na een bepaalde behandelings- en scheidings-stap.



Figuur 4.3 Scheidingsresultaten koper uit deflectie-units

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties



Figuur 4.4 Scheidingsresultaten kunststof uit deflectie-units

4.4 Evaluatie

Voor het recyclen van de deflectie-unit, met als voornaamste doel het concentreren van het koper, zijn de opeenvolgende toegepaste processtappen:

- voorverkleinen/ontsluiten met hoog toerental maalapparatuur;
- verwijderen van ferrofractie met bovenband- en koprolmagneet;
- naverkleinen met granulator;
- vormbehandelen met prallmolen;
- scheiden van koper/kunststofmengsel met de luchttafel, luchtjig, zig-zagzifter of elektrostaaf.

Voor de verschillende processtappen kunnen de prestaties als volgt worden samengevat:

- De ferrofractie wordt door de toegepaste magneetcombinatie voor 99% verwijderd. Hierbij komt echter circa 6% ander materiaal mee.
- Vormbehandelen van het te scheiden koper/kunststofmengsel is voor de toepassing van meeste scheidingstechnieken (luchttafel, luchtjig en elektrostaaf) noodzakelijk. Dit met name vanwege het gegeven dat niet vormbehandeld materiaal draadvormig dun koper bevat, dat sterk de neiging heeft in elkaar te haken. Dit leidt zowel bij de toevoer als ook tijdens het scheidingsproces tot verstoppingen.
- Het koper kan met een zuiverheid van meer dan 99% worden afgescheiden door toepassing van een luchttafel of luchtjig.

De lage rendementen (90%), behaald met de luchttafel, zijn te wijten aan het feit dat tijdens deze experimenten de mengfractie (middlings) niet is teruggevoerd naar de voeding. Dit wordt in de praktijk wel gedaan waardoor het rendement aanzienlijk kan worden verhoogd. Qua prijs/prestatie-verhouding en bedieningseenvoud heeft de luchttafel de voorkeur boven de luchtjig.

Eventueel kunnen ook combinaties van scheidingstechnieken worden toegepast. In het onderzoek met de onderdelenmix (hoofdstuk 5) zijn ook combinaties van technieken uitgetest.

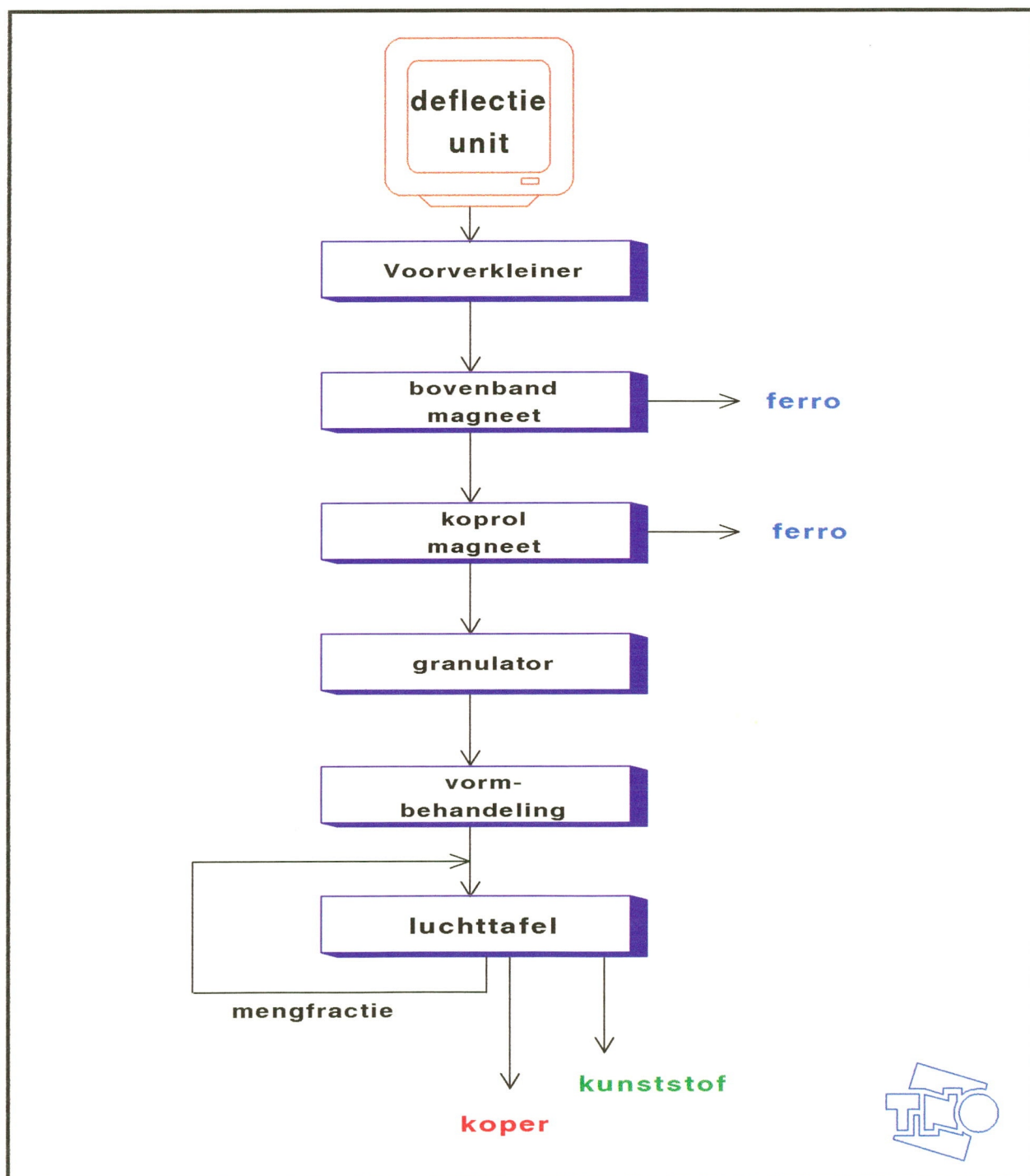
4.5 Voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de deflectie-unit

In figuur 4.5 wordt een voorkeur verwerkingsroute voor de recycling van de deflectie-unit weergegeven.

In dit schema zijn na de ontijzering een granulatie- en vormbehandelingsstap opgenomen.

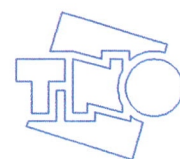
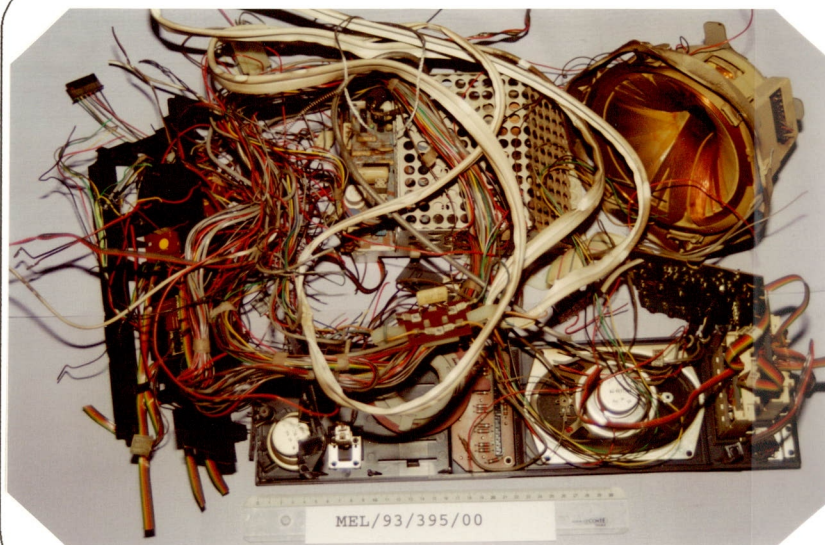
Vervolgens wordt het koper/kunststofmengsel gescheiden met een luchttafel.

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties



Figuur 4.5 Voorkeur verwerkingsroute voor de deflectie-unit

5 Recyclen van de onderdelenmix



5.1 Algemeen

Een tweede recycling-onderzoek is uitgevoerd met de onderdelenmix. De onderdelenmix bestaat uit een verzameling van TV-onderdelen zoals de deflectie-unit, bekabeling, speaker, trafo en degaussing ring. De onderdelenmix omvat in feite de totale TV exclusief de beeldbuis, omkasting en panelen.

De onderdelenmix vertegenwoordigt 8% van het totale gewicht van de TV. Het selectief demonteren hiervan, gevolgd door separate verwerking is mogelijk zinvol en is nader toegelicht in het eindrapport, deel 1¹⁾.

De globale materiaalsamenstelling van de onderdelenmix is:

Ferro	38 gew%;
Non-ferro	34 gew%;
Kunststof/rest	28 gew%.

Deze materiaalsamenstelling is berekend op basis van de resultaten van het hieronder beschreven onderzoek.

Om waardevolle of potentieel milieubelastende materialen terug te kunnen winnen, is het noodzakelijk de onderdelenmix te verkleinen en vervolgens in materiaalstromen te scheiden. In de nu volgende hoofdstukken worden deze processtappen nader toegelicht. Daarbij ligt de nadruk op de concentrering van koper en aluminium. Het onderzoek van deze processtappen is met een partij onderdelenmix van circa 1000 kg uitgevoerd.

5.2 Voorverkleinen/ontsluiten van de onderdelenmix

De onderdelenmix uit TV's is qua samenstelling heterogeen van aard. Om de hierin aanwezige materialen van elkaar te kunnen scheiden moeten de onderdelen worden verkleind en ontsloten. Voor deze processtap zijn twee soorten voorverkleiners getest, namelijk:

Soort 1: toerental < 100 rpm, verkleinen met behulp van messenparen.

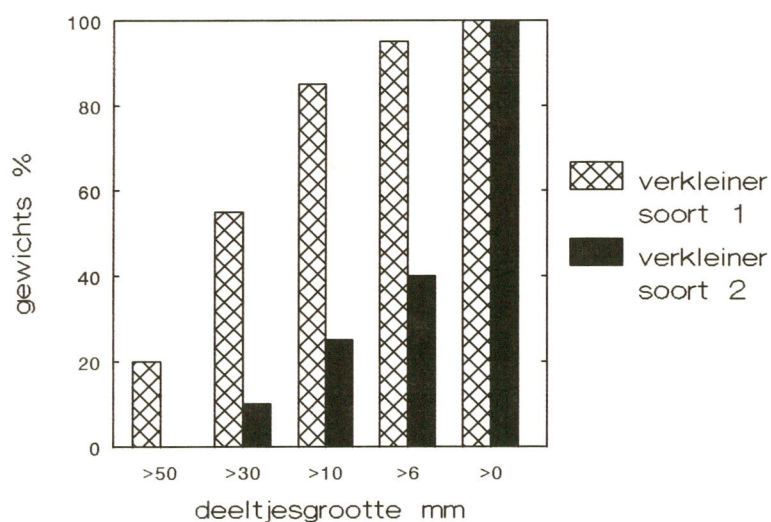
Soort 2: toerental > 500 rpm, verkleinen met behulp van hamers of ringen.

De maalfracties die met de diverse voorverkleiners zijn verkregen, zijn per soort gekarakteriseerd door onder andere de deeltjesgrootteverdeling en de ontsluiting. De resultaten van het verkleiningsonderzoek met de onderdelenmix zijn samengevat in tabel 5.1 en figuur 5.1. Voor de conclusies die kunnen worden getrokken uit dit onderzoek wordt verwezen naar 2.2.

¹⁾ TNO-rapport nr. 94-442.

Tabel 5.1 Resultaten voorverkleiningsexperimenten met onderdelenmix

Deeltjesgrootte (mm)	Voorverkleiner Soort 1	Voorverkleiner Soort 2
> 50 mm	20%	0%
> 30 mm	55%	10%
> 10 mm	85%	25%
> 6 mm	95%	40%
Ontsluiting	< 60%	> 80%



Figuur 5.1 Resultaten voorverkleiningsexperimenten met onderdelenmix

5.3 Scheiden van de voorverkleinde onderdelenmix in materiaalstromen

De prestaties van een scheidingsstap, voor een bepaald materiaal, worden beoordeeld door het bepalen van de concentratie en het rendement van dat materiaal. Daarbij worden de volgende definities gehanteerd:

De 'concentratie' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een fractie gedeeld door de totale gewichtshoeveelheid van de fractie $\times 100\%$.

Het 'rendement' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een afgescheiden fractie gedeeld door de gewichtshoeveelheid van dat materiaal in het onderdeel $\times 100\%$.

De eindresultaten van de scheidingsexperimenten worden in de volgende hoofdstukken gepresenteerd en toegelicht.

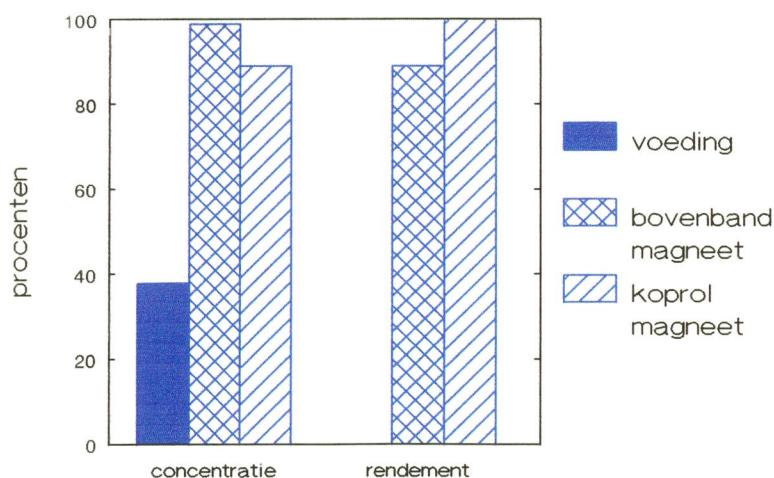
Hoewel met de voorverkleining een aanzienlijke reducering van de grootte van de te scheiden deeltjes is bewerkstelligd, is een verdere verkleining c.q. ontsluiting noodzakelijk om enkele materialen, zoals koper, uit de onderdelenmix af te kunnen scheiden. Echter, voordat tot deze naverkleiningsstap wordt overgegaan, moeten de massieve metalen delen worden verwijderd om beschadiging van de naverkleiner, een granulator, te voorkomen.

5.3.1 Afscheiden van ferrofractie

De verwijdering van de massieve magnetische metalen delen geschiedt met behulp van een bovenband- en koprolmagneet. De resultaten van deze scheidingsprocessen zijn in tabel 5.2 en figuur 5.2 per stap weergegeven.

Tabel 5.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit onderdelenmix

	Ferro concentratie (%)	Ferro rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	38	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	99	89
Koprolmagneet	89	100



Figuur 5.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit onderdelenmix

Zoals reeds in 5.1 is vermeld bevat de onderdelenmix 38% ferromateriaal. Tijdens de eerste magneetstap wordt 89% van het ferromateriaal dat in de voeding zit, als zeer zuivere ferrofractie afgescheiden. Met een tweede magneetstap wordt de ferrofractie volledig uit de voeding verwijderd. Hierbij komen echter ook andere materialen zoals met name non-ferrometalen mee, waardoor de concentratie van de totale ferrofractie afneemt tot 89%.

5.3.2 Afscheiden van grove non-ferrofractie

Voordat met de naverkleining kan worden gestart, worden eerst nog de grote non-ferrodelen uit de voeding verwijderd. Dit om schade aan de naverkleiningsapparatuur te voorkomen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een Eddy current-scheider. Met de Eddy current-scheider wordt een non-ferrofractie verkregen die voornamelijk uit aluminium bestaat. Deze hoeveelheid vormt 45% van de totale hoeveelheid aluminium in de onderdelenmix. Indien mogelijk worden aan deze fractie in een later stadium van het recyclingsproces andere geconcentreerde aluminiumfracties toegevoegd.

In tabel 5.3 worden de resultaten van deze scheidingsstap weergegeven.

Tabel 5.3 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit onderdelenmix

	Aluminium concentratie (%)	Aluminium rendement (%)
Voeding	8	94
Na behandeling/scheiding met		
Eddy current-scheider	98	45

5.3.3 Afscheiden van fijne non-ferrofracties

Voor de meeste hierna toegepaste scheidingstechnieken dient de gewenste deeltjesgrootte ruim beneden de 10 mm te liggen. Ook is, vanwege de aanwezigheid van dunaderig koperdraad in elektronica afvallen, meestal een vormbehandeling (zie 2.4) gewenst.

Voor de naverkleining en vormbehandeling van het onderdelenmix materiaal is gebruik gemaakt van de onder 2.3 en 2.4 beschreven apparatuur.

Het naverkleinde en het naverkleinde/vormbehandelde onderdelenmix materiaal is gebruikt voor het uitvoeren van scheidingsonderzoek.

Het onderzoek naar de beste methode waarmee geconcentreerde koper- en/of aluminiumfracties kunnen worden verkregen, is opgebouwd uit een drietal series van experimenten, namelijk:

1. Enkelvoudige experimenten, waarbij de te scheiden materiaalstromen slechts eenmaal met één scheidingsapparaat zijn behandeld.

2. Combinatie A, waarbij de te scheiden materiaalstromen met behulp van combinaties van in de handel verkrijgbare scheidingsapparatuur volgens een bepaalde route worden verwerkt.
3. Combinatie B, waarbij de te scheiden materiaalstromen met behulp van combinaties van voornamelijk binnen TNO ontwikkelde/geoptimaliseerde scheidingsapparatuur volgens een bepaalde route worden verwerkt.

Voor de enkelvoudige experimenten en de experimenten behorende tot combinatie A is de voeding naverkleind met een granulator en vormbehandeld met een prallmolen. De voeding voor de experimenten met combinatie B is alleen door de granulator gevoerd. De non-ferrodeeltjes in deze voeding behouden dus hun draadvorm (zie paragraaf 2.3 en 2.4).

Om de effectiviteit van de experimenten te kunnen beoordelen worden voor de materialen koper, aluminium en rest de concentratie en het rendement na een bepaalde behandelings- en scheidingsstap weergegeven.

5.3.3.1 Scheiding van non-ferro/kunststofmengsel met één apparaat

Om een indruk te krijgen van de mogelijkheden op het gebied van de non-ferro/kunststofscheiding zijn verschillende scheidingsapparaten op hun toepasbaarheid getest, namelijk:

1. Zig-zagzifter;
2. Luchttafel;
3. Elektrostatische scheider;
4. Vrije val separator.

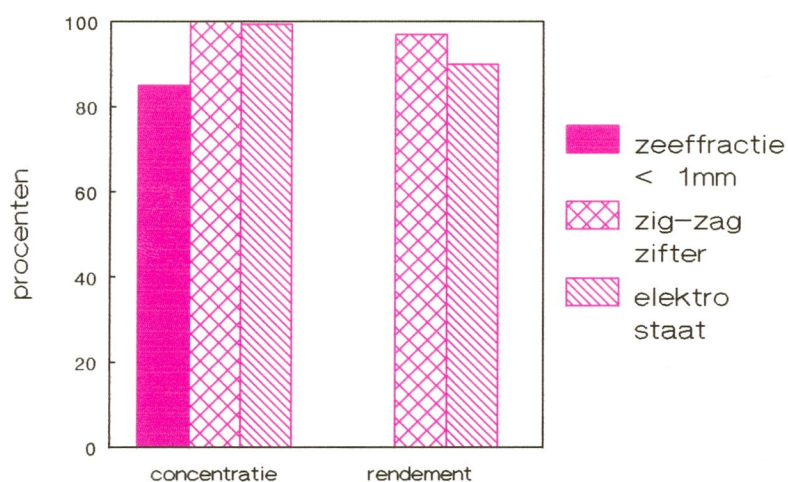
De deeltjesgrootte kan van invloed zijn op het scheidingsproces. Om dit effect beter te kunnen beoordelen, is het naverkleinde, vormbehandelde restant van de onderdelenmix gezeefd met zeven van 1 en 2 mm. Vervolgens zijn de drie zeeffracties over bovengenoemde scheidingsapparaten gevoerd.

Zeeffractie < 1 mm

Vanwege de geringe deeltjesgrootte kan de zeeffractie < 1 mm alleen gescheiden worden met de zig-zagzifter of de elektrostaat. De resultaten van de experimenten worden vermeld in tabel 5.4 en figuur 5.3.

Tabel 5.4 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit zeeffractie < 1 mm

	Non-ferro concentratie (%)	Non-ferro rendement (%)
Zeeffractie < 1 mm	85	
Na behandeling/scheiding met		
Zig-zagzifter	100	97
Elektrostaat	99,5	90



Figuur 5.3 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit zeeffractie < 1 mm

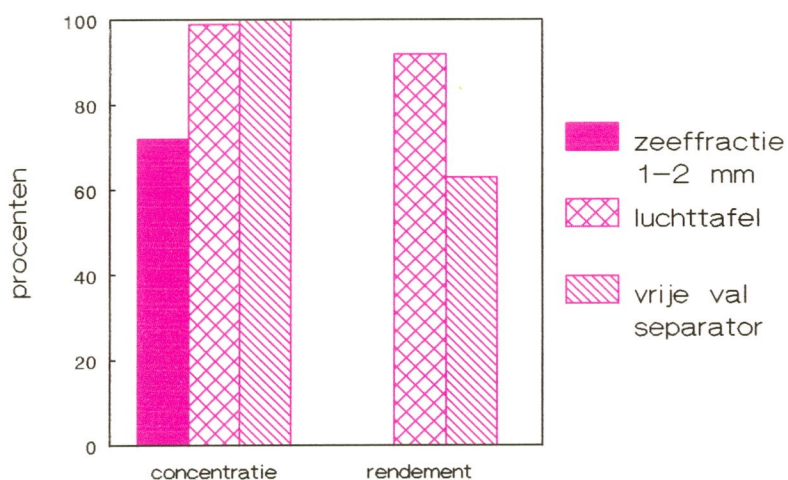
Uit de gegevens blijkt dat de zeeffractie < 1 mm een hoog gehalte aan non-ferrometalen bevat. Na scheiden van deze zeeffractie met de zig-zagzifter kan met een hoog rendement een zeer zuiver non-ferro concentraat worden verkregen.

Zeeffractie 1 - 2 mm

De zeeffractie met deeltjes tussen de 1 en 2 mm is met alle scheidingsapparaten behandeld. Alleen met de luchttafel en de vrije val separator zijn aansprekende resultaten geboekt. Deze staan vermeld in tabel 5.5 en figuur 5.4. Bij de zig-zagzifter en de elektrostaat komen grote kunststofdeeltjes in de metaalfractie terecht, waardoor het scheidend vermogen van deze apparaten afneemt.

Tabel 5.5 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit zeeffractie 1 - 2 mm

	Non-ferro concentratie (%)	Non ferro rendement (%)
Zeeffractie 1 - 2 mm	72	
Na behandeling/scheiding met		
Luchttafel	99	92
Vrije val separator	100	63



Figuur 5.4 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit zeeffractie 1 - 2 mm

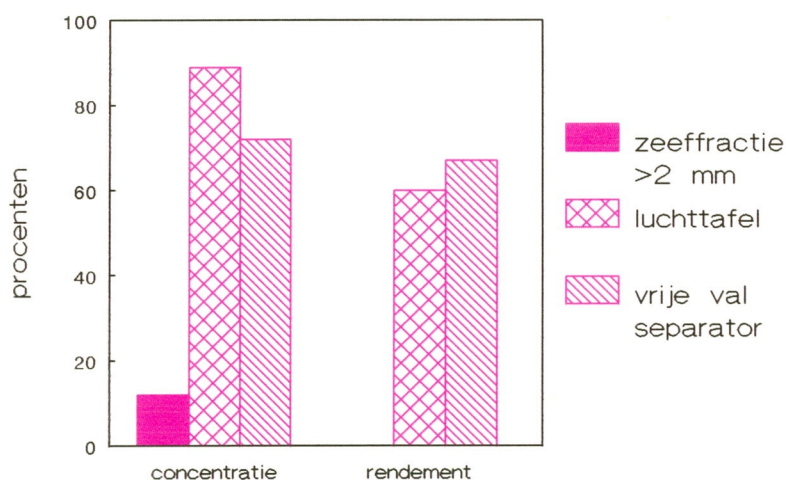
Ook de zeeffractie 1 - 2 mm bevat een relatief hoog gehalte aan non-ferrometalen. Zo-
wel met de luchttafel als met de vrije val separator is een zeer zuivere non-ferrofractie
af te scheiden. Met de vrije val separator is het rendement in vergelijking met de lucht-
tafel aanzienlijk lager.

Zeeffractie > 2 mm

De zeeffractie met deeltjes > 2 mm is ook met alle scheidingsapparaten behandeld.
Net als bij het materiaal tussen de 1 en 2 mm worden alleen met de luchttafel en de
vrije val separator acceptabele resultaten geboekt. Deze staan vermeld in tabel 5.6 en
figuur 5.5.

Tabel 5.6 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit zeeffractie > 2 mm

	Non-ferro concentratie (%)	Non-ferro rendement (%)
Zeeffractie > 2 mm	12	
Na behandeling/scheiding met		
Luchttafel	89	60
Vrije val separator	72	67



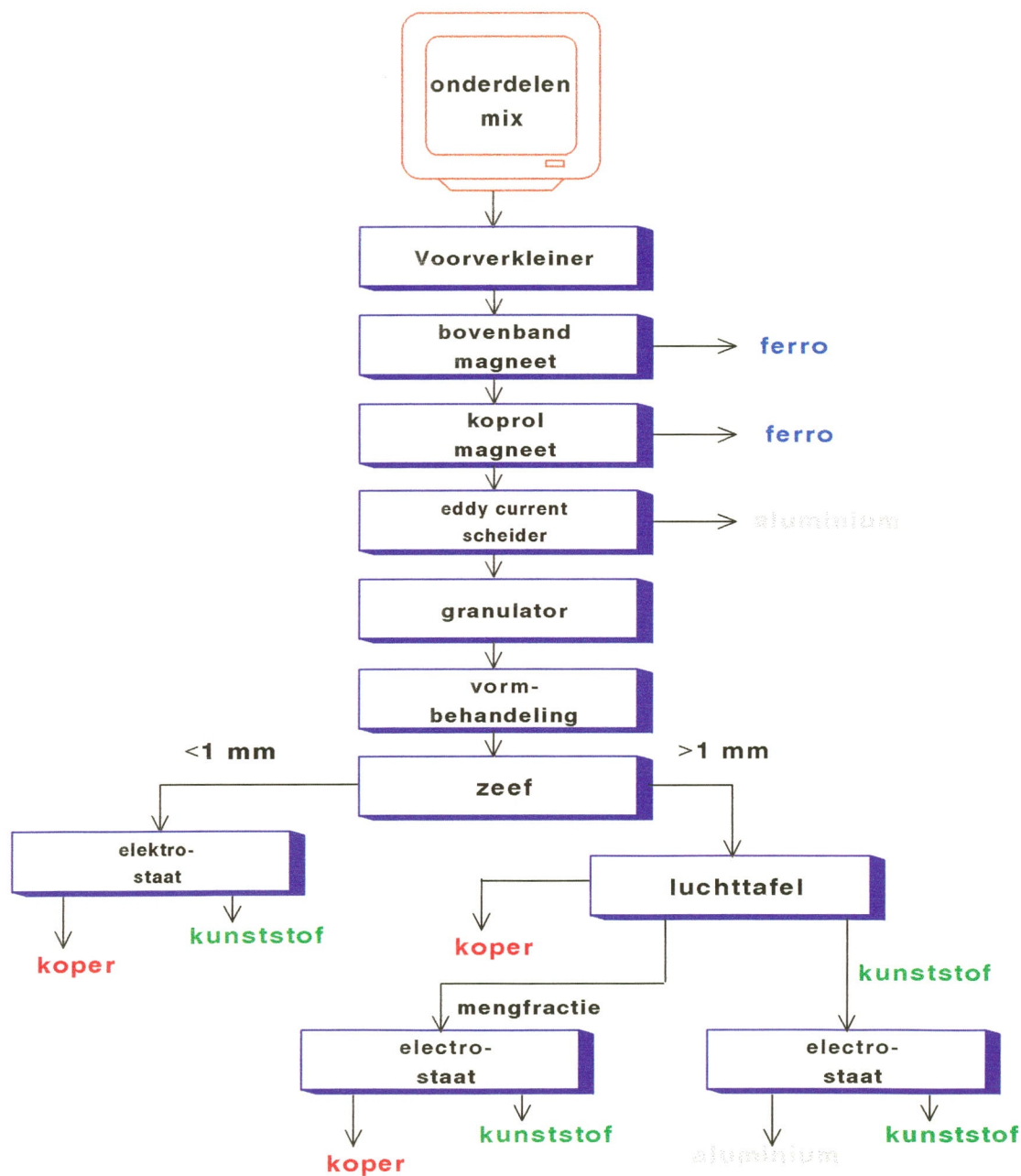
Figuur 5.5 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit zeeffractie > 2 mm

De zeeffractie > 2 mm bevat relatief weinig non-ferrometalen. De concentratie hiervan is met de toegepaste scheidingstechnieken wel te verhogen, maar blijft beneden de 90%. Ook het rendement is laag. Mogelijke oorzaak hiervoor is de deeltjesgrootte variatie in de zeeffractie < 2 mm. Deze deeltjesgrootte variatie ligt theoretisch tussen 2 en 6 mm omdat bij de maalstap met de granulator een 6 mm zeef is toegepast. Overwogen moet worden de zeeffractie > 2 mm verder te verkleinen.

Mede naar aanleiding van de resultaten van deze experimenten is besloten een tweetal recyclingroutes uit te testen. Eén met reeds bestaande scheidingsapparatuur (combinatie A) en een tweede met voornamelijk binnen TNO ontwikkelde/geoptimaliseerde apparaten (combinatie B).

5.3.3.2 Scheiding van non-ferro/kunststofmengsels met combinaties van bestaande apparaten (Combinatie A)

De toegepaste procesroute wordt hierna weergegeven in figuur 5A.



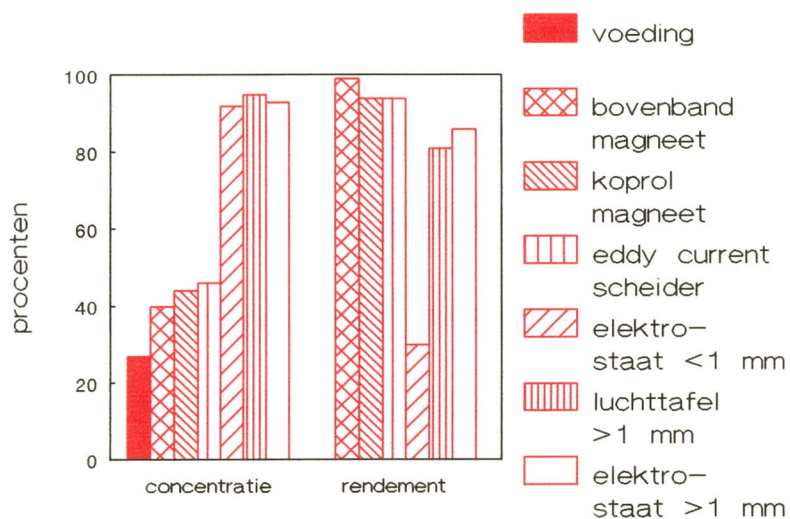
Figuur 5A Procesroute combinatie A

Voor het uittesten van de combinaties van scheidingsapparatuur wordt van het naverkleinde/vormbehandelde/gezeefde materiaal de fractie < 1 mm over de elektrostatische scheider gevoerd, terwijl de fractie > 1 mm eerst over de luchttafel wordt geleid. Daarna wordt met behulp van de elektrostatische scheider getracht het non-ferrogehalte van enkele door de tafel gescheiden fracties te verhogen. De concentrering van de non-ferrometalen koper en aluminium en de restfractie, die met deze serie experimenten wordt bewerkstelligd, wordt weergegeven in de tabellen 5.7 tot en met 5.9. In deze tabellen zijn ook de effecten van de voorgaande scheidingsstappen met de magneten en Eddy current-scheider opgenomen. In de figuren 5.6 en 5.7 wordt voor koper en aluminium weergegeven hoe het verloop van concentratie en rendement is na een bepaalde scheidingsstap.

Tabel 5.7 *Scheidingsresultaten koperfractie uit onderdelenmix*

	Koper concentratie (%)	Koper rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	27	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	40	99
Koprolmagneet	44	94
Eddy current-scheider	46	94
Na behandeling/scheiding van zeeffractie < 1 mm met		
Elektrostaat	92	30
Na behandeling/scheiding van zeeffractie > 1 mm met		
Luchttafel	95	81
Na behandeling/scheiding van > 1 mm middlings luchttafel met		
Elektrostaat	93	86

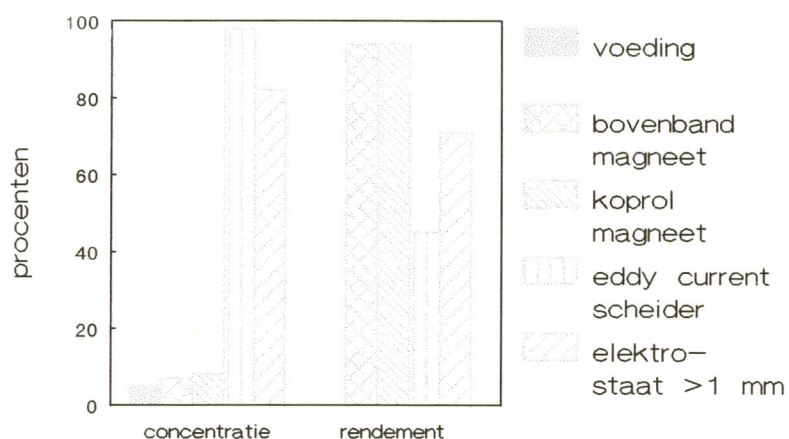
Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties



Figuur 5.6 Scheidingsresultaten koperfractie uit onderdelenmix

Tabel 5.8 Scheidingsresultaten aluminiumfractie uit onderdelenmix

	Aluminium concentratie (%)	Aluminium rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	5	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	7	94
Koprolmagneet	8	94
Eddy current-scheider	98	45
Na behandeling/scheiding > 1 mm kunststoffractie luchttafel met		
Elektrostaat	82	71



Figuur 5.7 Scheidingsresultaten aluminiumfractie uit onderdelenmix

Tabel 5.9 Scheidingsresultaten restfractie (kunststoffen, papier, keramiek) uit onderdelenmix

	Rest concentratie (%)	Rest rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	31	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	46	100
Koprolmagneet	48	90
Eddy current-scheider	50	90
Na behandeling/scheiding van zeeffractie < 1 mm met		
Elektrostaat	72	7
Na behandeling/scheiding van zeeffractie > 1 mm met		
Luchttafel	91	79
Na behandeling/scheiding > 1 mm kunststoffractie luchttafel met		
Elektrostaat	94	85

Conclusies

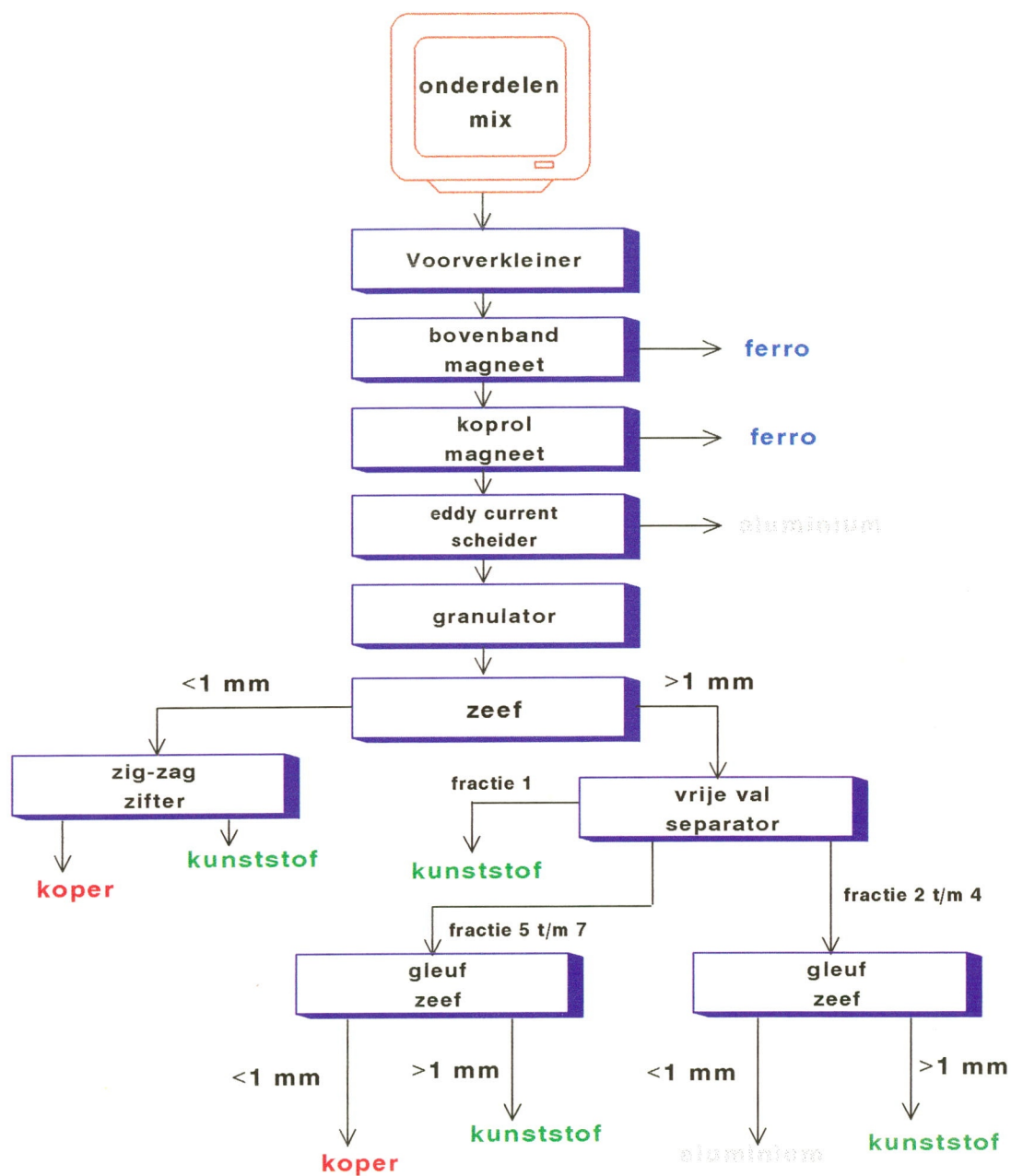
Voor het terugwinnen van de koperfractie is de combinatie van het scheiden van de < 1 mm fractie met de elektrostaat en het scheiden van de > 1 mm fractie met de luchttafel goed toepasbaar. Eventueel kunnen de middlings van de luchttafel worden nabehandeld met de elektrostaat. Hierdoor wordt het rendement verhoogd, maar dit gaat ten koste van de koperconcentratie.

Voor het terugwinnen van de aluminiumfractie is de Eddy current-scheider toepasbaar. Het rendement van deze scheidingsstap is echter slechts 45%; dit omdat met de Eddy current-scheider alleen grof aluminium wordt afgescheiden en het draadvormig aluminium pas bij toepassing van volgende scheidingsstappen vrij komt. Het aluminium rendement kan worden verhoogd door de kunststoffractie afkomstig van de luchttafel met de elektrostaat te behandelen. De metaalfractie die daarmee wordt afgescheiden bevat echter in verhouding minder aluminium, waardoor de aluminiumconcentratie afneemt.

5.3.3.3 Scheiding van non-ferro/kunststofmengsels met combinaties van door TNO ontwikkelde/geoptimaliseerde apparaten (Combinatie B)

De toegepaste procesroute wordt hierna weergegeven in figuur 5B.

Voor het uittesten van de combinaties van scheidingsapparatuur wordt van het naverkleinde/gezeefde materiaal de fractie < 1 mm met de zig-zagzifter gescheiden, terwijl de fractie > 1 mm eerst met de vrije val separator wordt gescheiden. Daarna wordt met behulp van een gleufzeef getracht het non-ferrogehalte van de diverse afgescheiden fracties te verhogen. De concentrering van de non-ferrometalen koper en aluminium en de restfractie, die met deze serie experimenten wordt bewerkstelligd, wordt weergegeven in de tabellen 5.10 tot en met 5.12. In deze tabellen zijn ook de effecten van de voorgaande scheidingsstappen met magneten en Eddy current-scheider opgenomen. In de figuren 5.8 en 5.9 wordt voor de diverse materialen weergegeven hoe het verloop van concentratie en rendement is na een bepaalde scheidingsstap.

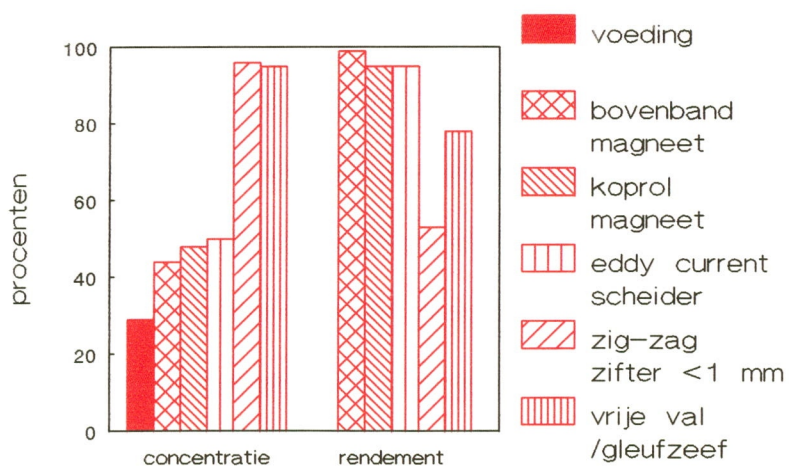


Figuur 5B Procesroute combinatie B

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties

Tabel 5.10 Scheidingsresultaten koperfractie uit onderdelenmix

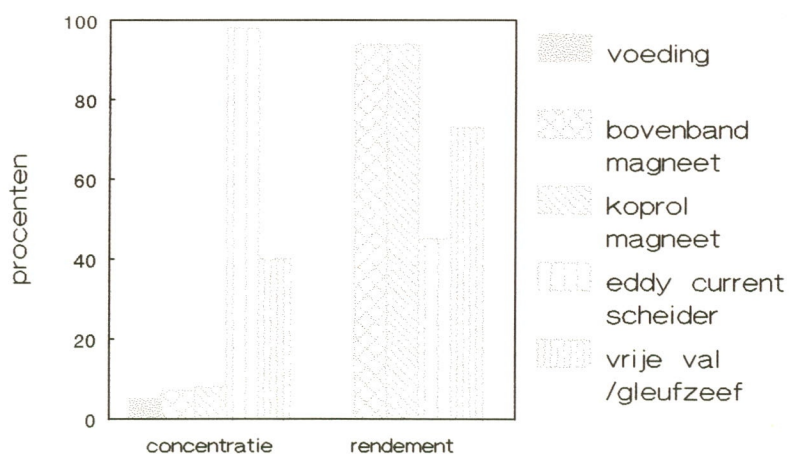
	Koper concentratie (%)	Koper rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	29	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	44	99
Koprolmagneet	48	95
Eddy current-scheider	50	95
Na behandeling/scheiding < 1 mm zeeffractie met		
Zig-zagzifter	96	53
Na behandeling/scheiding > 1 mm fractie 5 tot en met 7 vrije val separator met		
Gleufzeef	95	78



Figuur 5.8 Scheidingsresultaten koperfractie uit onderdelenmix

Tabel 5.11 Scheidingsresultaten aluminiumfractie uit onderdelenmix

	Aluminium concentratie (%)	Aluminium rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	5	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	7	94
Koprolmagneet	8	94
Eddy current-scheider	98	45
Na behandeling/scheiding > 1 mm fractie 2 tot en met 4 vrije val separator met		
Gleufzeef	40	73



Figuur 5.9 Scheidingsresultaten aluminiumfractie uit onderdelenmix

Tabel 5.12 Scheidingsresultaten restfractie (kunststoffen, papier, keramiek) uit onderdelenmix

	Rest concentratie (%)	Rest rendement (%)
Onderdelenmix (als voeding)	28	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	43	100
Koprolmagneet	44	89
Eddy current-scheider	46	89
Na behandeling/scheiding < 1 mm zeeffractie met		
Zig-zagzifter	74	6
Na behandeling/scheiding > 1 mm fractie 1 tot en met 7 vrije val separator met		
Gleufzeef	90	78

Conclusies

Voor het terugwinnen van de koperfractie is de combinatie van het scheiden van de fractie < 1 mm met de zig-zagzifter en het scheiden van de fractie > 1 mm met de vrije val separator toepasbaar. Vooral met de zig-zagzifter wordt het koper uit de zeeffractie < 1 mm zeer efficiënt afgescheiden. Het afscheiden van de koperfractie uit de zeeffractie > 1 mm met de combinatie van vrije val separator/gleufzeef gaat minder goed als met de in combinatie A toegepaste combinatie van luchttafel/elektrostaat.

Voor het terugwinnen van de aluminiumfractie is de Eddy current-scheider toepasbaar. Het rendement van deze scheidingsstap is echter slecht 45%; dit omdat met de Eddy current-scheider alleen grof aluminium wordt afgescheiden en het draadvormig aluminium pas bij toepassing van de volgende scheidingsstappen vrij komt. Het aluminium rendement kan worden verhoogd door het behandelen van de > 1 mm zeeffractie met de combinatie van vrije val separator/gleufzeef. De metaalfractie die daarbij wordt afgescheiden, bevat echter in verhouding minder aluminium, waardoor de aluminiumconcentratie afneemt.

5.4 Evaluatie

Voor het recyclen van de onderdelenmix, met als voornaamste doel het concentreren van de non-ferrometalen, zijn de opeenvolgende toegepaste processtappen:

- voorverkleinen/ontsluiten met hoog toerental maalapparatuur;
- verwijderen van ferrofractie met bovenband- en koprolmagneet;
- verwijderen van grove non-ferrofractie met de Eddy current-scheider;
- naverkleinen met granulator;
- vormbehandelen met prallmolen;
- zeven met 1 mm zeef;

- scheiden van zeeffracties met de combinaties luchttafel/elektrostaat of zig-zagzifter/vrije val separator.

Voor de verschillende processtappen kunnen de prestaties als volgt worden samengevat:

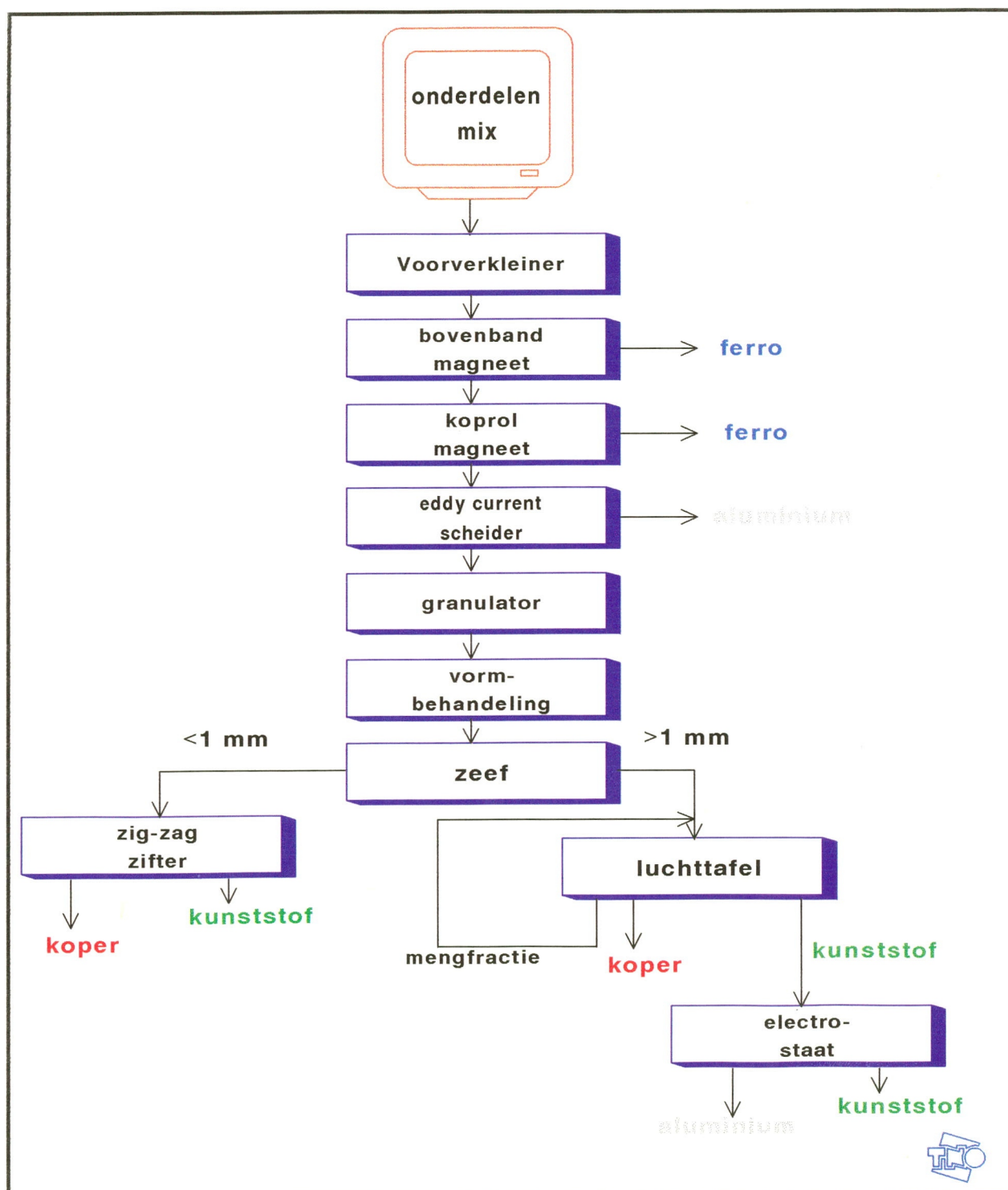
- De ferrofractie wordt door de toegepaste magneetcombinatie voor 100% verwijderd. Hierbij komt echter circa 10% ander materiaal mee.
- De massieve non-ferrodelen zijn effectief te verwijderen met een Eddy current-scheider. Deze fractie bestaat vrijwel volledig uit aluminium.
- Vormbehandelen van het te scheiden fijn non-ferro/kunststofmengsel is voor de toepassing van de meeste scheidingstechnieken noodzakelijk. Dit met name vanwege het gegeven dat niet vormbehandeld materiaal draadvormig dun koper bevat, dat sterk de neiging heeft in elkaar te haken. Dit leidt zowel bij de toevoer als ook tijdens het scheidingsproces tot verstoppingen.
- De fijne non-ferrofractie kan met een zuiverheid van meer dan 95% worden afgescheiden door toepassing van combinaties van scheidingsapparaten.
Voor de zeeffractie < 1 mm levert de toepassing van de zig-zagzifter de beste prestaties.
Voor de zeeffractie > 1 mm wordt de combinatie luchttafel/elektrostaat aanbevolen, omdat hiermee hogere rendementen dan met de combinatie vrije val separator/gleufzeef zijn te realiseren.
- Overwogen moet worden, ter verbetering van de scheidingsprestaties, om uit de zeeffractie > 1 mm de deeltjes > 2 mm te verwijderen en deze na te verkleinen.

5.5 Voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de onderdelenmix

In figuur 5.10 wordt een voorkeur verwerkingsroute voor de recycling van de onderdelenmix weergegeven.

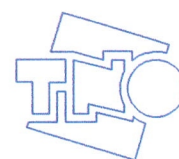
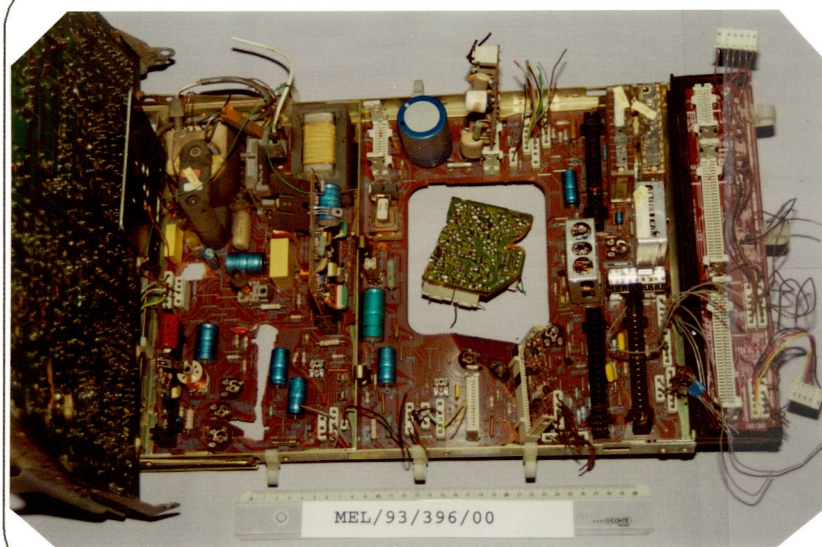
In dit schema zijn na de ontijzering en de verwijdering van massieve non-ferrodelen een granulatie- en vormbehandelingsstap opgenomen.

Vervolgens wordt het materiaal verdeeld in twee zeeffracties. De zeeffractie < 1 mm wordt met de zig-zagzifter gescheiden in een non-ferro- en een kunststof/restfractie. De zeeffractie > 1 mm wordt gescheiden met een luchttafel. Eventueel kan de kunststof/restfractie die na het scheiden met de luchttafel ontstaat worden nagezuiverd met de elektrostaat.



Figuur 5.10 Voorkeur verwerkingsroute voor de onderdelenmix

6 Recyclen van de panelen



6.1 Algemeen

Een van de onderdelen in een TV toestel is het paneel. Onder het paneel wordt verstaan de printplaat met de daarbij behorende bevestigingsframes. Het paneel vertegenwoordigt 14,5% van het totale gewicht van de TV. Het selectief demonteren hiervan, gevolgd door separate verwerking is mogelijk zinvol en is nader toegelicht in het eindrapport, deel 1¹⁾.

In het paneel komen zeer veel materialen voor.

De globale materiaalsamenstelling van het paneel is:

ferro	48 gew%;
non-ferro	26 gew%;
kunststoffen/rest	26 gew%.

Deze globale materiaalsamenstelling is berekend op basis van de resultaten van dit onderzoek. In de volgende hoofdstukken zullen ook meer gedetailleerde materiaalsamenstellingen worden gepresenteerd. Daarbij wordt naast de ferro- en non-ferrometalen ook aandacht besteedt aan waardevolle edele metalen en de potentieel milieubelastende materialen.

De materialen, aanwezig in het paneel, kunnen via de processtappen verkleinen en scheiden worden teruggewonnen. Daarbij ligt de nadruk op het terugwinnen van non-ferrometalen. Het onderzoek van deze processtappen is met een partij panelen van circa 1000 kg uitgevoerd.

6.2 Voorverkleinen/ontsluiten van het paneel

Voor de eerste verkleinstap zijn een viertal voorverkleiners, zoals beschreven in 2.2, die qua maalsysteem verschillen uitgetest. Deze voorverkleiners zijn op te delen in twee soorten respectievelijk:

Soort 1: toerental < 100 rpm, verkleinen met behulp van messenparen.

Soort 2: toerental > 500 rpm, verkleinen met behulp van hamers of ringen.

De maalfractionen verkregen met de diverse voorverkleiners zijn onder andere gekarakteriseerd door deeltjesgrootteverdeling en ontsluiting.

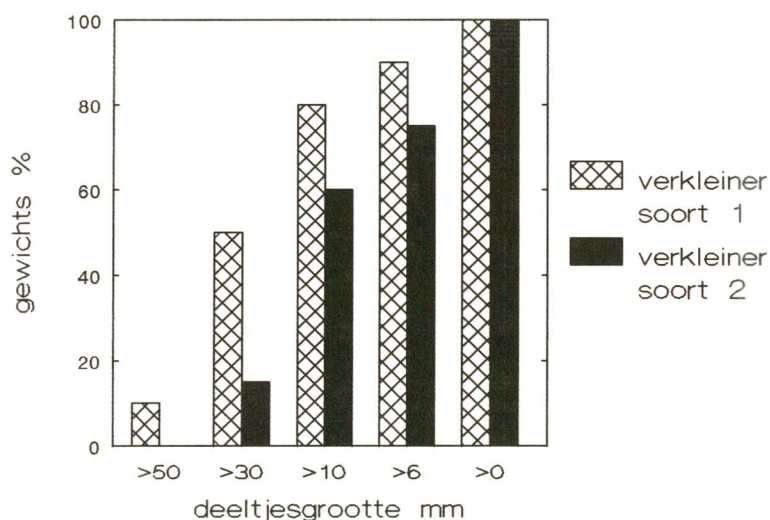
De resultaten van de voorverkleiningsexperimenten met panelen zijn samengevat in tabel 6.1 en figuur 6.1.

Voor de conclusies die kunnen worden getrokken uit dit onderzoek wordt verwezen naar 2.2.

¹⁾ TNO-rapport nr. 94-442.

Tabel 6.1 Resultaten voorverkleiningsexperimenten met panelen

Deeltjesgrootte (mm)	Voorverkleiner Soort 1	Voorverkleiner Soort 2
> 50 mm	10%	0%
> 30 mm	50%	15%
> 10 mm	80%	60%
> 6 mm	90%	75%
Ontsluiting	< 80%	> 90%



Figuur 6.1 Resultaten voorverkleiningsexperimenten met panelen

6.3 Scheiden van de voorverkleinde panelen in materiaalstromen

De prestaties van een scheidingsstap, voor een bepaald materiaal, worden beoordeeld door het bepalen van de concentratie en het rendement van dat materiaal. Daarbij worden de volgende definities gehanteerd:

De 'concentratie' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een fractie gedeeld door de totale gewichtshoeveelheid van de fractie $\times 100\%$.

Het 'rendement' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een afgescheiden fractie gedeeld door de gewichtshoeveelheid van dat materiaal in het onderdeel $\times 100\%$.

De eindresultaten van de scheidingsexperimenten worden in de volgende hoofdstukken gepresenteerd en toegelicht.

Voordat de voorverkleinde panelen in materiaalstromen kunnen worden gescheiden is het noodzakelijk dat verder wordt naverkleind.

Alvorens wordt naverkleind worden altijd massieve metalen delen verwijderd om beschadiging van de naverkleiner, een granulator, te voorkomen.

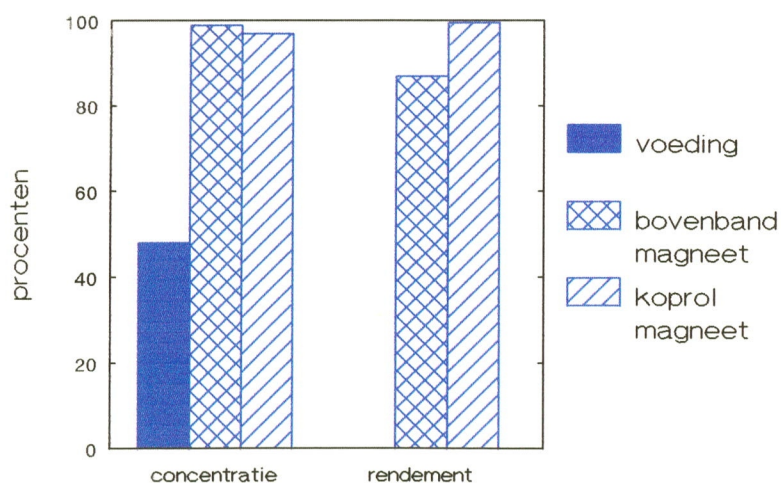
6.3.1 Afscheiden van ferrofractie

De verwijdering van de massieve magnetische delen geschiedt met behulp van een bovenband- en koprolmagneet.

De resultaten van het met behulp van magneten afscheiden van ferrometalen uit de voorverkleinde panelen worden weergegeven in tabel 6.2 en figuur 6.2.

Tabel 6.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit panelen

	Ferro concentratie (%)	Ferro rendement (%)
Panelen (als voeding)	48	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	99	87
Koprolmagneet	97	99,5



Figuur 6.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit panelen

6.3.2 Afscheiden van grove non-ferrofractie

Voordat met de naverkleining kan worden gestart, worden eerst nog de grote non-ferrodelen uit de voeding verwijderd om schade aan de naverkleiningsapparatuur te voorkomen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een Eddy current-scheider. Met de Eddy current-scheider wordt een non-ferrofractie verkregen die voornamelijk uit aluminium bestaat. Deze hoeveelheid vormt 83% van de totale hoeveelheid aluminium in de panelen. Indien mogelijk worden aan deze fractie in een later stadium van het recyclingsproces andere geconcentreerde aluminiumfracties toegevoegd. In tabel 6.3 worden de resultaten van deze scheidingsstap weergegeven.

Tabel 6.3 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit panelen

	Aluminium concentratie (%)	Aluminium rendement (%)
Voeding	27	94
Na behandeling/scheiding met		
Eddy current-scheider	90	83

6.3.3 Afscheiden van fijne non-ferrofracties

Voor de meeste hierna toegepaste scheidingstechnieken dient de gewenste deeltjesgrootte ruim beneden de 10 mm te liggen. Ook is, vanwege de aanwezigheid van dunaderig koperdraad in elektronica afvallen, meestal een vormbehandeling (zie 2.4) gewenst.

Voor de naverkleining en vormbehandeling van de panelenfractie is gebruik gemaakt van de onder 2.3 en 2.4 beschreven apparatuur.

Het naverkleinde/vormbehandelde paneelmateriaal is gebruikt voor het uitvoeren van scheidingsonderzoek.

In dit onderzoek met het paneel zijn twee scheidingsapparaten uitgetest en qua prestatie met elkaar vergeleken.

Deze scheidingsapparaten zijn:

- luchttafel;
- elektrostaat.

Op basis van de gegevens verkregen uit de scheidingsproeven kan de globale samenstelling van het paneel worden berekend.

Deze is:

ferro	48 gew%;
non-ferro	26 gew%;
kunststoffen/rest	26 gew%.

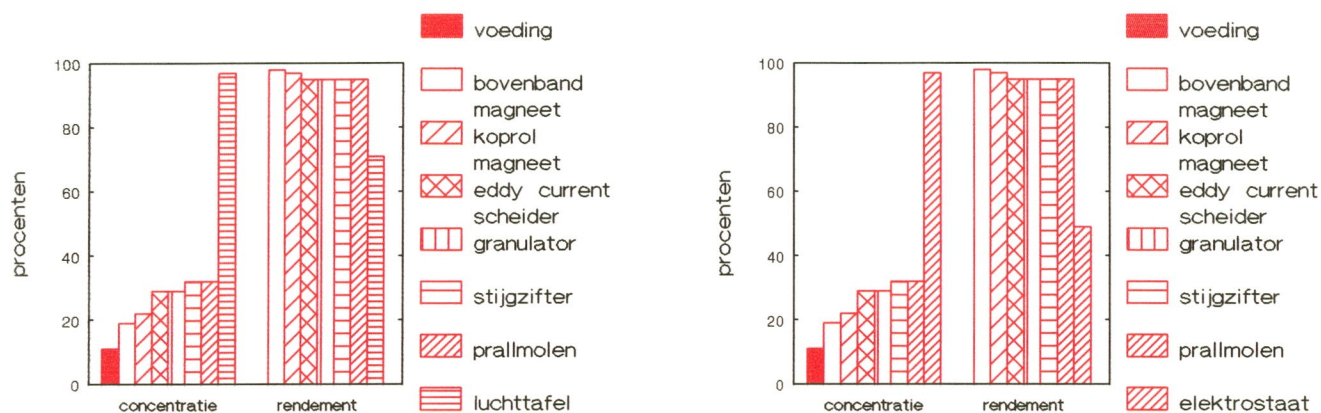
Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties

Voor deze materialen geven de tabellen 6.4 tot en met 6.6 de scheidingsresultaten, in de vorm van % concentratie en % rendement, na een bepaalde behandelings- en scheidingsstap weer. In deze tabellen zijn ook de effecten van de voorgaande scheidingsstappen met de magneten en Eddy current-scheider opgenomen. Deze resultaten zijn verkregen na één procesoperatie met de scheidingsapparatuur. Eventuele mengfracties, zoals die ontstaan bij de toepassing van luchttafel en de elektrostaat, zijn niet teruggevoerd.

In de figuren 6.3 en 6.4 wordt voor koper en aluminium weergegeven hoe het verloop van concentratie en rendement is na een bepaalde scheidingsstap.

Tabel 6.4 *Scheidingsresultaten koperfractie uit panelen*

	Koper concentratie (%)	Koper rendement (%)
Panelen (als voeding)	11	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	19	98
Koprolmagneet	22	97
Eddy current-scheider	29	95
Na behandeling/scheiding van de fijne non-ferrofractie met		
Granulator	29	95
Stijgzifter	32	95
Prallmolen	32	95
Luchttafel	97	71
Elektrostaat	97	49

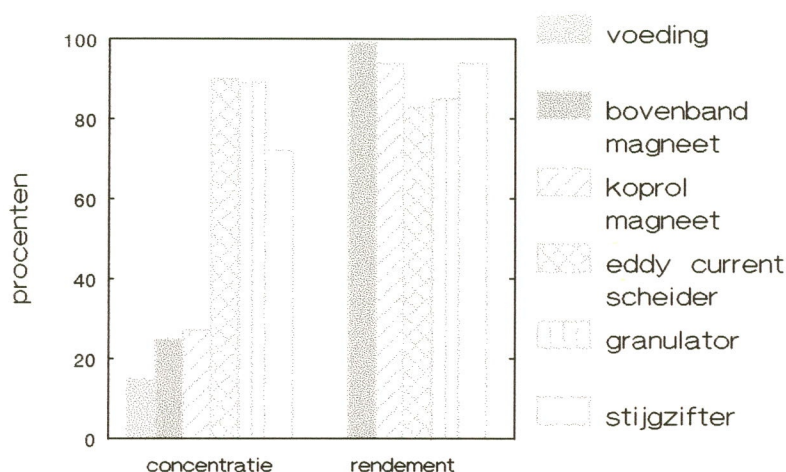


Figuur 6.3 Scheidingsresultaten koperfractie uit panelen

Tabel 6.5 Scheidingsresultaten aluminiumfractie uit panelen

	Aluminium concentratie (%)	Aluminium rendement (%)
Panelen (als voeding)	15	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	25	99
Koprolmagneet	27	94
Eddy current-scheider	90	83
Na behandeling/scheiding van de fijne non-ferrofractie met		
Granulator	89	85
Stijgzifter	72	94

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties



Figuur 6.4 Scheidingsresultaten aluminiumfractie uit panelen

Tabel 6.6 Scheidingsresultaten restfractie (kunststoffen, papier, keramiek) uit panelen

	Rest concentratie (%)	Rest rendement (%)
Panelen (als voeding)	26	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	45	99,5
Koprolmagneet	51	98
Eddy current-scheider	66	94
Granulator	66	93
Stijgzifter	68	87
Prallmolen	68	86
Luchttafel	95	71
Elektrostaat	87	57

Conclusies

Voor het terugwinnen van de koperfractie uit de panelen is de luchttafel goed toepasbaar. Voor verhoging van het rendement hiervan moeten mengfracties worden teruggevoerd of nabehandeld met de elektrostaat.

Voor het terugwinnen van de aluminiumfractie is de Eddy current-scheider toepasbaar. Het rendement van deze scheidingsstap is 83%; dit omdat met de Eddy current-

scheider alleen grof aluminium wordt afgescheiden en draadvormig aluminium pas bij volgende scheidingsstappen gemengd met andere non-ferrometalen vrijkomt.

6.4 Gedetailleerde samenstelling van de panelen

Voor het berekenen van de gedetailleerde samenstelling van de panelen zijn naast de handsorteringsgegevens vooral de analysegegevens, verkregen via het uitvoeren van chemische analyses van de met de luchttafel afgescheiden fracties, gebruikt. De met deze gegevens berekende samenstelling van de panelen is:

IJzer	48,0%
Kunststof	20,5%
Aluminium	15,2%
Koper	8,6%
Keramiek	5,1%
Tin	8600 ppm
Lood	7200 ppm
Zink	4500 ppm
Chloor ⁻	3800 ppm
Antimoon	1200 ppm
Broom ⁻	1100 ppm
Nikkel	450 ppm
Zilver	100 ppm
Cadmium	40 ppm
Mangaan	30 ppm
Chroom	30 ppm
Arseen	10 ppm
Goud	5 ppm
Tantalium	< 8 ppm
Paladium	< 8 ppm
Fluor ⁻	< 5 ppm
Beryllium	< 1 ppm

6.4.1 Samenstelling van de fijne non-ferrofractie afkomstig uit panelen

De fijne non-ferrofractie wordt, zoals in 6.3.3 is aangegeven, afgescheiden met een luchttafel.

De globale samenstelling van deze fractie is:

Koper	80,6%
Tin	6,3%
Lood	5,7%
Zink	4,3%
Aluminium	0,1%
Zilver	0,1%
Kunststof/diversen	2,9%

De verdeling van de diverse, in de naverkleinde/vormbehandelde paneelfractie, aanwezige materialen over de met de luchttafel geproduceerde non-ferro-, kunststof- en stoffracties is:

- aluminium, koper, lood, tin zink en zilver komen voor meer dan 80% terecht in de non-ferrofractie;
- antimoon, chroom, arseen, chloor⁻ en broom⁻ komen voor meer dan 80% terecht in de kunststof/stoffracties;
- cadmium en goud komen voor 50% terecht in de non-ferro- en kunststof/stoffracties.

6.4.2 Aanwezigheid van potentieel milieubelastende materialen in panelen

Voor een aantal materialen die in panelen voorkomen zijn zogenaamde WGA¹⁾ grenzen vastgelegd. Indien de concentraties in materiaalfracties boven de WGA-grens liggen, wordt indien de betreffende fractie als afval wordt afgevoerd, dit in principe als Gevaarlijk Afval aangemerkt.

	WGA-grenswaarde	Gemeten in panelen
	(mg/kg)	(mg/kg)
Lood	5000	7200
Cadmium	50	40
Antimoon	50	1200
Arseen	50	10
Organisch chloor	5000	3800
Organisch broom	5000	1100

Na scheiden van de panelen in materialen, met als laatste scheidingsstap de luchttafel, komen deze materialen hoofdzakelijk terecht in de diverse met de luchttafel verkregen fijne non-ferrofracties. Voor de verdeling van de materialen over deze fracties wordt verwezen naar 6.4.1.

6.4.3 PCB²⁾ gehalten in afgescheiden fracties van panelen

In dit onderzoek zijn bij de demontage van de panelen uit de TV's zijn geen componenten van de printplaten verwijderd. Dit betekent dat eventueel PCB bevattende onderdelen zijn onderworpen aan de toegepaste recycling processen. Daardoor kunnen bij de verwerking van de panelen met de stijgzifter en bij het vormbehandelen fracties ontstaan die mogelijk PCB bevatten. Aan enkele van deze fracties is een kwan-

¹⁾ WGA = Wet Gevaarlijk Afval.

²⁾ PCB = Poly Chloor Bifenylen.

titatieve bepaling uitgevoerd voor 29 PCB-cogeneren. De WGA-grens voor PCB bedraagt 50 mg/kg.

De resultaten van deze analyses zijn:

Fractie	Gehalte van het paneel (gew.%)	PCB totaal (mg/kg)
Afgezogen met stijgzifter (Al-folie/kunststof)	3,3	43
Stof ontstaan bij vormbehandeling	0,1	60
Non-ferro/kunststof mengsel naar luchttafel	33,1	21

6.5 Evaluatie

Voor het recyclen van de panelen, met als voornaamste doel het concentreren van de non-ferrometalen, zijn de opeenvolgende toegepaste processtappen:

- voorverkleinen/ontsluiten met hoog toerental maalapparatuur;
- verwijderen van ferrofractie met bovenband- en koprolmagneet;
- verwijderen van grove non-ferrofractie met de Eddy current-scheider;
- naverkleinen met granulator;
- vormbehandelen met prallmolen;
- scheiden met luchttafel of elektrostaat.

Voor de verschillende processtappen kunnen de prestaties als volgt worden samengevat:

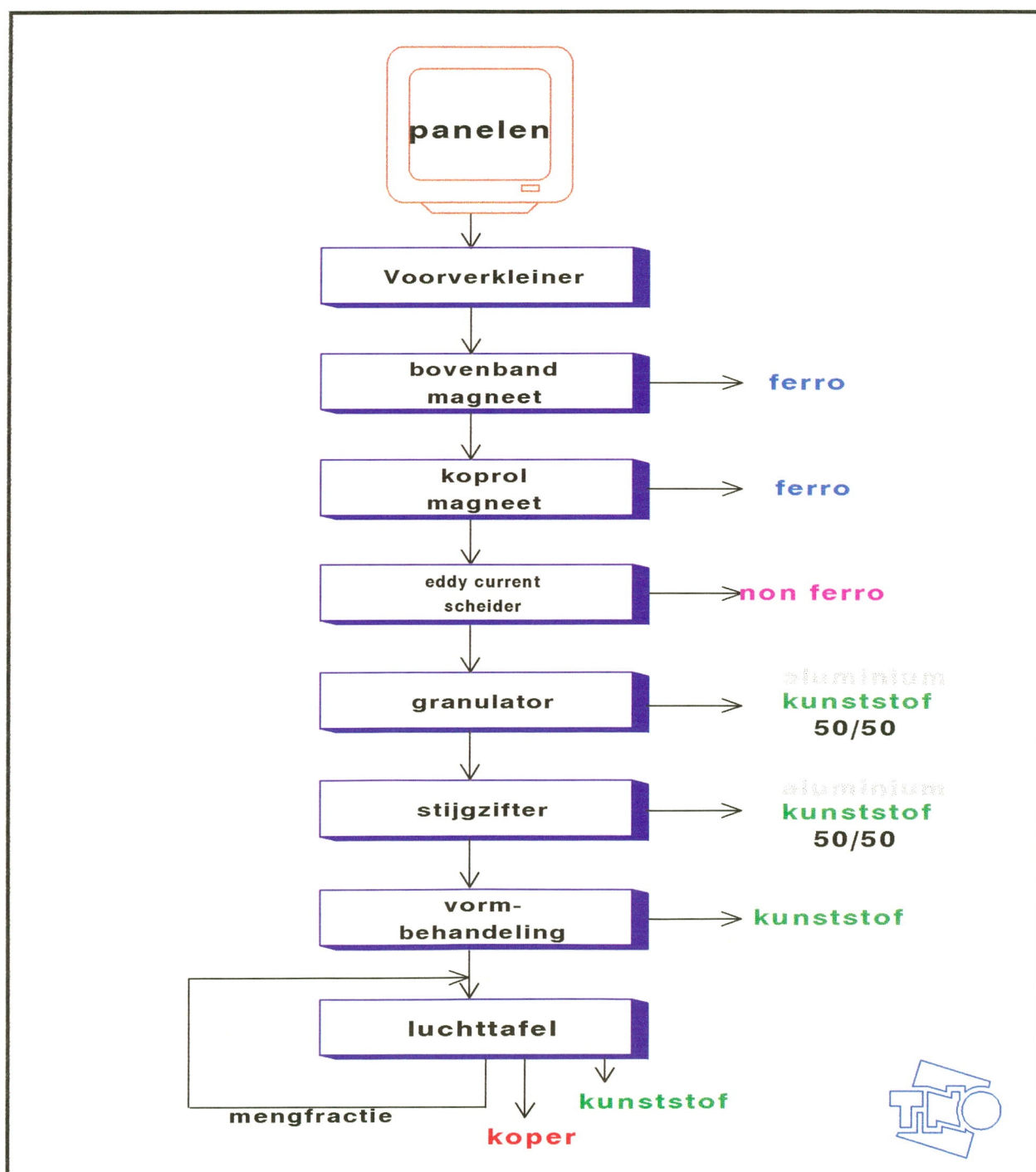
- De ferrofractie wordt door de toegepaste magneetcombinatie voor 99,5% verwijderd. Hierbij komt echter circa 3% ander materiaal mee.
- De massieve non-ferrodelen zijn effectief te verwijderen met een Eddy current-scheider. Deze fractie bestaat vrijwel volledig uit aluminium.
- Vormbehandelen van het te scheiden fijn non-ferro/kunststofmengsel is voor de toepassing van de meeste scheidingstechnieken noodzakelijk. Dit met name vanwege het gegeven dat niet vormbehandeld materiaal draadvormig dun koper bevat, dat sterk de neiging heeft in elkaar te haken. Dit leidt zowel bij de toevoer als ook tijdens het scheidingsproces tot verstoppingen.
- De fijne non-ferrofractie kan met een zuiverheid van meer dan 95% worden afgescheiden door toepassing van de luchttafel of de elektrostaat.

De luchttafel verdient de voorkeur, omdat hiermee een hoger rendement kan worden gerealiseerd dan met de elektrostaat. Dit rendement met de luchttafel kan aanzienlijk worden verhoogd indien de mengfractie (middlings) wordt teruggevoerd naar de voeding. Eventueel kunnen echter ook combinaties van scheidingstechnieken worden toegepast. In het onderzoek met de onderdelenmix (hoofdstuk 5) zijn ook combinaties van scheidingstechnieken uitgetest.

6.6 Voorkeur verwerkingsroute voor het recyclen van de panelen

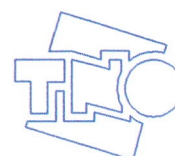
In figuur 6.6 wordt een voorkeur verwerkingsroute voor de recycling van de panelen weergegeven.

In dit schema zijn na de ontijzering en de verwijdering van massieve non-ferrodelen een granulatie- en vormbehandelingsstap opgenomen. Vervolgens wordt het materiaal gescheiden met de luchttafel in een fijne non-ferro- en kunststoffractie.



Figuur 6.5 Voorkeur verwerkingsroute voor de panelen

7 Recyclen van de totale TV



7.1 Algemeen

Als referentie voor het onderzoek, waarbij de via selectief demonteren verkregen onderdelenfracties van TV's (zie hoofdstukken 4, 5 en 6) zijn verwerkt, is ook een verwerkingsonderzoek met de totale TV uitgevoerd.

De zinvolheid van het selectief demonteren van onderdelen uit TV's, gevolgd door separate verwerking is nader toegelicht in het eindrapport, deel 1¹⁾.

In de totale TV komen zeer veel materialen voor.

De voornaamste materialen aanwezig in de totale TV zijn:

glas	50 gew%;
ferro	15 gew%;
non-ferro	14 gew%;
hout/kunststof/overige	21 gew%.

Deze globale materiaalsamenstelling is berekend op basis van de resultaten van dit onderzoek.

Het doel van dit verwerkingsonderzoek is na te gaan of, ook zonder de relatief kostbare demontagestap, de materialen aanwezig in de totale TV door toepassing van de processtappen verkleinen en scheiden voldoende zuiver kunnen worden teruggewonnen. Hierbij ligt de nadruk op het terugwinnen van glas, ferro- en non-ferrometalen. Het onderzoek is met een partij TV's met een totaal gewicht van circa 1400 kg uitgevoerd.

7.2 Voorverkleinen/ontsluiten van de totale TV

Voor de eerste verkleinstap is een Scandinavian Recycling ringshredder 8/10, zoals beschreven in 2.2 toegepast.

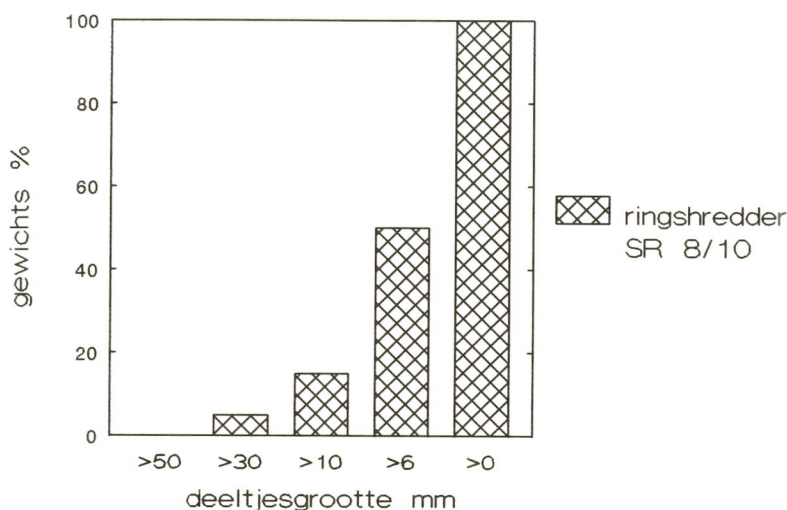
De maalfractie verkregen met de ringshredder is gekarakteriseerd door deeltjesgrootteverdeling en ontsluiting.

De resultaten van de voorverkleining van de totale TV zijn samengevat in tabel 7.1 en figuur 7.1.

Tabel 7.1 Resultaten voorverkleining van de totale TV

Deeltjesgrootte (mm)	Voorverkleiner ringshredder SR 8/10
> 50 mm	0%
> 30 mm	5%
> 10 mm	15%
> 6 mm	50%
Ontsluiting	> 90%

¹⁾ TNO-rapport nr. 94-442.



Figuur 7.1 Resultaten voorverkleining van de totale TV

7.3 Scheiden van de voorverkleinde TV's in materiaalstromen

De prestaties van een scheidingsstap, voor een bepaald materiaal, worden beoordeeld door het bepalen van de concentratie en het rendement van dat materiaal. Daarbij worden de volgende definities gehanteerd:

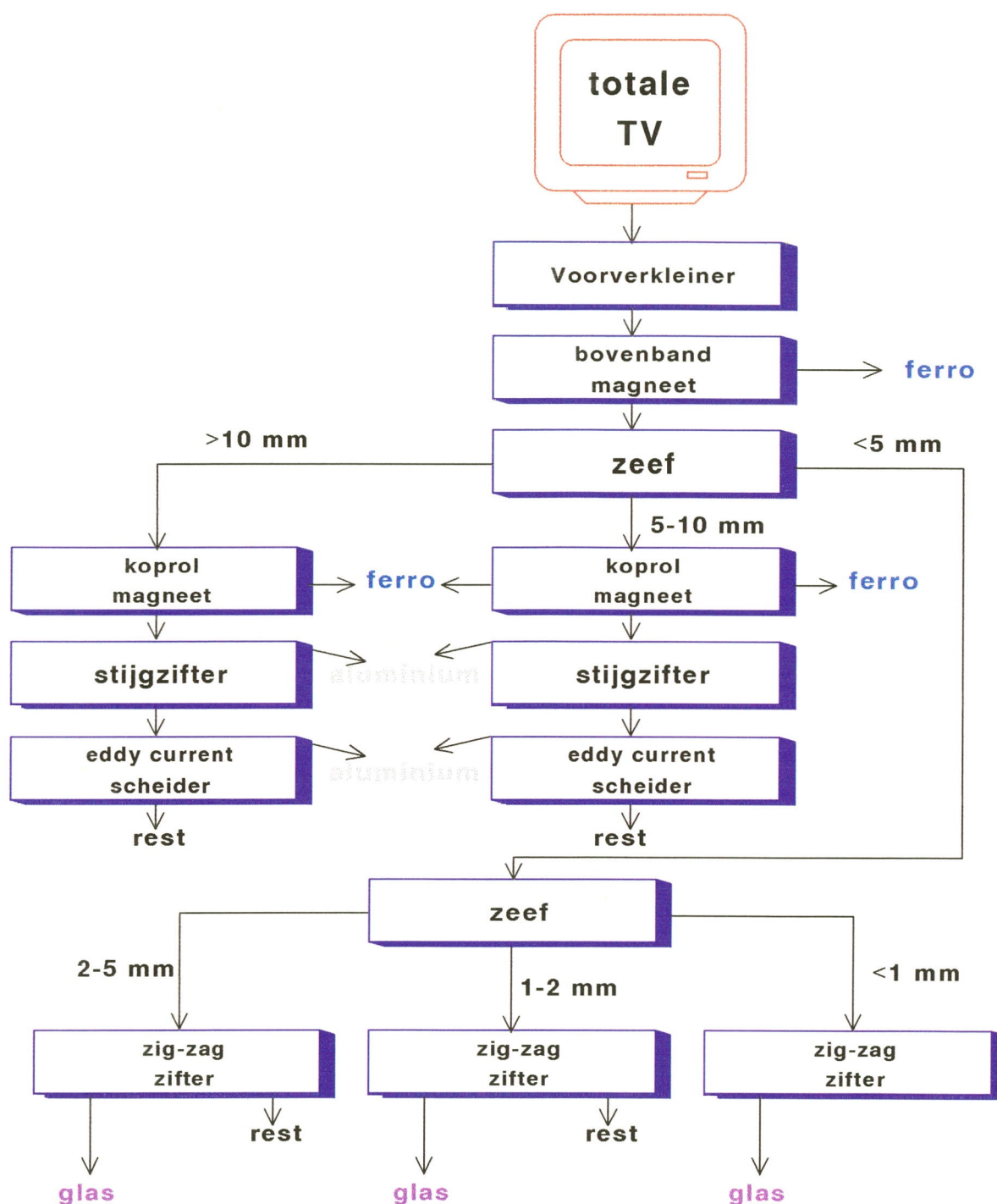
De 'concentratie' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een fractie gedeeld door de totale gewichtshoeveelheid van de fractie $\times 100\%$.

Het 'rendement' is de gewichtshoeveelheid van één bepaald materiaal in een afgescheiden fractie gedeeld door de gewichtshoeveelheid van dat materiaal in het onderdeel $\times 100\%$.

De eindresultaten van de scheidingsexperimenten worden in de volgende hoofdstukken gepresenteerd en toegelicht.

Bij het verwerkingsonderzoek uitgevoerd met de onderdelenfracties is, na verwijdering van de massieve metalen delen, altijd een naverkleiningsstap toegepast.

Deze naverkleiningsstap is bij het verwerkingsonderzoek met de totale TV niet toegepast, omdat de aanwezigheid van glas storend werkt. Gekozen is voor een verwerkingsroute waarbij na de voorverkleining en bovenbandmagneet, door zeven het maalprodukt wordt opgedeeld in drie fracties van respectievelijk > 10 mm, $5 - 10$ mm en < 5 mm. Vervolgens zijn uit de zeeffracties > 10 mm en $5 - 10$ mm de ferro resten verwijderd met een koprolmagneet, de aluminium folies verwijderd met een stijgzifter en de massieve non-ferrodelen verwijderd met een Eddy current-scheider. Tenslotte is de zeeffractie < 5 mm via zeven/ziften gescheiden in een glas- en restfractie. De toegepaste verwerkingsroute wordt weergegeven in figuur 7A.



Figuur 7A Verwerkingsroute voor de totale TV

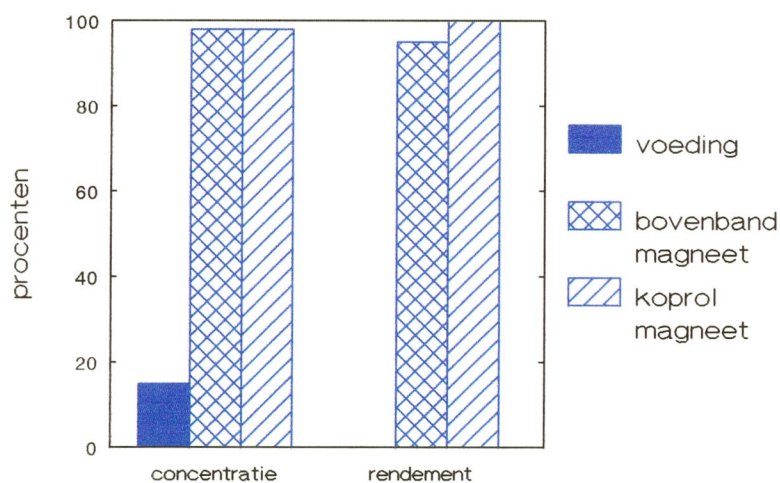
7.3.1 Afscheiden van ferrofractie

De verwijdering van de massieve magnetische delen geschiedt met behulp van een bovenband- en koprolmagneet.

De resultaten van het met behulp van magneten afscheiden van ferrometalen uit de voorverkleinde TV's worden weergegeven in tabel 7.2 en figuur 7.2.

Tabel 7.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit totale TV

	Ferro concentratie (%)	Ferro rendement (%)
Totale TV (als voeding)	15	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	98	95
Koprolmagneet	98	100



Figuur 7.2 Scheidingsresultaten ferrofractie uit totale TV

7.3.2 Afscheiden van grove non-ferrofractie

Voordat met het zeven/ziften kan worden gestart, worden eerst nog de grote non-ferrodelen uit de diverse zeeffracties verwijderd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een Eddy current-scheider. Met de Eddy current-scheider wordt een non-ferrofractie verkregen die voornamelijk uit aluminium bestaat. Dit is 59% van de totale gewichtshoeveelheid non-ferrometalen, aanwezig in de TV. Indien mogelijk worden aan deze fractie andere geconcentreerde aluminiumfracties, die in een ander stadium van het recyclingsproces ontstaan, toegevoegd.

In tabel 7.3 worden de resultaten van deze scheidingsstap weergegeven.

Tabel 7.3 Scheidingsresultaten non-ferrofractie uit totale TV

	Non-ferro concentratie (%)	Non-ferro rendement (%)
Voeding	13	78
Na behandeling/scheiding met		
Eddy current-scheider	100	59

7.3.3 Afscheiden van fijne non-ferrofractie

De fijne non-ferrofractie bestaat voornamelijk uit aluminiumfolie afkomstig van de condensatoren en uit dunaderig koperdraad.

Voor het afscheiden van de aluminiumfolie is een stijgzifter toegepast. Hiermee wordt 23% van de totale gewichtshoeveelheid non-ferrometalen aanwezig in de TV teruggewonnen. De rest van de non-ferrometalen, 18% van het totaal aanwezig in TV's, kan niet verder worden afgescheiden en belandt in de restfractie die hoofdzakelijk bestaat uit hout/kunststof.

7.3.4 Afscheiden van glasfractie

Voor het afscheiden van het glas uit de diverse zeeffracties, vrij van grof ferro en non-ferro, is gebruik gemaakt van een zig-zagzifter. Daarbij wordt geconstateerd dat voor de zeeffracties > 10 mm en 5 - 10 mm door toepassing van de zig-zagzifter geen scheiding tussen glas en restmaterialen is te realiseren. De brede spreidingen in deeltjesgrootte werken verstorend op het scheidingsproces. Aangezien deze fracties samen slechts 7% van het aanwezige glas bevatten, is afgezien van een verdere naverkleining van deze fracties.

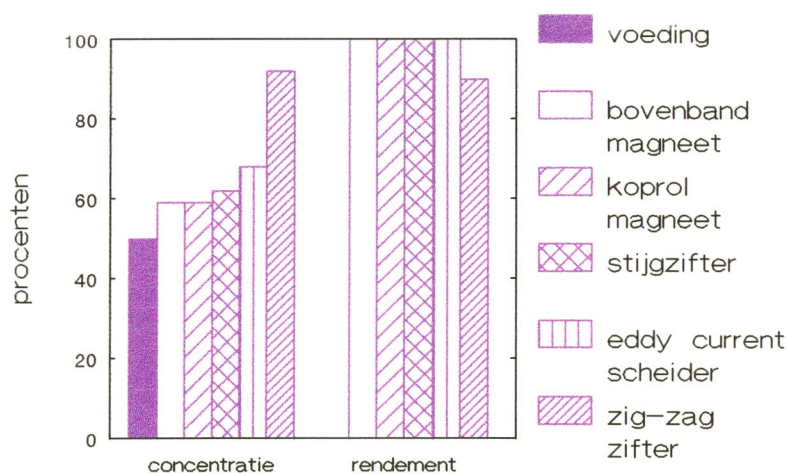
De zeeffractie < 5 mm bevat 93% van al het aanwezige glas en is daarom gebruikt voor de verdere scheidingsexperimenten. Eerst is de zeeffractie < 5 mm via zeven verdeeld in drie fracties respectievelijk 2 - 5 mm, 1 - 2 mm en < 1 mm. Dit om de resultaten van het afscheiden van het glas met de zig-zagzifter te verbeteren. Door toepassing van de zig-zagzifter was het mogelijk redelijk schone glasfracties uit deze zeeffracties af te scheiden.

Tabel 7.4 geeft de resultaten, in de vorm van % concentratie en % rendement, na een bepaalde behandelings- en scheidingsstap weer. In deze tabel zijn ook de effecten van de voorgaande scheidingsstappen met de magneten en Eddy current-scheider opgenomen. Deze resultaten zijn verkregen na één procesoperatie met de scheidingsapparatuur.

In figuur 7.3 wordt voor het glas weergegeven hoe het verloop van concentratie en rendement is na een bepaalde scheidingsstap.

Tabel 7.4 Scheidingsresultaten glasfractie uit totale TV

	Glas concentratie (%)	Glas rendement (%)
Totale TV (als voeding)	50	
Na behandeling/scheiding met		
Bovenbandmagneet	59	100
Koprolmagneet	59	100
Stijgzifter	62	100
Eddy current-scheider	68	100
Na behandeling/scheiding van de zeeffractie van < 5 mm met		
Zeven/zifter	92	90



Figuur 7.3 Scheidingsresultaten glasfractie uit totale TV

7.4 Evaluatie

Voor het recyclen van de totale TV, met als voornaamste doel het concentreren van de non-ferrometalen en het glas, zijn de opeenvolgende toegepaste processtappen:

- voorverkleinen/ontsluiten met hoog toerental maalapparatuur;
- verwijderen van ferrofractie met bovenbandmagneet;
- scheiden in fracties > 10 mm, 5 - 10 mm en < 5 mm met zeven;
- verwijderen van rest ferro uit zeeffracties > 10 mm en 5 - 10 mm met koprolmagneet;
- verwijderen van aluminiumfolie uit zeeffracties > 10 mm en 5 - 10 mm met stijgzifter;
- verwijderen van grove non-ferrofractie uit zeeffracties > 10 mm en 5 - 10 mm met Eddy current-scheider;
- scheiden van zeeffractie < 5 mm door zeven/ziften in glas- en restfractie.

Voor de verschillende processtappen kunnen de prestaties als volgt worden samengevat:

- De ferrofractie wordt door de toegepaste magneetcombinatie voor 100% verwijderd. Hierbij komt echter circa 2% ander materiaal mee.
- De glasfractie kan voor 90% worden teruggewonnen en heeft een concentratie van 92%.

Het teruggewonnen glas is verontreinigd met non-ferrometalen (2,5 gew%) en hout/kunststof (5,5 gew%) en is hierdoor niet of moeilijk herbruikbaar.

Verdere zuivering hiervan wordt als problematisch beoordeeld.

- De massieve non-ferrodelen zijn te verwijderen met een Eddy current-scheider. De fractie bestaat vrijwel volledig uit aluminium en bevat 59% van de non-ferrometalen aanwezig in TV's.
- Het fijne non-ferro materiaal is maar gedeeltelijk zuiver terug te winnen. In de restfractie, die als afval moet worden afgevoerd, bevindt zich 18% van de non-ferrometalen aanwezig in TV's.
- De restfractie die via deze verwerkingsroute ontstaat is 24 gew% van de totale TV. De samenstelling van deze restfractie is:

glas	20%;
non-ferro	5%;
hout/kunststof/overige	75%.

Deze restfractie moet als afval worden afgevoerd. De samenstelling hiervan bepaald of deze fractie als Gevaarlijk Afval moet worden aangemerkt.

Conclusies

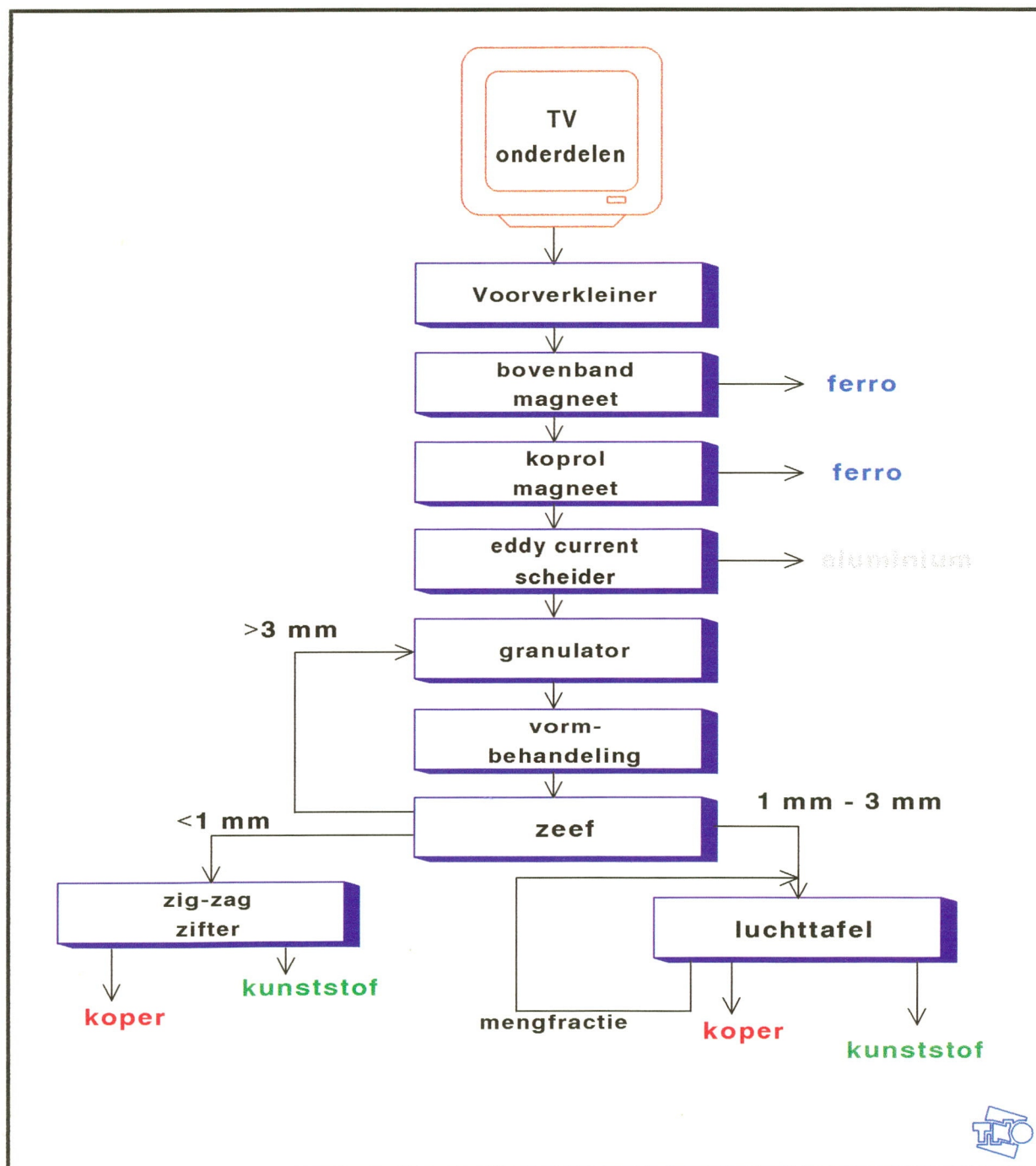
Indien men totale TV toestellen recycled, zonder demontage van de beeldbuis vooraf, kunnen materialen zoals glas, non-ferrometalen en kunststoffen maar gedeeltelijk en veelal met een te lage zuiverheid, die noodzakelijk is voor materiaalhergebruik, worden teruggewonnen.

Dit kan betekenen dat alleen de ferrofractie en een gedeelte van de non-ferrofractie als materialen kunnen worden hergebruikt. De glasfractie en de hout/kunststoffractie, samen circa 75 gew% van de TV, moeten dan als afval worden afgevoerd.

8 Conclusies

- De verwerkingsroute, die wordt toegepast voor het opwerken van 'bruingoed' afvallen, wordt in principe gedicteerd door de relatie prijs versus kwaliteit die de afzetmarkt aan teruggewonnen materialen stelt.
 Voor ferro- en non-ferrometalen bevattende afvallen is al een afzet mogelijk voor fracties met relatief lage metaalconcentraties. Indien afvallen edele metalen bevatten, zijn deze reeds met concentraties van $< 0,05$ gew% edelmetaal afzetbaar. Verhoging van de metaalconcentraties in afvallen wordt alleen uitgevoerd indien dit economisch interessant is. Voor kunststofafvallen echter is momenteel de afzet van licht verontreinigde kunststoffracties al problematisch. Hier worden zuiverheden van meer dan 99% geëist. Verhogen van de zuiverheden van kunststofafvallen zal, ook al is dit theoretisch haalbaar, meestal economisch niet aantrekkelijk zijn.
- Voor de realisatie van de taakstelling van 80 à 85% materiaalhergebruik, is voor beeldbuis bevattend 'bruingoed' minstens de selectieve demontage van de beeldbuis en de omkasting noodzakelijk. De resultaten van het onderzoek met betrekking tot de verwerking van de totale TV hebben aangetoond dat slechts 25% materiaalhergebruik mogelijk is. Dit vanwege het gegeven dat het glas en de kunststof fractie, die worden teruggewonnen bij de verwerking van totale TV's, niet afzetbaar zijn vanwege te lage zuiverheden.
- Bij verwerking van de, via selectieve demontage van TV's verkregen, onderdelenfracties: deflectie-unit, onderdelenmix (totale TV exclusief beeldbuis, omkasting en panelen) en panelen is een materiaalhergebruik van 70 à 80% realiseerbaar. De teruggewonnen materialen zijn ferro- en non-ferro concentraten met een zuiverheid van meer dan 95%. De kunststof bevattende restfractie is naar verwachting niet afzetbaar omdat hierin te veel verontreinigingen in aanwezig zijn.
- De voorkeur verwerkingsroute voor het recycleren van de, via selectieve demontage van TV's verkregen, onderdelenfracties bestaat uit de volgende processtappen:
 - voorverkleinen met hoog toerental maalapparatuur;
 - verwijderen van ferrofractie met bovenband- en koprolmagneet;
 - verwijderen grove non-ferrofractie met wervelstroomscheider;
 - naverkleinen met granulator;
 - vormbehandelen met prallmolen;
 - scheiden op deeltjesgroottes < 1 mm, 1 - 3 mm en > 3 mm met zeven;
 - naverkleinen zeeffractie > 3 mm met granulator;
 - scheiden zeeffractie < 1 mm met zig-zagzifter;
 - scheiden zeeffractie 1 - 3 mm met luchttafel.

Het processchema wordt weergegeven in figuur 8.1.



Figuur 8.1 Voorkeur verwerkingsroute voor TV onderdelen

9 Literatuur

- [1] Dieter Schlag.
Entsorgung von Elektronikaltgeräten. Müll und Abfall 6/92.
- [2] W Plieth.
Strategien für die Trennung komplexer Stoffgemische - zum Beispiel Elektronikschrott. Galvanotechnik D 88348 Saulgau.
Umwelttechnik 85 (1994) nr. 4.
- [3] Dr.-Ing. W Beenken.
Die Aufbereitungstechnik - der Schlüssel zum Recycling. Kerken-Nieukerk.
Aufbereitungs-Technik 33 (1992) nr. 12.
- [4] M Melchiorre et al.
Teilen und Trennen im Recycling-Prozess.
Chem.Eng. Tech. 66 (1994) nr. 5. S. 661-670.
- [5] James E. Hoffmann.
Recovering Precious Metals from Electric Scrap. Journal of Mines 1992 July.
- [6] Elaine Y.L. Sum.
The recovery of metals from electronic scrap. Journal of Mines 1991 April.
- [7] Prof.Dr.-Ing. habil. P. Koch.
Konzepte zur Zerlegung und Aufbereitung von Elektronikschrott.
Aufbereitungs-Technik 34 (1993) nr. 8.
- [8] Dr. Ing. H. Kellerwessel.
1981 to 1990 - What was new in the practice of bulk solids processing.
Aufbereitungs-Technik 32 (1991) nr. 5.
- [9] Dr.sc.techn. G. Schubert.
Processing of scrap and refuse containing non-ferrous metals.
Part 1 and Part 2. Aufbereitungs-Technik 32 (1991) nr. 2 and 7.
- [10] Prof. U. Andres.
Separation of non-ferrous scrap metals.
Aufbereitungs-Technik 35 (1994) nr. 2.
- [11] Hans Spoel.
The current status of scrap metal recycling. JOM April 1990.
- [12] M. Rousseau and A. Melin.
The processing of non-magnetic fraction from shredded automobile scrap:
A review. Elsevier Science Publishers B.V. 1989.
- [13] Scheiding van non-ferrometalen. Nat of droog, of op 't oog?
Recycling juni/juli 1986.

- [14] Dr. Ing. J. Julius.
Rückgewinnung von Nichteisenmetallen in Shredderanlagen durch Trockensortierung. Metall, 38 Jahrgang. Heft 8. August 1984.
- [15] G. Schubert.
Entwicklungstendenzen bei der Aufbereitung der Stahl-, Gusseisen- und NE-Metallschrotte. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982.
- [16] R. Helfricht.
Stand und Entwicklungstendenzen der Dichtesortierung.
Neue Bergbautechnik. 5. Jg. Heft 7 - Juli 1975.
- [17] A.S.J.E. Douglas, T. Welsh, A. Whitehead.
Development of equipment for the dry concentration of minerals.
Filtration & Separation, September/October 1972.
- [18] Ir. W.L. Dalmijn, Ir. J.A.F. van Houwelingen.
Recycling van metalen uit auto's en welvaartsschroot.
Recycling oktober/november 1992.
- [19] Ir. A. Ansems, F. Esmeyer.
Scheiding en Recycling van Non-ferrometaal/kunststofcombinaties:
Karakterisering en recyclingprocessen. TNO rapport 89-21/C1, maart 1989.
- [20] J. Joziasse et al.
Monografieën informatiesystemen Milieutechnieken:
Compartment Afvalstoffen. TNO rapport 91-159, april 1991.
- [21] Ir. J.H. Ekkelenkamp, M. Goorhuis.
Verwerking complexe huishoudelijke apparatuur.
TNO rapport 92-138, april 1992.
- [22] Ir. A. Ansems, Ir. J.H. Ekkelenkamp, C. Verschut, Dr. J. Quakernaat.
Selectie van de te ontwikkelen droge deeltjesscheidingstechnieken.
TNO rapport 92-381, februari 1993.
- [23] A. Fluitman.
Toepassing van sensoren bij de verwerking van droge afvalstromen.
Stageverslag TNO/ME april 1994.
- [24] H.J.L. van der Valk, B.C. Braam, W.L. Dalmijn.
Eddy-Current separation by permanent magnets.
Part 1: Theory.
Elsevier Science Publishers B.V. 1986.
- [25] H.J.L. van der Valk, B.C. Braam, W.L. Dalmijn.
Eddy-Current separation by permanent magnets.
Part 2: Rotating disc separators.
Elsevier Science Publishers B.V. 1988.

Recycling non-ferrometaal/kunststofcombinaties (NFKC's)
Eindrapport deel 2: Recyclen van TV onderdelenfracties

- [26] Ernst Schloemann.
Eddy-Current techniques for segregation non-ferrous metals from waste.
Conservation & Recycling vol. 5. no. 2/3 pp 149-162, 1982.
- [27] Dr. Ing. H. Kellerwessel.
Jigs and their particular application for Recycling. Possibilities, limits, types.
Aufbereitungs-Technik 34 (1993) nr. 10.
- [28] Prof. Dr. Ing. E Fellensiek, Dr. Ing. W Erdmann.
Jigging: Historical and technical development.
Aufbereitungs-Technik 32 (1991) nr. 11.
- [29] W.J. Bronkala.
Purification: Do it with magnets. Chemical Engineering, March 14 1988.
- [30] J.J. Coraus, W.A. Gilbert, K.S. Liddell, R.C. Dunne.
The performance of an industrial wet high-intensity magnetic separator for the
recovery of gold and uranium.
Journal of the South African institute of Mining and Metallurgy, vol. 84, no. 3,
March 1984.
- [31] S.E. Khalafalla, G.W. Reimers.
Benification with magnetic fluids. Bureau of mines 1981.
- [32] J. Shimoizaka, K. Nakatsuka, T. Fujita, A. Kounosu.
Sink-float separators using permanent magnets and water based magnetic
fluid. IEEE Transactions on Magnetics, vol. mag-16, no. 2, March 1980.
- [33] Heavy media plant taps secondary metals resource.
Mining, June 1981.
- [34] Washington Mills. Electr Minerals Corporation.
Produkt information.

10 Verantwoording

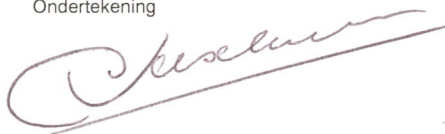
Naam en adres van de opdrachtgever
Programmabureau IOP-MT/Recycling
Senter
Drs. K.E. Knol
Postbus 30432
2500 GS Den Haag

Namen en functies van de medewerkers		
C. Verschut	-	projectleider
Ing. B.J.N. Linger	-	projectmedewerker
J.C. Pisa	-	projectmedewerker
P.C. Tuinman	-	projectmedewerker
J.F. van Middelkoop	-	projectmedewerker

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad
1992 tot en met 1994

Ondertekening



C. Verschut
onderzoekleider

Goedgekeurd door



Ir. A.M.M. Ansems
werkgroep leider

