

Woord vooraf

Ter beëindiging van onze studie master in de industriële ingenieurswetenschappen elektromechanica kregen we de kans onze masterproef uit te voeren bij de KU Leuven onderzoeksgroep ACRO. Tijdens het onderzoek naar systemen voor de automatische ontmanteling van tantaalhoudende componenten van printplaten hebben we kennis gemaakt met verschillende aspecten uit de onderzoekswereld. Dit maakte van onze masterproef een boeiende en leerrijke ervaring. We willen een aantal personen bedanken die ons geholpen hebben bij het realiseren van deze masterproef.

In de eerste plaats willen we onze begeleiders prof. dr. ing. Kellens Karel en ing. Cramer Jeroen bedanken voor het inbrengen van hun inzichten in dit project, deze hebben zeker een bijdrage geleverd aan het goede einde van deze masterproef.

We willen ook dr. ing. Peeters Jef en ing. Ramon Hans bedanken omdat we gebruik mochten maken van een proefopstelling binnen de LCE-onderzoeksgroep, ze hebben ons ook de juiste begeleiding gegeven tijdens het uitvoeren van deze proeven.

Verder willen we de heer Dirkx Eric bedanken voor het vervaardigen van onderdelen voor onze proefopstellingen.

Ten slotte willen we nog onze ouders bedanken voor die mogelijkheid die ze ons hebben gegeven om te studeren en de steun die ze gaven tijdens het realiseren van deze masterproef.

Inhoud

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract	9
Abstract in English	11
1 Inleiding	13
1.1 Situering.....	13
1.2 Probleemstelling	13
1.3 Doelstellingen	16
1.4 Materiaal en methode	17
1.5 Structuur thesis	18
2 Literatuurstudie	19
2.1 Inleiding literatuurstudie.....	19
2.2 Selectief demonteren	20
2.2.1 Soldeerverbinding lokaal verwijderen	21
2.2.2 Demonteren gewenste component	23
2.2.3 Opvangen gewenste component	25
2.3 Bulk demonteren.....	26
2.3.1 Verwijderen soldeerverbinding.....	27
2.3.2 Scheiden van de componenten.....	32
2.3.3 Sorteren componenten met computervisie.....	35
3 Morfologisch overzicht en keuzes.....	39
3.1 Keuzes.....	39
3.1.1 Keuze 1: Uitlokken tinpest.....	39
3.1.2 Keuze 2: Smelten tin.....	39
3.1.3 Keuze 3: Selectief afschrapen componenten	40
3.1.4 Keuze 4: Bulk afschrapen componenten met shredder.....	40
3.2 Afgewezen keuzes	40
3.2.1 Uitponsen component	40
3.2.2 Uitsnijden component	40
3.2.3 Uittrekken component.....	41
3.2.4 Oplossen soldeerverbinding.....	41
3.2.5 Losfrezen soldeerverbinding.....	41
4 Proefopstellingen en resultaten	43

4.1	Proef 1: Uitlokken tinpest.....	43
4.1.1	Testen op werking.....	43
4.2	Proef 2: Smelten soldeerverbinding.....	46
4.2.1	Testen op werking.....	46
4.3	Proef 3: Selectief afschrapen componenten.....	50
4.3.1	Testen op werking.....	50
4.3.2	Tweede test ‘selectief afschrapen componenten’	52
4.4	Proef 4: Afschrapen componenten met shredder.....	62
4.4.1	Testen op werking.....	62
4.4.2	Tweede test ‘Bulk demonteren met shredder’	71
4.5	Besluit proeven	77
5	Vergelijking werkende systemen	79
5.1	Demontage-efficiëntie	79
5.2	Verwerkingstijden.....	81
5.3	Energieverbruik	81
5.4	Componentbeschadiging.....	82
5.5	Return on investment.....	83
5.5.1	ROI schraper	84
5.5.2	ROI shredder.....	90
5.5.3	Vergelijking ROI	95
6	Conclusie.....	97
	Literatuur.....	101
	Bijlagen	103

Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht jaarlijks aantal binnenkomende producten en mogelijke omzet	15
Tabel 2: Gebruikte onderdelen in verwijderingskrachttesten	21
Tabel 3: Zuiverheden van tin	30
Tabel 4: Massaberekeningen Ta componenten	57
Tabel 5: Resultaten experiment 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem.....	58
Tabel 6: Resultaten eerste proef 'bulk demonteren met shredder'	70
Tabel 7: Resultaten tweede proef 'afschrapen componenten met shredder'	74
Tabel 8: Vergelijkende tabel demontage-efficiënties.....	79
Tabel 9: Vergelijkende tabel gemiddelde verwerkingstijden per printplaat	81
Tabel 10: Vergelijkende tabel gemiddeld energieverbruik per printplaat.....	81
Tabel 11: Vergelijkende tabel componentbeschadiging	82
Tabel 12: Jaarlijkse afvalstroom printplaten recyclagebedrijf	83
Tabel 13: Algemene gegevens ROI	84
Tabel 14: Verwerkingscapaciteit schraper	85
Tabel 15: Investeringskost en werkingskost, ROI schraper	85
Tabel 16: Omzet printplaten laptop, ROI schraper	86
Tabel 17: Omzet printplaten desktop, ROI schraper	86
Tabel 18: Omzet printplaten monitors, ROI schraper	87
Tabel 19: Verwerkingscapaciteit shredder	90
Tabel 20: Investeringskost en werkingskost, ROI shredder	91
Tabel 21: Omzet printplaten laptop, ROI shredder	92
Tabel 22: Omzet printplaten desktop, ROI shredder.....	92
Tabel 23: Omzet printplaten flatscreen monitors, ROI shredder	92

Lijst van figuren

Figuur 1: Links: Voorbeeld printplaat; Rechts: tantaalhoudende condensatoren op printplaat	14
Figuur 2: Gemiddelde massa's tantaal per soort product.....	15
Figuur 3: Selectieve- en bulkdemontage visueel weergegeven	19
Figuur 4: Functieblokschema selectieve demontage.....	20
Figuur 5:loodrechte kracht t.o.v. printplaat: ○: IC, Δ: CPU, □: Connector 1, @: Connector 2, ∇: resistance en horizontale kracht t.o.v. printplaat: ●: IC.....	21
Figuur 6: Soldeerverbinding smelten met een heet gas.....	22
Figuur 7: Soldeerverbinding smelten met laserstraal	22
Figuur 8: Principeschets 1 afschrappen component	23
Figuur 9: Principeschets 2 afschrappen component	23
Figuur 10: Uitponsen component.....	23
Figuur 11: Uitsnijden componenten met behulp van een waterjetsnijmachine	24
Figuur 12: Loodrecht uittrekken component.....	24
Figuur 13: Transportband met afvoerkleppen	25
Figuur 14: Draaitafel met glijbaan	26
Figuur 15: Functieblokschema bulkdemontage	26
Figuur 16: Omgebogen pinnen bij 'through hole devices'	27
Figuur 17: Luchtzuiveringssysteem	28
Figuur 18: Verschillende fasen tinpest.....	28
Figuur 19: Snelheidscurves tinpest	30
Figuur 20: Opgeloste metalen in fluorboorzuur	31
Figuur 21: Verwijderen soldeerverbinding met behulp van grinders	31
Figuur 22: Roterende trommel en trilplaat voor componenten te scheiden van de printplaat .	32
Figuur 23: Afborstelen componenten.....	33
Figuur 24: Schematisch overzicht shredder; Rechts: Stappenplan shredder.....	34
Figuur 25: Voor en na demontage door shredder	35
Figuur 26: Principeschets geheel persluchtsorteersysteem	36
Figuur 27: Principeschets persluchtschieter	36
Figuur 28: Synchronisatiemodule sorteersysteem.....	37
Figuur 29: Opstelling sorteereenheid met deltarobot	38
Figuur 30: Printplaten voor koelbox	43
Figuur 31: Staal soldeertin voor koelbox	44
Figuur 32: Proefopstelling uitlokken tinpest in koelbox	44
Figuur 33: Koelverloop droogijs in koelbox	45
Figuur 34: Opvangbak printplaat voor smelten soldeerverbinding.....	46
Figuur 35: Proefopstelling smelten soldeerverbinding	47
Figuur 36: Resultaat 60 minuten verwarmen op 230°C.....	48
Figuur 37: Resultaat na zestien minuten verwarmen op 230°C	49
Figuur 38: Resultaat na twaalf minuten verwarmen op 265°C	50
Figuur 39: Afschraaptool robot	51
Figuur 40: Opstelling manueel afschrappen met robot	51
Figuur 41: afschraapstrategie	52
Figuur 42: Volledige testopstelling selectief afschrappen met behulp van visiesysteem	53
Figuur 43: Bovenaanzicht testopstelling selectief afschrappen met behulp van visiesysteem ..	53
Figuur 44: Printplaatklem voor testopstelling bij selectief afschrappen met computervisie	54

Figuur 45: Padplan voor het afschrapen van de componenten.....	54
Figuur 46: Schraapstation bij selectief afschrapen met visiesysteem	55
Figuur 47: Overzicht experiment 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem	59
Figuur 48: Demontage-efficiënties, 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem	60
Figuur 49: CAD-model shredder testmodule	62
Figuur 50: Bovenaanzicht shredder testmodule	63
Figuur 51: Krachtenwerkingen shredderwielen op printplaatcomponenten	64
Figuur 52: Afstelplaatjes onder lagerhuizen	65
Figuur 53: Opgebouwde testopstelling shredder.....	66
Figuur 54: Batch printplaten voor shredder	66
Figuur 55: Eerste voorbeeld componentdemontage, verschillende shredderwielposities.....	67
Figuur 56: Tweede voorbeeld componentdemontage, verschillende shredderwielposities.....	67
Figuur 57: Derde voorbeeld componentdemontage, verschillende shredderwielposities.....	68
Figuur 58: Voorbeeld één voor/na shredder.....	68
Figuur 59: Voorbeeld twee voor/na shredder.....	69
Figuur 60: Stelschroef lagerhuis shredder.....	72
Figuur 61: Resultaat aanpassing shredderwiel positie	73
Figuur 62: Overzicht aanwezige en gedemonteerde componenten en componentmassa's	75
Figuur 63: Demontage-efficiëntie bij 'Bulk afschrapen met shredder'.....	76
Figuur 64: Staafdiagram vergelijking demontage-efficiënties.....	80
Figuur 65: ROI, ROI schraper	87
Figuur 66: sensitiviteit tantaalprijs, ROI schraper	88
Figuur 67: sensitiviteit energiekost, ROI schraper	88
Figuur 68: sensitiviteit investeringskost, ROI schraper	89
Figuur 69: sensitiviteit demontage-efficiëntie, ROI schraper	89
Figuur 70: ROI, ROI shredder.....	93
Figuur 71: sensitiviteit tantaalprijs, ROI shredder	94
Figuur 72: sensitiviteit energiekost, ROI shredder.....	94
Figuur 73: sensitiviteit investeringskost, ROI shredder	95
Figuur 74: sensitiviteit demontage-efficiëntie, ROI shredder	95

Abstract

Tot op heden is de recyclagegraad van tantaal uit afgedankte printplaten minder dan één procent. De oorzaak is de lage concentratie tantaal per printplaat. Om de recyclagegraad te verhogen moeten tantaalhoudende componenten van printplaten worden afgezonderd, zodat de tantaalconcentratie in deze afvalstroom stijgt. Deze masterproef, uitgevoerd binnen de ACRO- en LCE-onderzoeksgroepen aan KULeuven, onderzoekt geschikte demontagemethoden om deze componenten van printplaten te scheiden.

Potentiële demontagemethoden volgen uit ideeën, gebaseerd op literatuur. Selectie richt zich op veiligheidsaspecten en vooraf bekende nadelen. Voor geselecteerde demontagemethoden worden concepten uitgewerkt en proefmodules opgezet. Er wordt getest op demontage-efficiëntie, gemiddeld energieverbruik per printplaat, gemiddelde verwerkingstijd per printplaat en mate van componentbeschadiging. Tenslotte wordt een ruwe 'return on investment' van mogelijke industriële installaties gemaakt.

Uit proeven blijkt dat selectief afschrapen van componenten de meest belovende methode is. Dit systeem heeft de hoogste demontage-efficiëntie en verbrijzeld de componenten het minst. Bulk afschrapen van componenten met behulp van een shredder is ook een interessante methode. Deze methode heeft wel een lager demontagerendement waardoor aanpassingen aan de shreddertestmodule nodig zijn. Het nadeel is hier dat een extra sorteerstap nodig is om gewenste componenten uit de afvalstroom te filteren, dit kan tot ingewikkelde sorteereenheden leiden.

Abstract in English

To date, the recycling grade of tantalum out of discarded circuit boards is less than one percent. This is because the concentration tantalum per circuit board is too low. To increase the recycling grade, the tantalum components must be isolated from the circuit boards, so the tantalum concentration rises within this waste stream. This master's thesis, carried out within the ACRO and LCE research group at KU Leuven, investigates suitable dismantling methods to separate these components from circuit boards.

Potential dismantling methods derive from ideas, based on literature. Then the most promising ideas will be selected. The selection focusses on safety aspects and previously known disadvantages. For the selected dismantling methods, concepts will be worked out and test setups are set up. The tests will evaluate dismantling efficiency, average energy consumption per circuit board, average processing time per circuit board and degree of component damage. Finally, an ROI calculation will be made for possible industrial installations.

Experiments show that selective scraping of components is the most promising method. This system has the highest dismantling efficiency and damages components the least. Bulk scraping with a shredder can also be an interesting method, if adjustments to the test setup are made. A disadvantage here is that a different sorting procedure is needed to obtain the desired components out of the waste stream. This can lead to complicated sorting procedures.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef kadert binnen de gezamenlijke opleiding industriële ingenieurswetenschappen tussen de Katholieke Universiteit Leuven en Universiteit Hasselt, en wordt uitgevoerd in opdracht van de onderzoeksgroep ACRO, gelegen in het technologiecentrum op de universitaire campus te Diepenbeek.

De onderzoeksgroep ACRO, acroniem voor *Automation Computer vision and Robotics*, onder leiding van prof. dr. ir. Eric Demeester, focust voornamelijk op computervisiesystemen en robotica-toepassingen. Visiesystemen worden vaak gebruikt in industriële toepassingen ter vervanging van menselijke visuele waarnemingen. Een visiesysteem bepaalt op een snelle, objectieve en nauwkeurige manier de eigenschappen van objecten. In combinatie met robotica-toepassingen bieden deze visiesystemen een scala aan nieuwe mogelijkheden op gebied van automatisering met robots. ACRO volgt voortdurend de ontwikkelingen in computervisie en ondersteunt een hele reeks van bedrijven en mastertheses waarin machinevisie bij robotica-toepassingen een oplossing kan bieden.

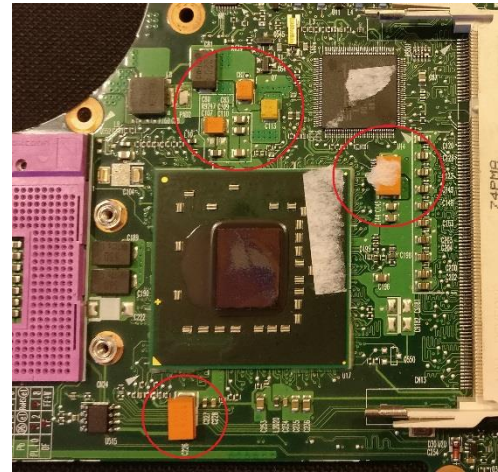
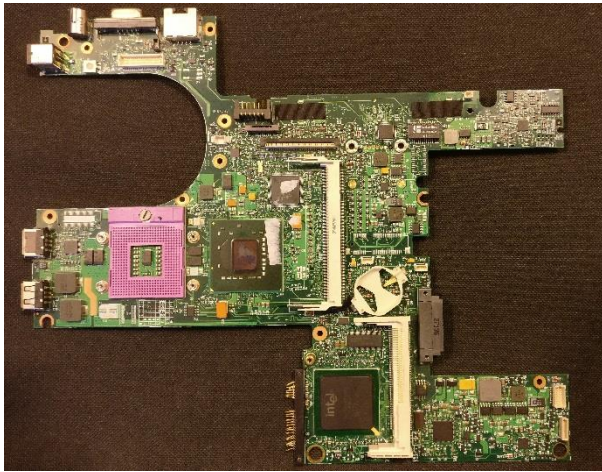
Deze masterproef verloopt verder ook in samenwerking met de KU Leuven LCE-onderzoeksgroep en het recyclagebedrijf Galloo. De LCE-onderzoeksgroep, gelegen te Heverlee, doet onder andere onderzoek naar demontagetechnieken om elektrische en elektronische apparatuur op een efficiënte wijze te disassembleren. Het bedrijf Galloo behoort tot de belangrijkste recyclagebedrijven van ferro- en non-ferro metalen in West-Europa. Het bedrijf beschikt over een industrieel verwerkingsproces om afgedankte consumptiegoederen zoals auto's, tv's, radio's en wasmachines op een ecologische manier te recyclen. Om deze consumptiegoederen te recyclen beschikt het bedrijf over een modern en uitgebreid machinepark.

Om hun recyclagemogelijkheden te verbreden hebben de ACRO- en de LCE-onderzoeksgroep de vraag gekregen van Galloo om een nieuwe recyclagetechniek te ontwikkelen die toelaat om op een efficiënte manier componenten die tantaal bevatten, selectief te recupereren uit printplaten van afgedankte elektrische en elektronische apparatuur.

1.2 Probleemstelling

Tot op heden is de recyclagegraad van zeldzame materialen, uit printplaten van afgedankte elektrische en elektronische apparatuur, minder dan 1% [1]. De focus binnen deze masterthesis zal voornamelijk liggen op tantaal. Dit materiaal kan voornamelijk worden teruggevonden in bepaalde types van condensatoren. In vergelijking met andere condensatoren hebben tantaalcondensatoren de grootste capaciteit per volume-eenheid en zijn ze thermisch stabiel. Met het kleiner worden van de elektronica is de productie van deze condensatoren de afgelopen jaren drastisch toegenomen. Tantaal is echter een zeldzaam materiaal op aarde waardoor er meer vraag dan aanbod is [2]. Het heeft dan ook een relatief hoge restwaarde.

Op de printplaat in Figuur 1 zijn oranje componenten zichtbaar, dit zijn tantaalhoudende condensatoren.



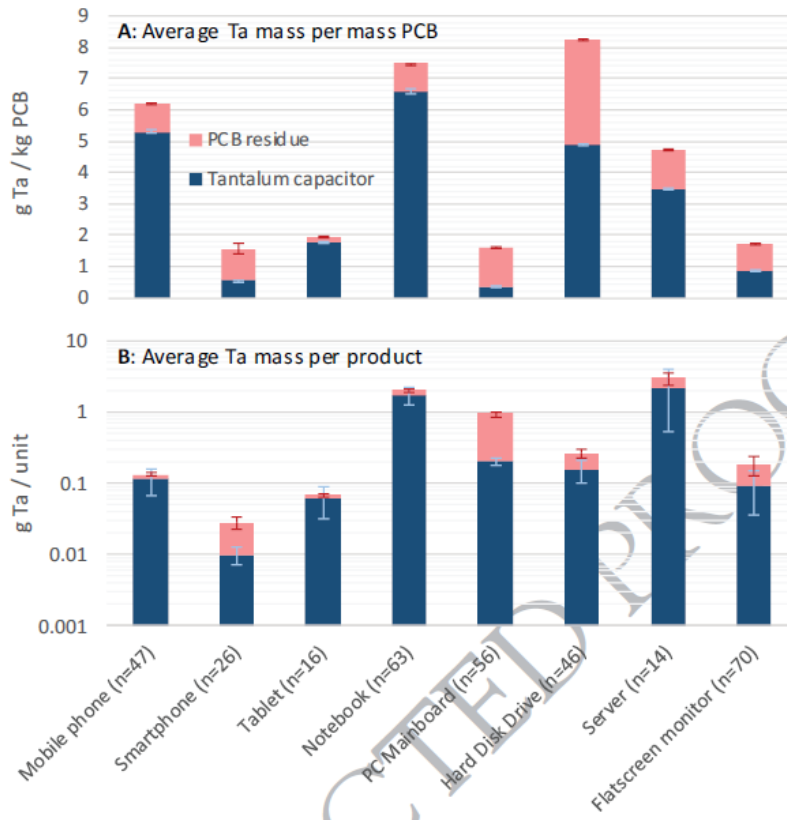
Figuur 1: Links: Voorbeeld printplaat; Rechts: tantaalhoudende condensatoren op printplaat

De huidige recyclageprocessen voor afgedankte printplaten baseren zich op pyrometallurgie. Dit proces richt zich voornamelijk op het recycleren van koper en edelmetalen, maar ook het recupereren van tantaal is hiermee mogelijk. Omdat tantaal maar in kleine maten aanwezig is op een printplaat vergt dit meer energie, en dus ook hogere kosten [3]. Om deze reden is het niet altijd economisch rendabel om tantaal uit een afgedankte printplaten te recupereren.

Om de recyclageprocedure efficiënter te laten verlopen is het belangrijk dat de concentratie tantaal toeneemt [3]. Hiertoe dienen de tantaalhoudende componenten van de printplaten te worden gedemonteerd en gesorteerd zodat de componenten afzonderlijk kunnen worden behandeld.

Er kunnen twee manieren van demonteren worden verondersteld, ofwel eerst de verschillende componenten op de printplaat detecteren en vervolgens selectief demonteren, ofwel alle componenten ineens van de printplaat demonteren en vervolgens de tantaalhoudende componenten uit deze componentenstroom scheiden. Welke van deze twee methoden het meest geschikt is zal verder in deze thesis worden onderzocht.

In onderstaand staafdiagram (zie Figuur 2) kunnen cijfers worden teruggevonden over de gemiddelde massa tantaal dat kan worden teruggevonden op de printplaten van een aantal verschillende soorten elektronische producten.



Figuur 2: Gemiddelde massa's tantaal per soort product[3]

Als deze cijfers gecombineerd worden met het aantal producten dat jaarlijks bij het recyclagebedrijf terechtkomen, kan een ruwe schatting worden gemaakt over de potentiële omzet die het bedrijf kan maken indien al deze componenten gerecupereerd kunnen worden. De aanwezige printplaattypes, samen met hun aantallen zijn terug te vinden in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht jaarlijks aantal binnenkomende producten en mogelijke omzet

meest ontmantelde WEE categorieën	Jaarlijks gemiddelde aantal producten	Jaarlijkse productmassa (kg)	gemiddelde hoeveelheid massa Ta per product (g)	Jaarlijkse massa Ta per productsoort [g]
moederborden Notebook	75000	150000	2	150000
flatscreen monitor	30000	450000	0,1	3000
moederborden desktop	200000	1872000	0,2	40000
Σ	305000	2472000		193000

Hierin is te zien dat jaarlijks ongeveer 305000 printplaten, uit verschillende producten, binnenkomen. Als alle printplaten volledig verwerkt kunnen worden, wordt jaarlijks een totale tantaal massa van 193000 g, oftewel 193kg ontgonnen.

Indien deze massa nu wordt vermenigvuldigd met een tantaalwaarde van 360,5 €/kg [4] wordt een totale tantaalwaarde van 69576,5 € verkregen. Aangezien de tantaal nog uit de componenten moet worden geëxtraheerd, zijn de componenten zelf niet zoveel waard als de tantaal zelf. Daarom wordt verondersteld dat de proceskosten, om de tantaal uit de componenten te extraheren, nog eens 50% van deze tantaalwaarde bedraagt. Daardoor zal de maximale jaarlijkse omzet, naar schatting, 34788,25 € bedragen als alle printplaten volledig worden verwerkt.

1.3 Doelstellingen

Het hoofddoel van deze masterthesis is onderzoek doen naar methoden om op een zo efficiënt mogelijke manier elektronische componenten, die tantaal bevatten, van printplaten te demonteren en te sorteren. Omdat dit hoofddoel zeer ruim geformuleerd is, wordt het in een aantal deeldoelstellingen opgedeeld.

Een eerste doelstelling is onderzoek voeren naar verschillende demontagetechnieken om de componenten van hun printplaat te scheiden. Voor de meest belovende methodes die uit dit onderzoek volgen worden concepten uitgewerkt en proefopstellingen opgezet. Testen die worden uitgevoerd op deze proefopstellingen wijzen uit of een demontagemethode al dan niet potentieel heeft.

De tweede doelstelling is een korte studie doen naar mogelijke sorteersystemen om de componenten, afkomstig van de printplaten, op een vlotte manier te kunnen sorteren. Deze stap is enkel nodig als wordt gekozen om de componenten allemaal ineens van de printplaat te demonteren. Gezien de kleine afmetingen van de componenten kan dit tot complexe sorteermethoden leiden waardoor dit de keuze van de demontagemethode kan beïnvloeden. Bij selectief demonteren is de gedemonteerde component gekend en kan deze eenvoudigweg worden opgevangen.

Als ondersteunende taak zal worden geëxperimenteerd met een computervisiesysteem dat de tantaalcomponenten op een printplaat kan herkennen. Naar dit systeem werd al onderzoek gevoerd door de LCE-onderzoeksgroep. Er zal worden getracht een koppeling te maken tussen dit visiesysteem en een selectieve demontagemethode.

Tenslotte zijn er nog een aantal vooropgestelde eisen die in rekening moeten worden gebracht. Zo zal het systeem printplaten moet kunnen verwerken met afmetingen van 1x50x50mm tot 200x500x500mm, hiervoor is een groot bereik gekozen zodat er een breed gamma aan printplaten kan worden verwerkt. Verder zal het systeem minstens 305.000 printplaten per jaar moeten kunnen verwerken. Dit is, zoals eerder besproken, het aantal printplaten dat jaarlijks terecht komt bij het recyclagebedrijf. Tenslotte moet ook rekening worden gehouden met het feit dat het finale systeem uiteindelijk zal functioneren in een beschutte werkplaats, daardoor zal extra rekening moeten worden gehouden met veiligheidsaspecten.

1.4 Materiaal en methode

Om diverse demonteer- en sorteersystemen te onderzoeken moet eerst een literatuurstudie worden uitgevoerd. Vervolgens worden op basis van deze literatuurstudie een aantal ideeën uitgewerkt.

Eens deze studie voltooid is wordt gekozen met welke demontagetechnieken verder wordt gewerkt. Deze selectie baseert zich op veiligheidsaspecten en eventuele vooraf gekende nadelen.

Voor de geselecteerde technieken worden concepten uitgewerkt en proefopstelling opgezet. In eerste instantie wordt getest of deze methode effectief tantaalcomponenten demonteert, ook onverwachte problemen komen hier aan het licht.

Indien de demontagemethode werkt worden kwantitatieve testen uitgevoerd. Bij deze experimenten worden parameters, zoals: demontage-efficiëntie, mate van componentbeschadiging, gemiddelde verwerkingstijd per printplaat en gemiddeld energieverbruik per printplaat geregistreerd.

De mate van componentbeschadiging wordt geregistreerd omdat als de component verbrijzeld wordt, deze in stukken zal opbreken, waardoor steeds een bepaalde hoeveelheid massa tantaal verloren zal gaan. Daardoor zal de tantaalcomponentwaarde dalen. Een tweede reden om dit bij te houden is omdat als alle componenten gelijktijdig van de printplaat worden gedemonteerd, achteraf nog een sorteerstap nodig is. Als bij deze sorteerstap gebruik wordt gemaakt van computervisie, wordt het moeilijk voor dit visiesysteem om de componenten nog te herkennen waardoor deze verloren gaan.

Tenslotte worden de resultaten van de werkende demontagemethoden langs elkaar gelegd. Daardoor ontstaat een goed overzicht tussen de verschillende systemen en kunnen conclusies worden getrokken. Van de werkende systemen wordt ook een ruwe *return on investment* analyse, op mogelijke industriële installaties, gedaan. Daardoor kan een ruw beeld over mogelijke terugverdientijden worden gevormd.

Voor sorteersystemen, die al dan niet gebruikmaken van computervisie, worden geen proefopstellingen uitgewerkt en opgebouwd. Dit is omdat de focus binnen deze thesis op het demonteren van de tantaalhoudende componenten ligt. Hierover wordt een korte literatuurstudie gedaan om een ruwe inschatting te kunnen maken over de haalbaarheid voor het uitsorteren van de tantaalcomponenten uit de componentstroom wanneer alle componenten tegelijk van de printplaat worden gedemonteerd.

Voor het opdoen van inspiratie en het uitvoeren van experimenten werd een brede reeks van machines ter beschikking gesteld. In onderstaande lijst is een overzicht van deze machines terug te vinden.

- Epson robotarm met 6 vrijheidsgraden,
- Lasersnijmachine,
- Watersnijmachine,
- Laboratoriumoven,
- Ponsmachine,
- XY-tafel

1.5 Structuur thesis

In komende hoofdstukken zijn de verschillende fasen van deze thesis gestructureerd ingedeeld.

In hoofdstuk twee, “Literatuurstudie”, is een uitgebreide samenvatting terug te vinden van demontagetechnieken die volgen uit de literatuur, ook een aantal eigen ideeën komen hier aan bod. Hierbij worden de werkingsprincipes van de technieken besproken, alsook de vooraf bekende voor- en nadelen ervan. Tenslotte worden in dit hoofdstuk ook een aantal sorteertechnieken besproken die toelaten de gewenste componenten te scheiden uit een massastroom van componenten.

In het daaropvolgende hoofdstuk, “Morfologisch overzicht en keuzes”, worden de technieken in een morfologisch overzicht geplaatst en worden er keuzes gemaakt. Ook de verantwoordingen van de keuzes worden in dit hoofdstuk toegelicht.

In het vierde hoofdstuk, “Proefopstellingen en resultaten”, worden de gevolgde werkwijzen alsook de bekomen resultaten van elke proefopstelling besproken.

In hoofdstuk vijf, “Vergelijking werkende demontagesystemen”, worden de verschillende werkende demontagesystemen ten opzichte van elkaar afgewogen. Dit zal gebeuren op basis van massademontage-efficiëntie, mate van componentbeschadiging, gemiddeld energieverbruik per printplaat, verwerkingstijd per printplaat en een ‘ruwe return on investment’ analyse

Tenslotte wordt in hoofdstuk zes, “Conclusie”, een algemeen besluit gevormd over de gehele thesis.

2 Literatuurstudie

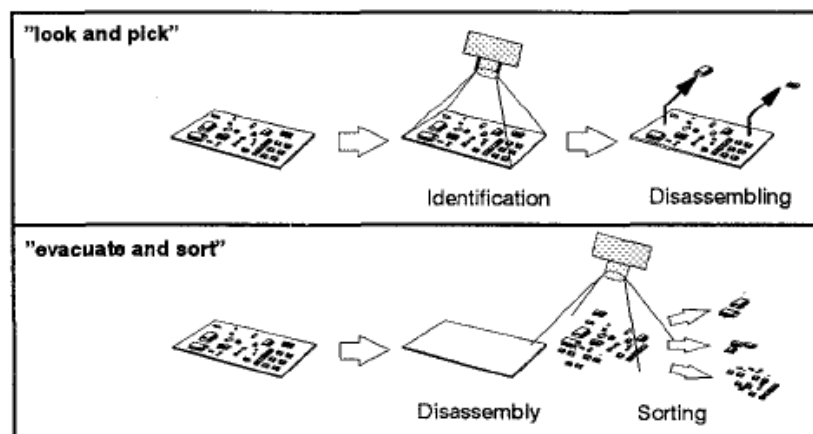
2.1 Inleiding literatuurstudie

Om de gewenste componenten te bekomen, vertrekkende van een gevulde printplaat, kunnen twee hoofdprincipes worden gehanteerd, namelijk selectieve demontage en bulkdemontage.

De selectieve demontagemethode wordt in de literatuur ook wel het *look and pick* principe genoemd. Bij dit principe zal eerst een beeld worden gemaakt van de gehele printplaat. Een computer zal vervolgens, aan de hand van dit beeld, bepalen welke componenten gedemonteerd moeten worden. Van deze componenten worden dan de positie en oriëntatie bepaald. Tenslotte zal een bepaald demontagesysteem enkel de gewenste component demonteren [5].

De bulkdemontagemethode wordt in de literatuur ook wel het *evacuate and sort* principe genoemd. Hierbij worden alle componenten gelijktijdig van de printplaat verwijderd. Deze componenten worden vervolgens opgevangen waarna een bepaald sorteersysteem de componenten per materiaalsoort sorteert [5].

Figuur 3 geeft beide principes visueel weer.

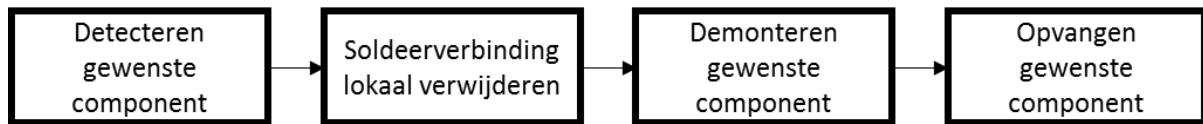


Figuur 3: Selectieve- en bulkdemontage visueel weergegeven [5]

Voor beide principes worden nu een aantal methoden onderzocht om de gewenste componenten op een efficiënte manier te scheiden van de printplaat. De methodes zullen volgen uit ideeën, gebaseerd op de literatuur. Een uitgebreide samenvatting van deze studie is in volgende paragrafen terug te vinden.

2.2 Selectief demonteren

Onderstaand functieblokdigram (zie Figuur 4) geeft een kort visueel overzicht van de stappen die moeten worden doorlopen om vanaf een gevulde printplaat de gewenste componenten te bekomen met behulp van selectieve demontage.



Figuur 4: Functieblokschema selectieve demontage

De eerste stap bij selectief demonteren is detecteren van de gewenste component, samen met de positie en oriëntatie van deze component. Dit zal gebeuren aan de hand van computervisie. Dit visiesysteem, samen met het bijhorende software, is reeds voorhanden. Hierdoor zal er geen literatuurstudie worden uitgevoerd omtrent het detecteren van componenten op printplaten. Het visiesysteem is afkomstig van reeds gevoerd onderzoek binnen de LCE-onderzoeksgroep.

Een tweede stap is het verwijderen van de soldeerverbinding van de gewenste component. Op deze manier kan de component, met weinig kracht, op een niet-destructieve manier van de printplaat worden verwijderd. Deze stap is echter niet noodzakelijk, het is ook mogelijk de component op een destructieve manier van de printplaat te demonteren. De krachten die zullen optreden bij deze methode liggen echter een stuk hoger omdat de soldeerverbinding moet worden verbroken. Onderaan zullen een aantal methoden worden besproken om de soldeerverbinding selectief te verwijderen.

De volgende stap is het effectief demonteren van de gewenste component. Hiervoor zijn er een aantal technieken beschikbaar die onderaan worden besproken.

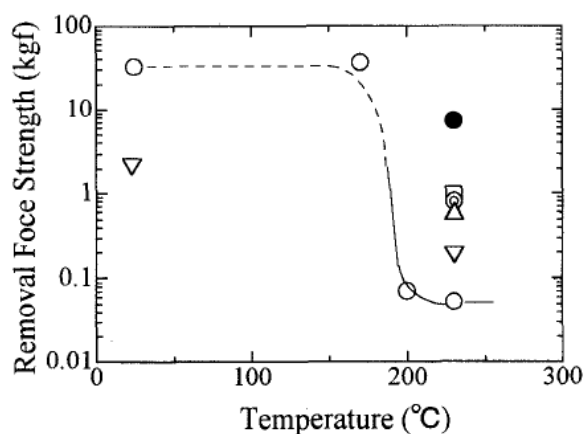
Ten slotte moeten de gedemonteerde componenten worden opgevangen. Indien er naast de tantaalhoudende componenten ook nog andere componenten moeten worden gedemonteerd, is het belangrijk dat hiervoor een geschikt systeem wordt voorzien zodat de componenten per materiaalsoort worden opgevangen. Hierover zal geen literatuurstudie plaatsvinden aangezien dergelijke systemen op eenvoudige wijze gerealiseerd kunnen worden. Er zullen een aantal principes worden voorgesteld om deze stap te visualiseren.

Bij deze demontagemethode is het verder ook belangrijk dat de printplaat gedurende het hele proces ten opzichte van een vaste referentie wordt gehouden. Dit is omdat de coördinaten, afkomstig van het visiesysteem, steeds worden doorgevoerd naar het systeem dat de component demonteert en/of de soldeerverbinding verwijdert. Dit kan leiden tot complexe inklemsystemen, waardoor dit de keuzes van de demontagesystemen kan beïnvloeden.

2.2.1 Soldeerverbinding lokaal verwijderen

2.2.1.1 Smelten soldeerverbinding

Een eerste mogelijkheid om de soldeerverbinding te verwijderen is door deze te smelten. Hierdoor zullen de demontagekrachten dalen. De curve uit Figuur 5 geeft een grootteorde weer van de benodigde krachten die nodig zijn om een component te verwijderen, deze staat in functie van de verwarmingstemperatuur. Voor het opstellen van deze curven werden een aantal proeven uitgevoerd met verschillende soorten componentverbindingen, deze zijn terug te vinden in Tabel 2 [6].



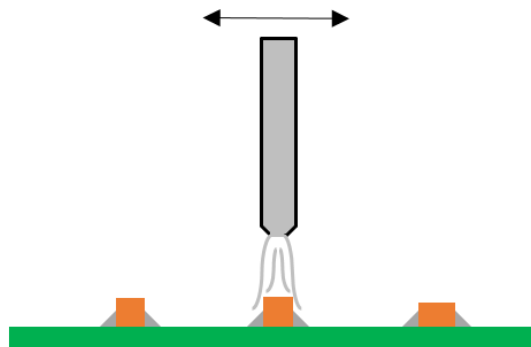
Figuur 5: loodrechte kracht t.o.v. printplaat: ○: IC, △: CPU, □: Connector 1, ○: Connector 2, ▽: resistance en horizontale kracht t.o.v. printplaat: ●: IC [6]

Tabel 2: Gebruikte onderdelen in verwijderingskrachttesten [6]

PARTS USED IN REMOVAL FORCE TESTS		
Type of Part	Number of Pins	Approx. Size (Length(mm) × Width(mm))
IC*	20	19 × 8
CPU*	168	49 × 49
Connector 1*	120	90 × 6
Connector 2*	234	164 × 10
Resistance**	none	6 × 3

Hierop valt te zien dat de benodigde demontagekracht drastisch afneemt vanaf een temperatuur van ongeveer 180°C. Vanaf een temperatuur van ongeveer 230 °C wordt de minimale demontagekracht bereikt.

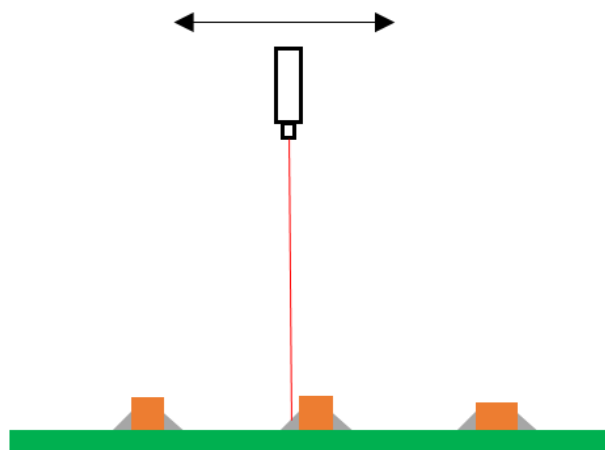
Een manier om de soldeerverbinding lokaal te smelten is door ze te verwarmen met behulp van een heet gas. Dit gas kan stoom of verwarmde lucht zijn. In Figuur 6 is dit principe visueel zichtbaar gemaakt.



Figuur 6: Soldeerverbinding smelten met een heet gas

Een mogelijk nadeel bij dit principe is dat de warme lucht zich kan verspreiden over de printplaat waardoor ook naburige soldeerverbindingen kunnen smelten en bijgevolg deze componenten ongewenst los kunnen komen.

Om dit probleem op te lossen kan de soldeerverbinding ook worden verwarmd met een hoogvermogen laserstraal. Hiermee kan nauwkeurig worden gefocust op de gewenste soldeerverbinding. In Figuur 7 is dit principe visueel weergegeven.

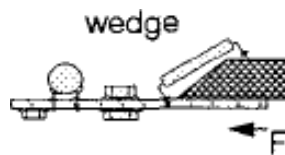


Figuur 7: Soldeerverbinding smelten met laserstraal

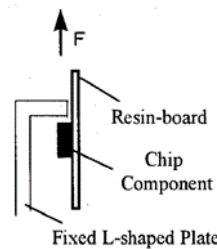
2.2.2 Demonteren gewenste component

2.2.2.1 Afschrapen component

Bij deze demontagemethode worden de elektronische componenten op afschuiving belast. De component wordt als het ware van de printplaat afgeschoven [5]. Om dit te realiseren kan er gebruik worden gemaakt van een hele reeks verschillende robots waarop diverse schrapers gemonteerd kunnen worden. In Figuur 8 en Figuur 9 zijn principeschetsen van deze demontagemethode weergegeven.



Figuur 8: Principeschets
1 afschrapen component
[5]

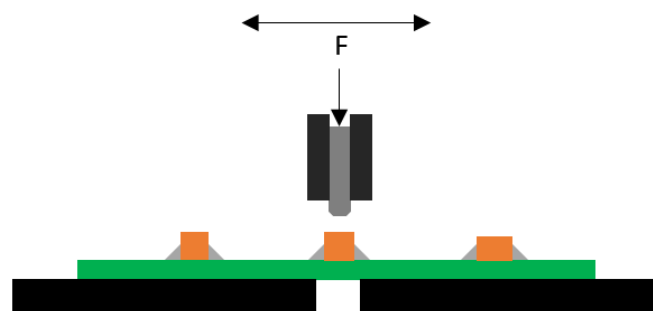


Figuur 9: Principeschets
2 afschrapen component
[6]

Deze methode kan worden gecombineerd met een methode om de soldeerverbinding lokaal te verwijderen, zoals bijvoorbeeld lokaal verwarmen. Hierdoor zullen de benodigde krachten om de component te demonteren afnemen, maar zal de complexiteit van het systeem toenemen.

2.2.2.2 Uitponsen component

Voor het selectief demonteren van de componenten kan gebruik worden gemaakt van een ponsmachine. Hierbij zal de gewenste componenten simpelweg doorheen de printplaat worden geduwd. Figuur 10 geeft dit principe visueel weer.

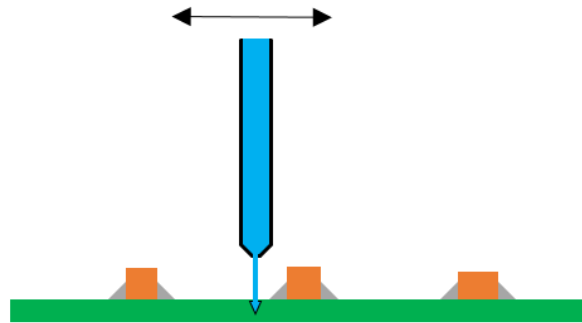


Figuur 10: Uitponsen component

Een nadeel bij deze manier van werken is dat er steeds een stuk printplaat aan de geponste component blijft hangen. Indien dit niet toelaatbaar is zullen verdere stappen moeten worden ondernomen. Een ander nadeel is dat er voor verschillende componentafmetingen, verschillende stempels en matrijzen moeten worden voorzien. Indien kleine componenten met een grote stempel worden gedemonteerd is het mogelijk dat er meerdere componenten tegelijk worden meegenomen. Grote componenten demonteren met een kleine stempel is ook niet mogelijk aangezien de componenten niet in de matrijs zullen passen.

2.2.2.3 Uitsnijden component

Bij het uitsnijden van de componenten wordt met behulp van een bepaalde snijmachine de contour van de elektronische component uitgesneden. Er wordt als het waren een stuk printplaat uitgesneden met daarop de gewenste component. Het principe ‘uitsnijden van een component’ wordt in Figuur 11 voorgesteld met een waterstraalsnijmachine.

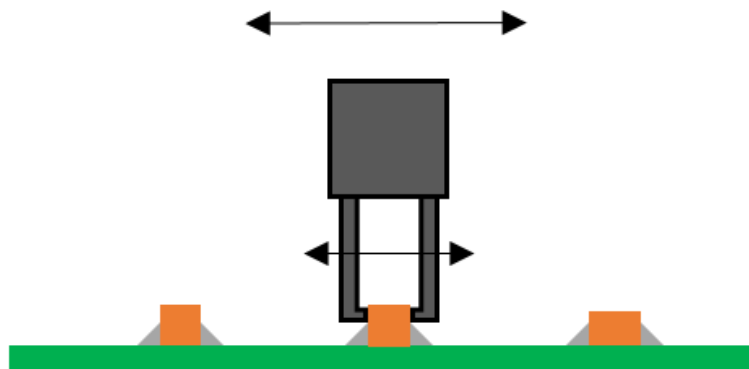


Figuur 11: Uitsnijden componenten met behulp van een waterjetsnijmachine

Een aantal mogelijke snijmachines zijn onder andere ‘laser cutters’, ‘waterstraalsnijders’, ... Het nadeel bij dit principe is dat er steeds een stuk printplaat aan de componenten blijft hangen. Indien dit verwijderd moet worden dienen er nog extra stappen in het proces te worden ondernomen. De methode met de watersnijmachine komt in grote lijnen overeen met die van de lasersnijmachine, het enige verschil is dat de waterstraal wordt vervangen door een krachtige laser.

2.2.2.4 Uittrekken component

Het is ook mogelijk de component loodrecht uit de printplaat te trekken. Hiervoor kan de gewenste component langs de zijkanten worden geklemd of worden vastgenomen doormiddel van een vacuüm-grijper. In Figuur 12 wordt dit principe weergegeven.



Figuur 12: Loodrecht uittrekken component

Voor het vastklemmen van de component kan gebruik worden gemaakt van diverse soorten grippers. Het is belangrijk dat deze grippers voldoende wrijvingskracht kunnen genereren op de componenten. De vacuüm-grijper daarentegen moet voor voldoende zuigkracht zorgen zodat de component aan de zuignap blijft kleven.

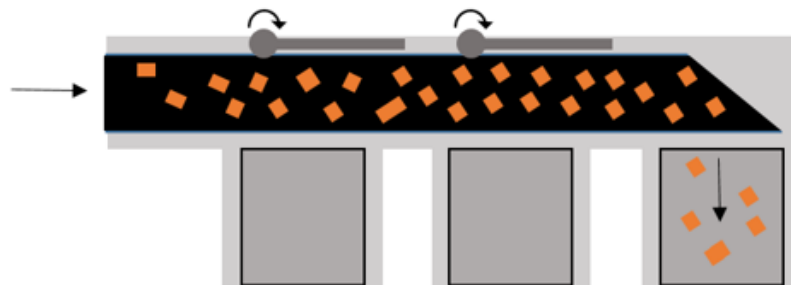
Deze methode kan echter voor problemen zorgen aangezien elektronische componenten zeer klein kunnen zijn en het moeilijk wordt hier voldoende hoge wrijvings- of zuigkrachten op te plaatsen. Voor het uitvoeren van deze methode kan best de soldeerverbinding eerst worden verzwakt of verwijderd. Het combineren van deze verschillende systemen zorgt dan weer voor een toename van de complexiteit waardoor deze methode op het eerste zicht minder interessant lijkt.

2.2.3 Opvangen gewenste component

Als er naast de tantaalhoudende componenten ook nog andere componenten moeten worden opgevangen, is het handig om hier een geautomatiseerd sorteersysteem voor te gebruiken. De verschillende componenten worden dan naar verschillende opvangbakken geleid. In volgende paragrafen worden twee mogelijke principes voorgesteld.

2.2.3.1 Transportband met sorteerkleppen

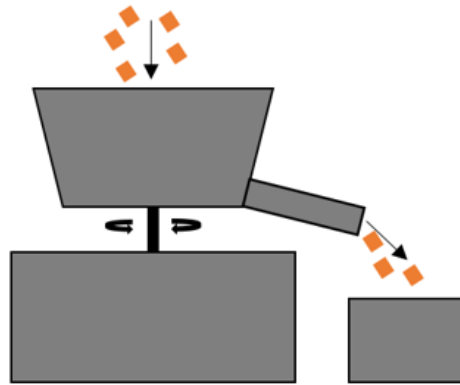
Hierbij wordt steeds één soort component aangevoerd. Afhankelijk van het soort component zal één van de sorteerkleppen worden gesloten. Op deze manier worden de componenten dus soort per soort opgevangen. Deze methode is weergegeven in Figuur 13.



Figuur 13: Transportband met afvoerkleppen

1.1.1.1 Roterende glijbaan

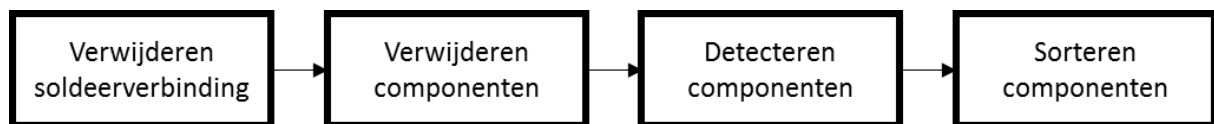
Hierbij zal een glijbaan worden gemonteerd op een draaitafel waarvan de positie kan worden ingesteld. De glijbaan zal nu roteren over verschillende bakken zodat de componenten per soort worden opgevangen. Dit principe is weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14: Draaitafel met glijbaan

2.3 Bulk demonteren

Onderstaand functieblokdiagram (zie Figuur 15) geeft een kort visueel overzicht van welke stappen moeten worden doorlopen om vanaf een gevulde printplaat de afzonderlijke gewenste componenten te bekomen met behulp van bulkdemontage.



Figuur 15: Functieblokschema bulkdemontage

Bij bulkdemonteren is de eerste stap het verwijderen van de soldeerverbindingen van alle componenten op de printplaat. Als dit gebeurt is kunnen de componenten op een eenvoudige wijze en met weinig kracht van de printplaat worden gehaald. Deze stap is echter niet noodzakelijk, het is ook mogelijk de componenten destructief van de printplaat te demonteren. De benodigde krachten zijn dan wel groter aangezien de soldeerverbindingen moeten worden verbroken. Onderaan zullen een aantal technieken worden besproken om deze soldeerverbindingen te verwijderen.

De tweede stap is het verwijderen van alle componenten op de printplaat. Dit zal met hoge of lage krachten kunnen gebeuren, afhankelijk of de soldeerverbinding al dan niet verwijderd is. Het verwijderen van de soldeerverbinding is echter nog geen garantie dat alle componenten met weinig kracht kunnen worden verwijderd. Bij een aantal gevallen gebeurt het dat de pinnen van *through hole devices* aan de andere zijde van de printplaat worden omgebogen om hun bevestiging te borgen. Hierdoor kunnen de demontagekrachten oplopen tot wel 60 N indien de component loodrecht uit de printplaat wordt getrokken [5]. Op onderstaande afbeelding (zie Figuur 16) is dergelijk voorbeeld weergegeven.



Figuur 16: Omgebogen pinnen bij 'through hole devices' [7]

Onderaan zullen een aantal methoden worden besproken om de componenten te verwijderen van de printplaat.

Eens de componenten gescheiden zijn van de printplaat wordt een massastroom van componenten, uit verschillende materialen, bekomen. Om nu de gewenste componenten te scheiden uit deze massastroom zijn er verschillende mogelijkheden. Een eerste mogelijkheid is de componenten scheiden op basis van verschil in fysische eigenschappen tussen de materialen, zoals: massadichtheid, magnetische eigenschappen... Een tweede mogelijkheid is een sorteersysteem op te stellen op basis van computervisie. Op deze manier zal het visiesysteem de gewenste componenten herkennen waarna ze selectief uit de massastroom worden verwijderd. Voor deze sorteersystemen zullen ook een beperkt aantal mogelijke methoden worden besproken.

2.3.1 Verwijderen soldeerverbinding

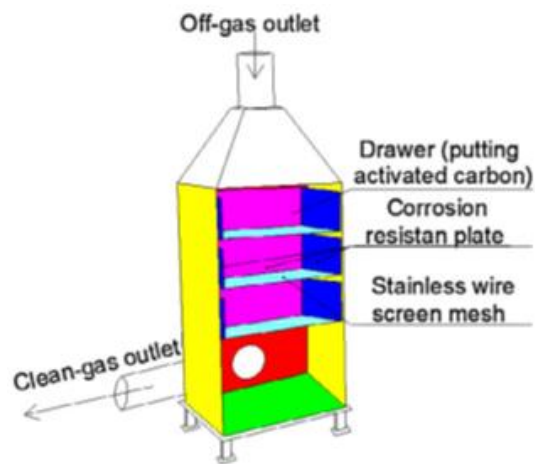
2.3.1.1 Smelten soldeerverbinding

Voor het verwijderen van de soldeerverbindingen kan de verbinding worden gesmolten. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van een hele reeks aan verwarmingsmethodes. Een aantal van deze methodes zijn: infraroodverwarming, elektronische verwarmingsbuizen, warme lucht, warme vloeistoffen, ...[7]. De keuze van de verwarmingsmethode hangt af van hoe efficiënt het verwarmingssysteem binnen een bepaalde opstelling kan functioneren.

Zoals vermeld in paragraaf 2.2.1.1 nemen de demontagekrachten snel af vanaf een temperatuur van 185°C en bereiken de demontagekrachten een minimum op 230°C [6].

Bij verwarmen is het belangrijk dat er wordt verwarmd onder een temperatuur van ongeveer 270-280°C. Dit is omdat indien er met hogere temperaturen wordt gewerkt er zeer schadelijke gassen vrijkomen uit de printplaten [7].

Hierdoor is het noodzakelijk de lucht die uit het systeem komt te zuiveren doormiddel van een luchtzuiveringssysteem. In Figuur 17 is een mogelijke opstelling van een luchtzuiveringssysteem terug te vinden. Voor de zuivering kan eventueel gebruik worden gemaakt van actieve koolstof waardoorheen de verbrandingsgassen worden gestuurd. Na deze zuiveringsstap bezit deze lucht nog een grote hoeveelheid warmte. Om de efficiëntie te verhogen is het nu mogelijk deze gassen terug in het systeem te blazen [7].



Figuur 17: Luchtzuiveringssysteem [7]

Voor de soldeerverbinding te smelten kan er ook gebruikgemaakt worden van een vloeistof die de warmte overdraagt aan de printplaat. Door middel van ultrasonische trillingen wordt de vloeistof verwarmd. Aangezien de vloeistof een beter warmtetransmissie coëfficiënt heeft dan lucht, kunnen de componenten op een kortere tijd worden gedemonteerd van de printplaat. Uit experimenten is gebleken dat deze methode van verwarmen zeer energie-efficiënt is ten opzichte van het verwarmen met lucht [8].

2.3.1.2 Tinpest

Tinpest is de naam voor de allotrope transformatie van zilverkleurig β -tin naar bros en grijs α -tin. Tijdens deze transformatie zal het volume van het tin 26 - 27% toenemen [9]. Dit in combinatie met het bros worden van het materiaal zorgt ervoor dat het tin uit elkaar valt tot een poeder van α -tin [9], [10]. In onderstaande afbeelding (zie Figuur 18) is deze transformatie stap voor stap weergegeven.



Figuur 18: Verschillende fasen tinpest [9]

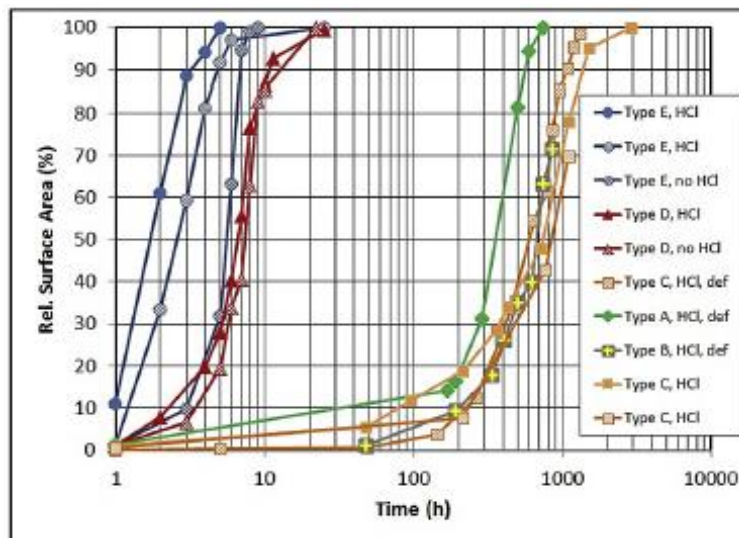
Als dit proces wordt toegepast op een printplaat zouden de componenten na de transformatie los komen te zitten. Hierdoor kunnen ze met weinig kracht worden verwijderd van de printplaat.

De transformatie kan optreden wanneer het tin, in β -fase, voldoende laag wordt afgekoeld. Vanaf een temperatuur van ongeveer $13,2^{\circ}\text{C}$ kan tinpest optreden. De transformatie kan worden versneld door de temperatuur verder te verlagen, de optimale temperatuur waarbij de transformatie het snelst optreedt ligt tussen -35°C en de -50°C [11].

Deze lage temperaturen geven echter geen garantie dat tinpest optreedt. Voor het optreden van dit proces is het bijna een vereiste dat er een α -tinkiem wordt geïnjecteerd op het β -tin, anders kan het zelfs een aantal jaren duren vooraleer er tinpest optreedt. Verder zijn maten waarin de transformatie al dan niet optreedt en de snelheid waarmee dit gebeurt ook sterk afhankelijk van de zuiverheid van het tin. Hoe zuiverder het tin is, hoe sneller de transformatie optreedt [12]. Uit onderzoek is gebleken dat indien lood in de legering is opgelost, de transformatie zelfs niet zal optreden [9].

Sinds 2003 is de RoHS (Restriction of Hazardous Substances)-richtlijn ingevoerd door het Europees parlement en raad. Volgens deze richtlijn mogen bepaalde stoffen, onder andere lood, niet meer worden gebruikt in de productie van elektronische toestellen. De reden hiervoor is dat deze stoffen schadelijk kunnen zijn voor het milieu. Dit heeft als gevolg dat naar andere legeringselementen voor soldeertin moet worden gezocht [10]. Veelgebruikte vervanglegeringen zijn tin-koper, tin-zilver en tin-zilver-koper. Deze legeringselementen zorgen voor dezelfde soldeereigenschappen als lood, maar geven geen garantie voor de bescherming tegen tinpest. Indien de temperatuur laag genoeg is, kan tinpest optreden. Aangezien de meeste elektronische apparaten niet worden blootgesteld aan deze lage temperaturen, levert dat voor deze toestellen geen problemen op [10].

In de curven van Figuur 19 zijn een aantal indicaties weergegeven over de tijdsduur die de transformatie in beslag neemt om een neergeslagen tindruppel te transformeren van de β -structuur naar de α -structuur bij een temperatuur van -24°C . Bij dit experiment werden α -tin kiemen toegevoegd aan het β -tin. Dit experiment werd uitgevoerd voor tin met verschillende zuiverheidsgraden, waarbij het oxide laag al dan niet verwijderd werd met waterstofchloride. In Tabel 3 zijn de zuiverheidsgraden opgesomd, met types A tot en met E waarbij E het zuiverst is. Uit Figuur 19 en Tabel 3 is duidelijk af te leiden dat als het tin zeer puur is, de structuur veel sneller zal transformeren. Verder valt nog op te merken dat de transformatie in kleine maten kan worden versneld indien de oxide laag van het tin wordt verwijderd [12].



Figuur 19: Snelheidscurves tinpest [12]

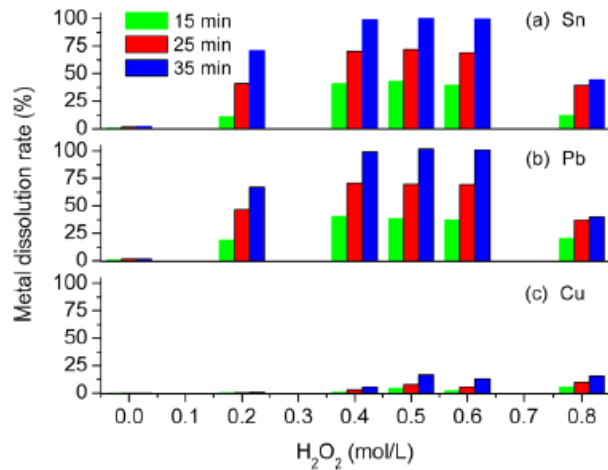
Tabel 3: Zuiverheden van tin [12]

Type	Purity grade (%)	Supplier	Description
A	99.9	Westfalenzinn	melted from pure tin anodes
B	99.9	GTS-Siliton	guaranteed minimum purity
C	99.99	Metoxleg	high purity
D	99.999	Fine Metal Corp.	industrial grade high purity
E	99.999	Honeywell	research grade high purity

2.3.1.3 Oplossen van tin

Voor het in bulk demonteren van de elektronische componenten is er de mogelijkheid om eerst de soldeerlegering, waarmee de componenten gemonteerd zijn op de printplaat, op te lossen in een chemisch bad. Hierna kunnen de componenten op een eenvoudige manier van de printplaat worden verwijderd. Dit chemisch bad kan bestaan uit een waterige oplossing van fluorborzuur waaraan de oxidator waterstofperoxide wordt toegevoegd. Het is belangrijk dat dit zuur en de oxidator in de juiste verhoudingen wordt aangebracht, in de literatuur kan worden gevonden dat 2,5 mol/l fluorborzuur en 0,4 mol/l waterstofperoxide als optimum kan worden beschouwd. Indien er nu een printplaat met elektronische componenten wordt ondergedompeld in dit bad, zal na 35 minuten zo goed als de hele soldeerlegering zijn opgelost.

Een groot voordeel hierbij is dat de componenten niet worden aangetast door het chemisch bad, en ze achteraf dus opnieuw kunnen worden gebruikt. Het koper op de printplaat wordt echter wel in kleine maten aangetast, maar dit kan worden verwaarloosd. In onderstaand blokdiagram (zie Figuur 20) zijn indicaties terug te vinden in welke maten de metalen worden opgelost.



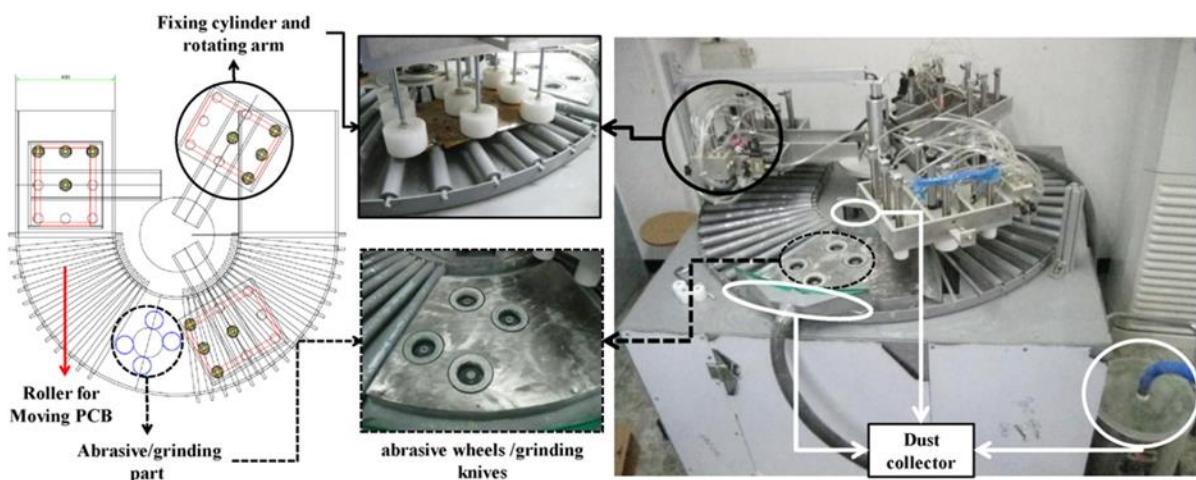
Figuur 20: Opgeloste metalen in fluorboorzuur [13]

Een ander groot voordeel is dat er geen externe energie moet worden toegevoegd om de soldeerlegering op de printplaat op te lossen, de printplaat moet enkel gedurende een bepaalde tijd worden ondergedompeld in het chemische bad. Verder kan het extractiemiddel en de soldeerlegering op een eenvoudige wijze worden gerecupereerd doormiddel van een elektrolyseproces [13].

Een nadeel bij deze werkwijze is dat er met gevaarlijke stoffen wordt gewerkt waardoor er speciale voorzorgsmaatregelen moeten worden voorzien.

2.3.1.4 Losfrezen soldeerverbinding

Voor het verwijderen van de soldeerverbinding van de elektronische componenten kan er gewerkt worden met *grinders*. Bij deze methode wordt de printplaat over een reeks *grinders* geschoven. Hierdoor worden onderliggende soldeerverbindingen afgesleten en komen bovenliggende componenten los te zitten waardoor ze met weinig kracht kunnen worden verwijderd. Figuur 21 toont een mogelijke opstelling om dit principe toe te passen.



Figuur 21: Verwijderen soldeerverbinding met behulp van grinders [14]

Hierbij zal de printplaat worden geklemd doormiddel van negen pneumatische cilinders die de printplaat op de tafel duwen. Vervolgens zal een roterende arm de printplaat, via een rollentafel, over vier diamanten *grinders* voeren. Deze zullen de soldeerverbindingen dan afslijten waarna de componenten verwijderd kunnen worden. Tenslotte wordt de printplaat afgevoerd via een andere rollentafel [14].

Deze manier van demonteren is het meest geschikt voor printplaten waarbij de componenten aan een zijde zitten en die componenten met *through-hole* technologie zijn bevestigd. In de literatuur wordt vermeld dat ook *surface mounted devices* met succes kunnen worden verwijderd, maar hierover bestaan twijfels aangezien de *grinders* deze componenten makkelijk kunnen beschadigen.

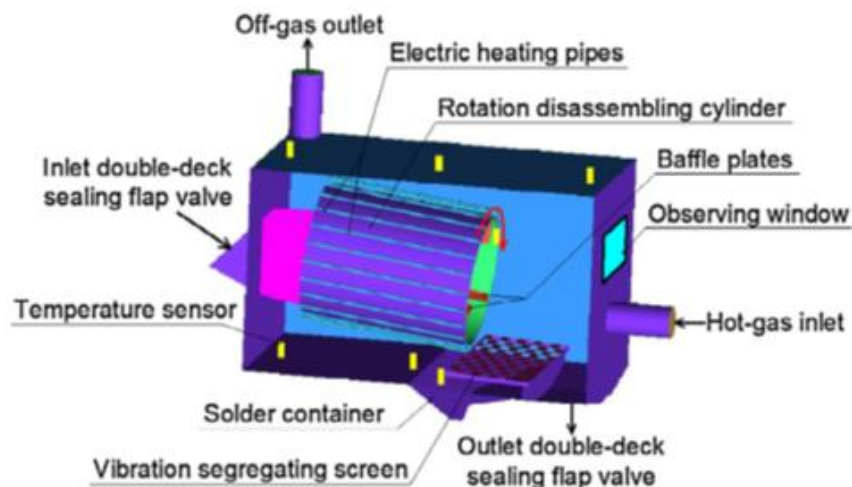
2.3.2 Scheiden van de componenten

2.3.2.1 Roterende trommel met keerschotten

Een eerste manier om componenten te demonteren is door de printplaten doorheen een roterende trommel te sturen. Deze trommel wordt aan het binnenoppervlak voorzien van keerschotten, op deze manier worden de printplaten steeds op een bepaalde hoogte gebracht waarna ze vallen. Als de soldeerverbindingen los zijn, zullen de componenten zich makkelijk van de printplaat verwijderen.

Bij deze methode is de input een aantal printplaten zonder soldeerverbinding en is de output lege printplaten en elektronische componenten.

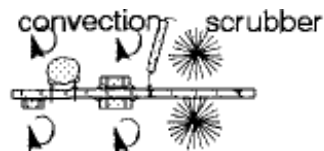
In onderstaande opstelling (Zie Figuur 22) kan worden gezien dat het verwijderen van de soldeerverbindingen en het scheiden van de componenten simultaan kan gebeuren. Bij deze opstelling wordt de roterende trommel in een afgesloten behuizing geplaatst, vervolgens wordt in deze behuizing warme lucht geblazen zodat de soldeerverbindingen smelten en de componenten los komen te zitten. Door de rotatiebeweging van de trommel worden de componenten nu gescheiden van de printplaat. De input is hierbij dus een reeks gevulde printplaten, en de output losse componenten, samen met de lege printplaten [7].



Figuur 22: Roterende trommel en trilplaat voor componenten te scheiden van de printplaat [7]

2.3.2.2 Afborstelen componenten

Eenmaal de soldeerverbinding verbroken is, is er nog maar een kleine kracht nodig om de componenten van de printplaat te scheiden. Indien de printplaat nu in een horizontale positie wordt gehouden zullen de componenten aan de onderkant van de printplaat afvallen ten gevolge van de zwaartekracht, de componenten aan de bovenkant van de printplaat kunnen dan verwijderd worden door er eenvoudigweg met een roterende borstel over te gaan. In Figuur 23 wordt dit principe visueel weergegeven.



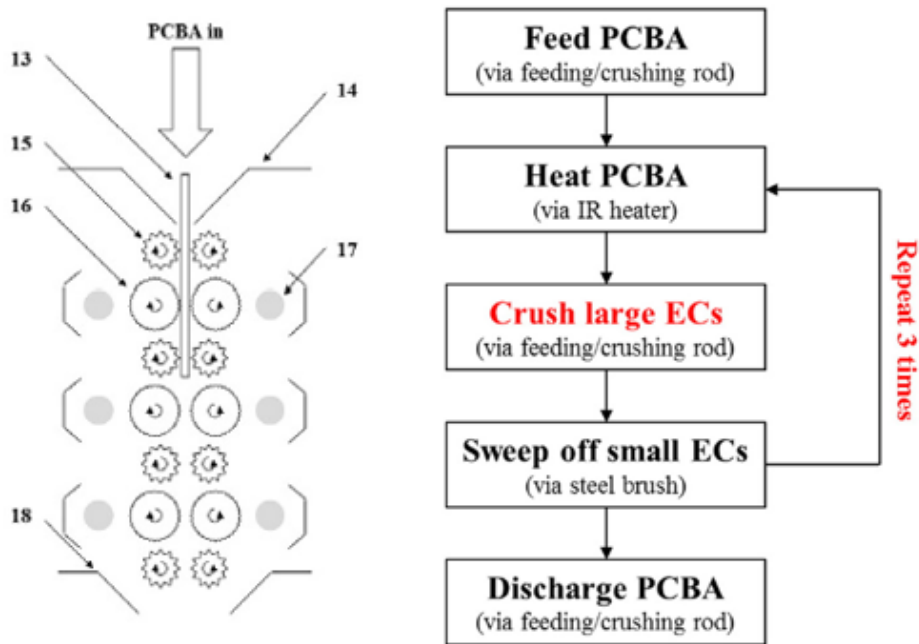
Figuur 23: Afborstelen componenten [5]

In deze schets wordt de printplaat eerst verwarmd tot het smeltpunt van tin, vervolgens zal de printplaat door borstels worden gestuurd waardoor de componenten worden verwijderd [5].

2.3.2.3 Componenten demonteren doormiddel van een shredder

Bij een groot aantal printplaten, van onder andere laptops en desktops, zijn een aantal componenten bevestigd doormiddel van schroeven en/of klinknagels in plaats van een soldeerlegering. In dat geval is het niet mogelijk om de soldeerlegering eerst te verwijderen alvorens de component te demonteren. Voorbeelden van deze componenten zijn onder anderen koelvinnen, bevestigingspinnen, ... Deze componenten zijn in de meeste gevallen groter dan de andere componenten die zich op de printplaat bevinden.

Om deze componenten te verwijderen kan er gebruik worden gemaakt van een soort *shredder* waardoorheen de printplaat wordt geduwd. In Figuur 24 is een dergelijke shredder zichtbaar gemaakt. Het speciale aan deze shredder is dat de shredderwielen op een bepaalde afstand van elkaar staan, hierdoor zal de printplaat niet volledig worden verwoest.

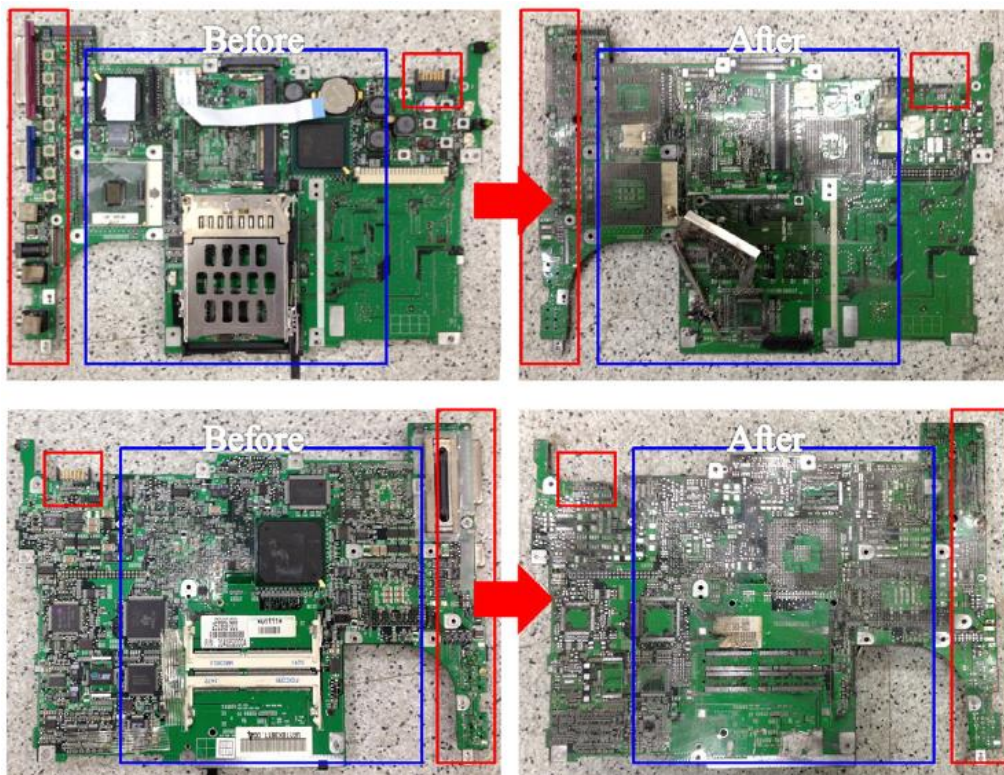


Figuur 24: Schematisch overzicht shredder; Rechts: Stappenplan shredder [15]

Bij dit systeem zal de printplaat worden aangevoerd aan de shredderwielen. De wielen zullen grip krijgen op de printplaat waardoor deze verder in het systeem wordt getrokken. De shredderwielen zullen trekken en duwen op de grotere componenten waardoor de verbinding met de printplaat sterk wordt verzwakt. Na een shredderstep zal de printplaat doorheen twee tegenoverstaande roterende stalen borstels worden gevoerd. Deze borstels zullen de overige componenten, die nog met een zwakke verbinding aan de printplaat hangen, verwijderen. Deze twee opeenvolgende stappen zullen bij deze shredder driemaal na elkaar gebeuren om er zeker van te zijn dat alle grote componenten worden gedemonteerd.

Om de kleine componenten te demonteren, die niet door de shredder worden geraakt, zal bij dit systeem achter elke borstel een infraroodverwarmer worden geplaatst. Hierdoor zal het tin van de kleine componenten worden gesmolten waardoor de stalen borstels ook de kleine componenten kunnen demonteren.

In Figuur 25 staan de voor- en na-effecten visueel weergegeven nadat een printplaat doorheen dit systeem wordt geduwd [15].



Figuur 25: Voor en na demontage door shredder [15]

2.3.3 Sorteren componenten met computervisie

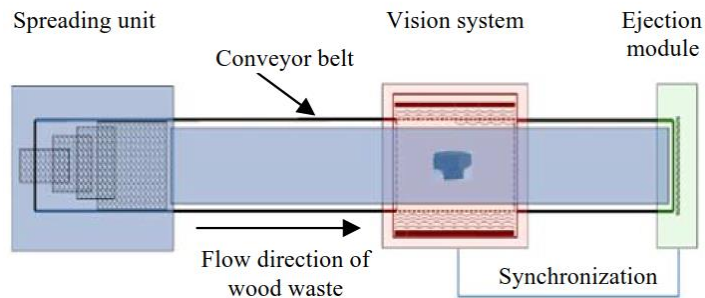
Nadat alle componenten van de printplaat gedemonteerd zijn ontstaat een massastroom van verschillende componenten. De volgende stap is nu de gewenste componenten uit deze massastroom filteren met behulp van een sorteersysteem. Aangezien deze masterproef zich voornamelijk focust op de demontage stap zal deze studie echter beperkt blijven. Hieronder worden twee potentiële sorteersystemen in het kort voorgesteld.

2.3.3.1 Sorteren componenten doormiddel van een persluchtschietstelsel

Bij dit systeem zullen de gewenste componenten doormiddel van perslucht uit de massastroom componenten, afkomstig van de printplaten, worden geschoten. Er werd al onderzoek gevoerd naar dergelijk sorteersysteem binnen de onderzoeksgroep ACRO.

Het ontwikkelde sorteersysteem heeft tot doel een gemengde stroom A-graad houtschilfers en B-graad houtschilfers te scheiden. Onder A-graad hout verstaat men ruwhout en onder B-graad hout verstaat men stukken OSB-plaat, MDF-plaat, ...

Het scheidingsstelsel zelf wordt opgedeeld in vier stappen, namelijk: een spreidingsstap, een visiestap, een uitwerpmodule en een synchronisatiestap. Deze stappen zijn zichtbaar gemaakt in Figuur 26.

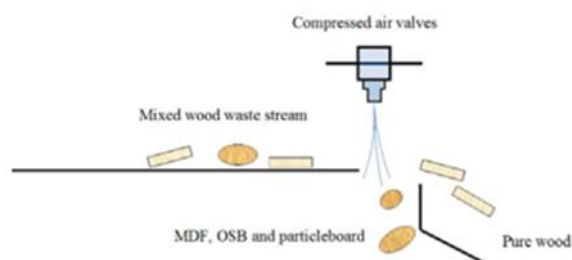


Figuur 26: Principeschets geheel persluchtsortersysteem [16]

Bij de spreidingsunit zullen de houtchilfers eerst op een triltafel vallen. Deze zorgt ervoor dat de schilfers gelijk worden verspreid over de breedte, en ze niet bovenop elkaar zullen liggen.

Vervolgens komen de schilfers terecht op een transportband. Deze transporteert de houtchilfers aan een hoge snelheid zodat er een bepaalde afstand tussen de schilfers wordt gecreëerd. De transportband transporteert de schilfers naar een visiesysteem en tenslotte naar de sorteermodule.

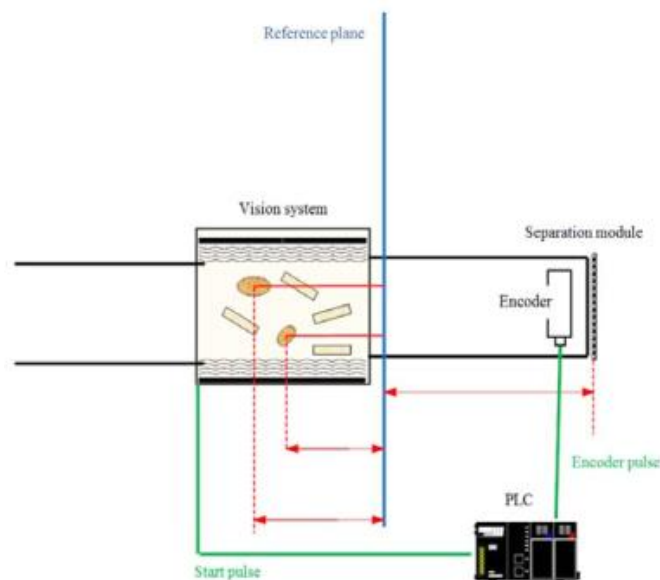
Voor het detecteren van de verschillende soorten houtchilfers wordt gebruikgemaakt van *template matching*. Hierbij wordt er gebruikgemaakt van een kleurlijnscamera. Het herkennen van B-graad hout gebeurt op basis van drie kenmerken, namelijk: vormkarakteristieken, structuur en kleur. Dit wordt gedaan omdat indien er maar gebruik wordt gemaakt van één van deze kenmerken, dit niet voldoende informatie geeft om met zekerheid te kunnen zeggen dat het om A- of B-graad hout gaat. De data, afkomstig uit het visiesysteem, wordt doorgevoerd naar een PLC. De PLC stuurt tenslotte een reeks pneumatische ventielen op het juiste moment aan die de B-graad houtchilfers uit de massastroom schieten. Figuur 27 geeft een principeschets weer van de persluchtschieter.



Figuur 27: Principeschets persluchtschieter [16]

Het is echter belangrijk dat het visiesysteem gesynchroniseerd werkt met het scheidingsysteem. Dit wordt gerealiseerd door een encoder te monteren op de motor van de transportband. Elke millimeter dat de transportband verplaatst, zal de encoder een puls genereren. Deze pulsen worden naar zowel de camera als naar de PLC gestuurd. Steeds wanneer de camera een puls krijgt zal er een lijn vanop de transportband worden opgenomen. Wanneer de camera een bepaalde hoeveelheid pulsen heeft gekregen zullen alle opgenomen lijnen worden samengevoegd tot één afbeelding. Vervolgens wordt deze afbeelding

doorgestuurd naar beeldverwerkingssoftware. Vanaf de eerste puls van dergelijke afbeelding, houdt de PLC tegelijkertijd het aantal pulsen bij. Als de beeldverwerkingssoftware nu klaar is met het verwerken van de afbeelding zal deze informatie worden doorgestuurd naar de PLC. Tegelijkertijd zal de PLC opvragen hoeveel pulsen hij heeft ontvangen sinds de eerste puls van de afbeelding. Op basis van het aantal pulsen kan nu exact worden bepaald op welke positie de houtshilfers op de transportband liggen. In Figuur 28 is een schematisch overzicht terug te vinden over hoe deze opstelling eruit zou kunnen zien [16].



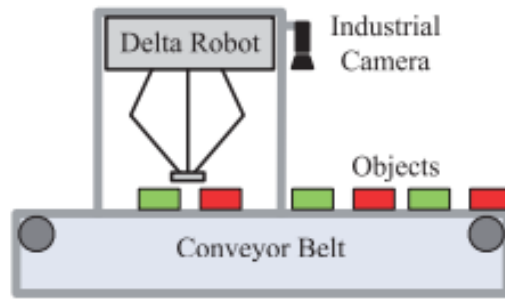
Figuur 28: Synchronisatiemodule sorteersysteem [16]

In samenspraak met ing. Maarten Verheyen, een vroegere medewerker van dit project, bleek het niet evident te zijn om met dergelijk systeem elektrische componenten uit te sorteren. Zo moet eerst worden onderzocht hoe de gewenste componenten herkend worden, hoe de componenten zich gedragen op de transportband, ...

2.3.3.2 Sorteren met behulp van een deltarobot

Als sorteermethode kan er ook geopteerd worden voor een delta robot. Hierbij zal een visiesysteem eerst de gewenste component detecteren, waarna een delta robot de gewenste component uit de massastroom componenten neemt. Om de component te grijpen kan de deltarobot gebruikmaken van een mechanische grijper of zuignap.

Een delta robot kan, vanwege lage inertiekrachten, aan zeer hoge snelheden werken. Daardoor zijn ze geschikt om te fungeren als sorteermecanisme. Het is ook mogelijk om meerdere delta robots na elkaar te plaatsen, hierdoor kunnen meerdere soorten componenten gelijktijdig worden gesorteerd. Als de componenten éénmaal zijn opgenomen door de delta robot, kunnen ze op een plaats naast de transportband worden gedeponereerd. Naast de huidige transportband kan dan een andere transportband of glijbaan worden geplaatst om eenzelfde soort component in een bak te verzamelen. Een opstelling van een deltarobot met visiesysteem en transportband is zichtbaar in Figuur 29.



Figuur 29: Opstelling sorteereenheid met deltarobot [17]

3 Morfologisch overzicht en keuzes

De stap na de literatuurstudie is het samenvatten van alle methoden in een morfologisch overzicht. Daardoor ontstaat een duidelijk overzicht over de verschillende mogelijkheden die kunnen worden ingevuld in de functies van het functieblokschema. Dit schema wordt zowel opgesteld voor selectieve- als voor bulkdemontage, beide zijn terug te vinden in bijlage A.

De volgende stap is nu een aantal keuzes te maken van de meest interessante demontagemethoden voor het verwijderen van de component of soldeerverbinding. Van deze methoden worden vervolgens testmodules uitgewerkt. De keuzes zijn afhankelijk van veiligheidsaspecten en vooraf bekende nadelen. De keuzes, samen met hun verantwoording zijn hieronder terug te vinden.

3.1 Keuzes

3.1.1 Keuze 1: Uitlokken tinpest

Zoals vermeld in de literatuurstudie heeft de RoHS -richtlijn ervoor gezorgd dat lood, dat de eigenschap heeft om tinpest tegen te werken, verboden werd in soldeerlegeringen die gebruikt werden voor de productie van printplaten. Daardoor lijkt het interessant om te controleren of tinpest niet optreedt in de huidige soldeerlegeringen van printplaten.

Als tinpest optreedt is dit een interessante methode om de soldeerverbinding te verwijderen. De opstelling om tinpest uit te lokken is zeer eenvoudig, hiervoor kan eenvoudigweg gebruik worden gemaakt van een industriële koelcel. Verder is deze ook milieuvriendelijk aangezien er geen schadelijke stoffen vrijkomen. Een nadeel bij deze methode is echter wel dat een koelinstallatie relatief veel energie verbruikt.

3.1.2 Keuze 2: Smelten tin

Uit de literatuurstudie kon al worden afgeleid dat het smelten van tin een effectieve demontagemethode is. Een groot voordeel van deze methode is dat ze eenvoudig geïmplementeerd kan worden, de printplaat moet eenvoudigweg in een ruimte worden geplaatst waar de temperatuur voldoende hoog is.

Er zijn echter wel een aantal nadelen bij deze methode. Een eerste nadeel is dat deze printplaten op een voldoende hoge temperatuur verwarmen energie-intensief is. Een tweede nadeel is dat er tijdens het verwarmen een reeks schadelijke stoffen kunnen vrijkomen, dit nadeel kan worden opgevangen door gebruik te maken van een luchtzuiveringsinstallatie.

Gezien de eenvoud van deze methode werd beslist hiervoor proefopstelling op te zetten. De uitwerking hiervan is terug te vinden in volgend hoofdstuk.

3.1.3 Keuze 3: Selectief afschrappen componenten

Er werd voor deze methode gekozen omdat de componenten hierbij selectief worden gedemonteerd. Daardoor worden enkel de gewenste componenten van de printplaat verwijderd, waardoor na de demontage stap geen extra sorteerstap meer nodig is.

Een andere reden waarom er voor deze methode werd gekozen is omdat reeds visiesoftware voorhanden was die de gewenste componenten kan herkennen en lokaliseren. Daardoor kan dit selectieve demontageproces volledig geautomatiseerd werken. Dit komt de veiligheid ook ten goede omdat het systeem daardoor in een afgesloten ruimte kan functioneren.

3.1.4 Keuze 4: Bulk afschrappen componenten met shredder

In een paper werd een shreddersysteem gevonden dat wordt gebruikt om grote componenten, die voornamelijk met schroefverbindingen op de printplaat zijn bevestigd, te demonteren met een shredder. Door de shredderwerking werden de schroefverbindingen zodanig verzwakt dat deze componenten los kwamen te zitten

Op basis van deze paper werd inspiratie opgedaan voor het uitwerken van een variant op deze shredder. Het verschil bij deze variant is dat de twee shredderwielen in een tegenovergestelde draairichting en met een verschillend toerental zullen draaien. Daardoor zal er een schraapeffect op de printplaat worden verwacht waardoor de componenten van de printplaat worden geschraapt.

Dit lijkt op het eerste zicht een interessant systeem omdat als het werkt, de componenten op een vlotte manier van de printplaat kunnen worden gedemonteerd.

3.2 Afgewezen keuzes

3.2.1 Uitponsen component

Het uitponsen van de component heeft, zoals reeds vermeld in de literatuurstudie, twee nadelen. Het eerste nadeel is dat steeds een stuk printplaat aan de component zal blijven hangen. Dit zorgt voor een lagere concentratie tantaal per massa eenheid gedemonteerde componenten, in vergelijking tot wanneer enkel de tantaalcomponenten worden gedemonteerd. Het tweede nadeel is dat voor een optimale demontage van verschillende componentgroottes, verschillende maten van stempels en matrijzen moeten worden voorzien. Omwille van bovengenoemde nadelen zal voor deze demontagemethode geen proefopstelling worden gebouwd.

3.2.2 Uitsnijden component

Voor het uitsnijden van de component kan gebruik worden gemaakt van bijvoorbeeld een laser cutter, of een waterstraalsnijder. Daarbij kan de component nauwkeurig worden uitgesneden. Het nadeel bij deze methode is dat steeds een deel van de printplaat aan de component blijft hangen. Aangezien de concentratie tantaal per massa eenheid zo hoog mogelijke moet zijn levert dit problemen op in vergelijking met andere demontagetechnieken.

Om deze reden werd dan ook beslist geen verder onderzoek te doen naar deze demontagetechniek.

3.2.3 Uittrekken component

Het uittrekken van de component kan gebeuren door de component langs de zijkant in te klemmen of door de component vast te nemen met een vacuümgreijper.

Voor het vastgrijpen van de component aan de zijkant moet een voldoende hoge wrijvingskracht worden opgewekt. Gezien de miniaturisatie van de componenten kan dit leiden tot complexe grijpers.

Voor het uittrekken van de component met een vacuümgreijper moet een voldoende grote zuigkracht worden opgewekt. Aangezien de onderdruk hoogstens in de buurt gaat komen tot het theoretische maximum van 1 bar, en de oppervlakte van de component zeer klein is lijkt het moeilijk haalbaar om genoeg zuigkracht te kunnen opwekken.

Deze methodes kunnen eventueel werken door eerst de soldeerverbinding van de component te verzwakken, waardoor de demontagekrachten dalen. Dit is echter weer een extra bewerkingsstap die erbij komt, waardoor deze demontagemethode weer complexer wordt.

Omwille van bovengenoemde redenen wordt deze demontagemethode niet verder onderzocht.

3.2.4 Oplossen soldeerverbinding

Bij deze methode wordt de soldeerverbinding van de printplaat opgelost in een chemisch zuurbad. Aangezien deze stoffen giftig zijn, en de installatie moet functioneren in een beschutte werkplaats, kan dit bepaalde veiligheidsrisico's met zich meebrengen. Ook als de installatie in een afgesloten ruimte staat kunnen de behandelde printplaten nog van deze giftige stoffen bevatten.

Voor dit proces is het nodig om bepaalde chemische stoffen aan te kopen. Na het proces houdt men de gebruikte chemische stoffen over met een bepaalde hoeveelheid tin. Deze stoffen moeten nadien dan ook op de juiste manier verwerkt worden, wat deze methode complexer maakt.

Omwille van deze veiligheidsrisico's werd beslist voor deze methode geen proefopstelling op te bouwen.

3.2.5 Losfrezes soldeerverbinding

In de literatuur werd een systeem gevonden waarbij de soldeerverbindingen werden verwijderd door deze eraf te frezen. In deze paper stond vermeld dat dit zowel voor 'surface mounted devices' als voor 'through hole devices' werkt. Hier bestaan echter twijfels over, er ontstaat een vermoeden dat de 'surface mounted devices' bij deze methode zwaar beschadigd worden doordat de frees hierover zal gaan.

Om deze reden wordt de methode 'lospfrezes soldeerverbinding' niet verder onderzocht.

4 Proefopstellingen en resultaten

4.1 Proef 1: Uitlokken tinpest

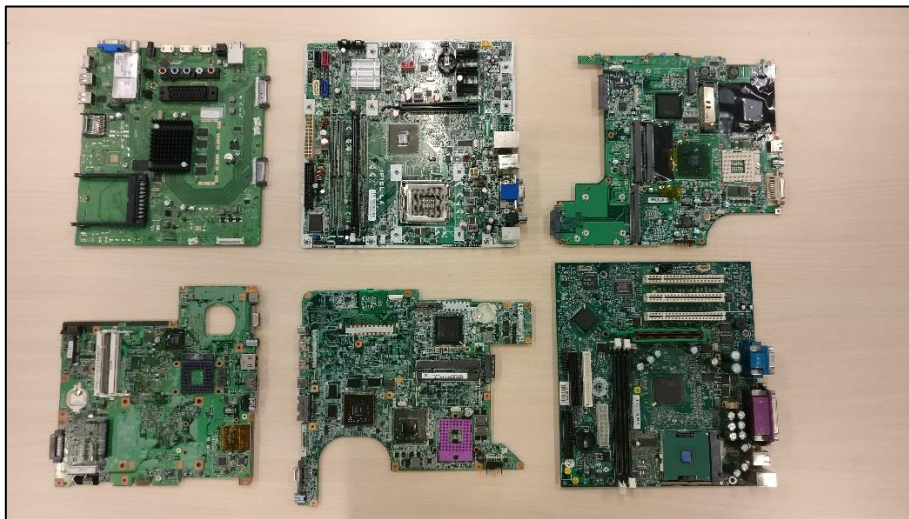
4.1.1 Testen op werking

4.1.1.1 Proefopstellingen

Om het fenomeen tinpest op werking te testen werden twee eenvoudige proefopstellingen gebouwd.

De eerste proefopstelling bestond uit een diepvries die op een constante temperatuur van -21°C wordt gehouden. Hierin wordt vervolgens eenvoudigweg een printplaat geplaatst zodat deze kan afkoelen. Deze diepvriezer werd ter beschikking gesteld door Cel kunststoffen, gelegen in het technologiecentrum.

De tweede proefopstelling bestond uit een koelbox die werd gevuld met droogijs (CO_2), wat een temperatuur heeft van -78°C . Vervolgens werden een zestal compacte printplaten geselecteerd, deze zijn weergegeven op onderstaande afbeelding (Zie Figuur 30).



Figuur 30: Printplaten voor koelbox

Naast deze printplaten werd ook nog een stuk soldeertin geselecteerd waarvan de samenstelling bekend is. Hierdoor kan invloed van de samenstelling op het einde van de proef beoordeeld worden. Dit soldeertin bestond uit 99,3% Sn en 0,7% Cu legering. Verder werd ook nog de lengte van dit soldeertin opgemeten. Dit werd gedaan om na de proef, op basis van de lengte, te controleren of tinpest had opgetreden. Op Figuur 31 is een foto van dit soldeertin terug te vinden.



Figuur 31: Staal soldeertin voor koelbox

Verder werden de temperatuur van het droogijs, de omgevingstemperatuur boven het droogijs en de omgevingstemperatuur buiten de koelbox steeds gemonitord met behulp van een temperatuurlogger. Dit had als voordeel dat de frigobox niet steeds moest worden geopend om te controleren of er nog droogijs aanwezig was. De logger werd ter beschikking gesteld door het verpakkingscentrum, gelegen in het Technologiecentrum te Diepenbeek.

Tenslotte werd het droogijs samen met de printplaten, het stuk soldeertin en de temperatuurtasters in de koelbox geplaatst. Op Figuur 32 is een foto van de hele opstelling terug te vinden.



Figuur 32: Proefopstelling uitlokken tinpest in koelbox

4.1.1.2 Uitvoeren proef

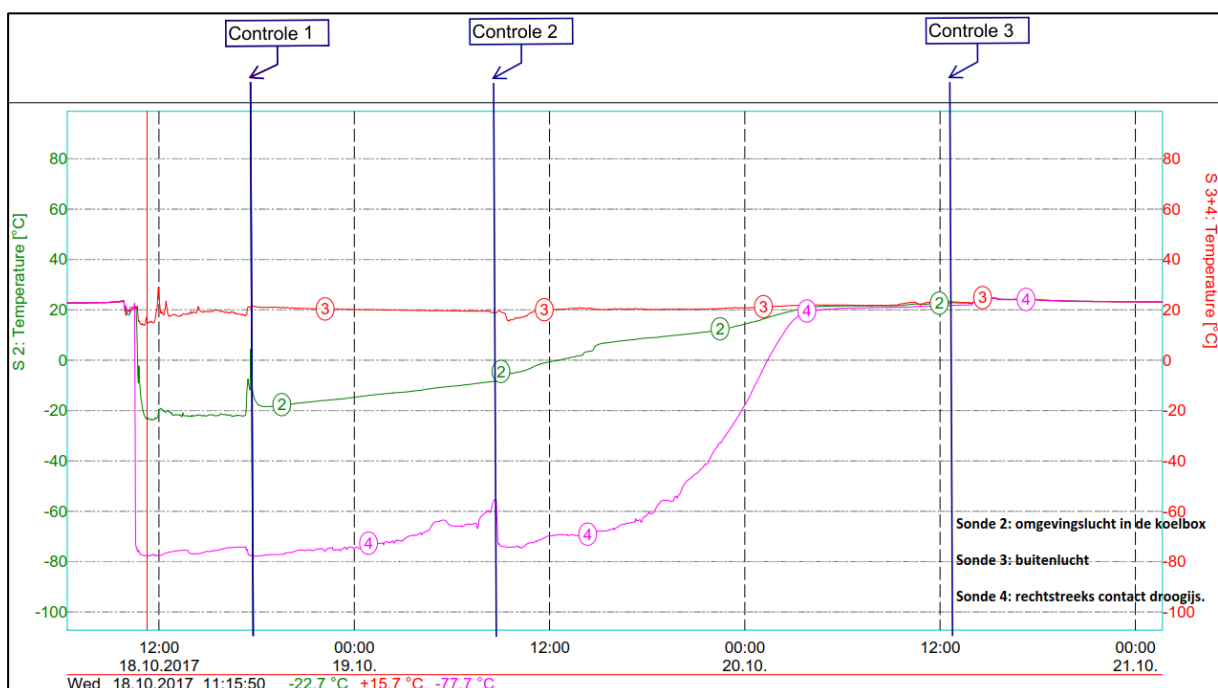
Vervolgens blijven de printplaten gedurende een bepaalde tijd in hun koeling. Bij de printplaat in de diepvriezer was dit twee weken, bij de printplaten uit de koelbox was dit totdat al het droogijs gesublimeerd was. Tussendoor werd regelmatig gecontroleerd of al tinpest had opgetreden op een van de printplaten.

Op Figuur 33 is het koelverloop van het droogijs in de koelbox weergegeven. Hierop is duidelijk te zien op welke tijdstippen er gecontroleerd werd.

Na ongeveer acht uur koelen van de printplaten met droogijs werd één printplaat uit de koelbox gehaald om te controleren of er al verschijnselen van tinpest waren opgetreden, dit moment staat als controle één vermeld op Figuur 33.

Na 21 uur werden de resterende printplaten uit de koelbox gehaald, dit is controle twee zoals zichtbaar op Figuur 33.

Na ongeveer 51 uur werd er voor de laatste keer gecontroleerd, dit is controle drie op Figuur 33. Op dit moment was ook al het droogijs gesublimeerd wat ook het einde van het experiment betekende.



Figuur 33: Koelverloop droogijs in koelbox

4.1.1.3 Resultaten en conclusie

De printplaat die in de diepvriezer werd geplaatst vertoonde na twee weken nog steeds geen blijk van tinpest. Ook het stukje soldeertin en printplaten die met droogijs werden gekoeld gaven op geen enkel moment tekenen van tinpest. Er werd geprobeerd een aantal componenten van de printplaten af te trekken, maar hiervoor was evenveel kracht nodig als bij de printplaten die geen koudebehandeling kregen.

Uit deze experimenten kan worden geconcludeerd dat het gebruik van tinpest geen rendabele manier is om de soldeerverbinding van printplaatcomponenten te verwijderen, er is dan ook besloten om geen verdere proeven te doen op dit verschijnsel. Het is echter wel mogelijk dat tinpest optreedt als de printplaten langduriger worden blootgesteld aan deze koude. Dit zou echter te lang duren aangezien het groot aantal printplaten dat per tijdseenheid moet worden verwerkt.

In de literatuur kon echter ook worden gevonden dat tinpest moeilijk op te wekken is en sterk afhankelijk is van de samenstelling van het soldeertin [12]. Printplaatfabrikanten zullen hier zeker ook rekening mee moeten houden aangezien in een aantal toepassingen printplaten worden blootgesteld aan extreme koude en tinpest al kan optreden vanaf een temperatuur van ongeveer 13°C.

Om deze redenen werd dan ook besloten geen verdere experimenten te doen wat betreft het uitlokken van tinpest op printplaten.

4.2 Proef 2: Smelten soldeerverbinding

4.2.1 Testen op werking

4.2.1.1 Proefopstelling

Om de methode ‘smelten soldeerverbinding’ te testen werd gebruik gemaakt van een laboratoriumoven, die ter beschikking werd gesteld door Cel kunststoffen. Hierin wordt de printplaat dan geplaatst.

Omdat printplaten een aantal kunststoffen bevatten die smelten tijdens het experiment, en hierdoor de oven kunnen bevuild, moet een soort opvangbak worden voorzien die samen met de printplaat in de oven wordt geplaatst. In Figuur 34 is een foto van de gebruikte opvangbak terug te vinden.



Figuur 34: Opvangbak printplaat voor smelten soldeerverbinding

De opvangbak werd voorzien van een soort roosterstructuur waarop de printplaat kan rusten. Op deze manier kunnen de componenten, die los komen te zitten, onmiddellijk van de printplaat afvallen als gevolg van de zwaartekracht.

Vervolgens wordt dit bakje, samen met een printplaat, in de oven geplaatst. Op Figuur 35 is een foto van deze proefopstelling terug te vinden.



Figuur 35: Proefopstelling smelten soldeerverbinding

4.2.1.2 Uitvoering proef

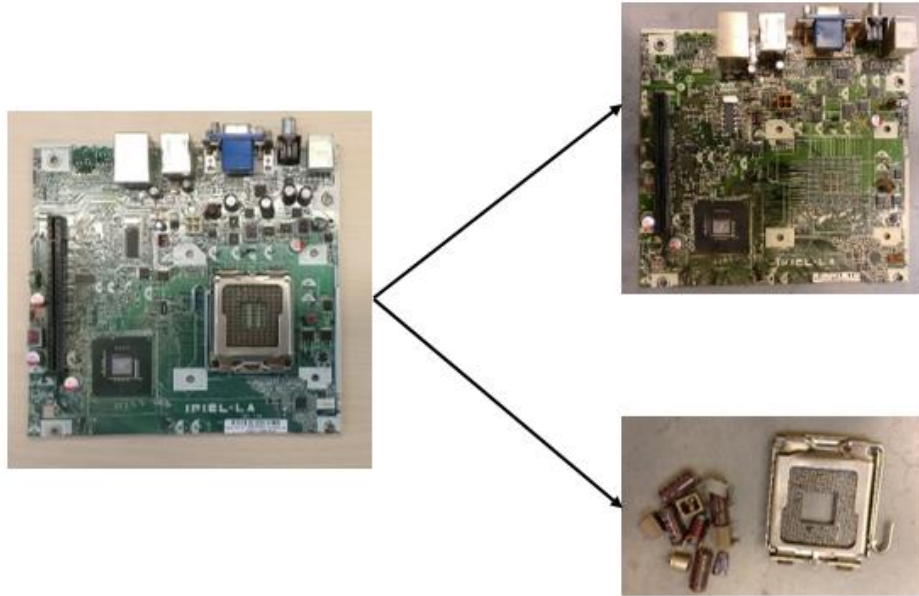
In eerste instantie werd gecontroleerd in welke mate de componenten automatisch loskomen van de printplaat. Hiervoor werd een printplaat gedurende 60 minuten in de oven geplaatst op een temperatuur van 230°C. Er werd voor deze temperatuur gekozen omdat in de literatuur werd vermeld dat de demontagekrachten bij deze temperatuur minimaal zijn [6].

Aangezien dit leidde tot een positief resultaat, werd vervolgens gecontroleerd met welke snelheid de componenten loskomen. Hiervoor werd de oven eerst ingesteld temperatuur van 230°C en vervolgens op een temperatuur van 265°C. De temperatuur van 265°C werd zo gekozen dat deze lager lag dan 270°C. Dit was omdat er boven deze temperatuur veel schadelijke gassen kunnen vrijkomen uit de printplaat [7].

Het verschil met de eerste proef is nu dat de printplaat om de vier minuten uit de oven werd gehaald en in trilling werd gebracht. Hierdoor vielen de componenten, waarvan de soldeerverbinding verwijderd werd, van de printplaat. Vervolgens werd de printplaat opnieuw voor vier minuten in de oven geplaatst. Deze strategie werd net zolang toegepast totdat de printplaat volledig leeg was.

4.2.1.3 Resultaten en Conclusies

Na een printplaat 60 minuten te verwarmen op 230°C werd deze uit de oven gehaald. Hierop was te zien dat er al een deel componenten zelfstandig waren afgevallen. Er bleef echter nog steeds een groot deel van de componenten op de printplaat zitten. Het resultaat van deze proef is in Figuur 36 visueel weergegeven.

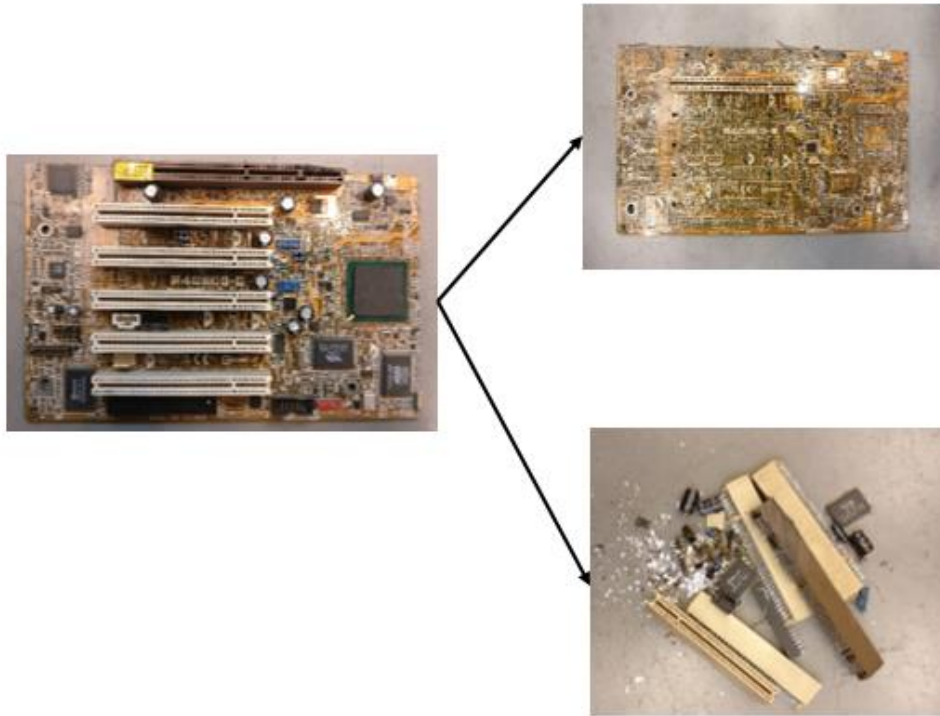


Figuur 36: Resultaat 60 minuten verwarmen op 230°C

Vervolgens werd dan gecontroleerd met welke snelheid de componenten loskwamen. In eerste instantie werd de oven ingesteld op een temperatuur van 230°C en werd de printplaat om de vier minuten uit de oven gehaald. Uit deze proef bleek dat er in totaal zestien minuten nodig waren om de gehele printplaat te ledigen.

Nadat de printplaat na de eerste vier minuten uit de oven werd genomen kon worden gezien dat er nog geen componenten waren losgekomen, ook nadat de printplaat in trilling werd gebracht kwamen nog geen componenten los. Na acht minuten verwarmen waren al een aantal componenten zelfstandig losgekomen, ook na het in trilling brengen van de printplaat kwamen nog een deel componenten los. Na twaalf minuten waren zo goed als alle componenten losgekomen nadat de printplaat in trilling werd gebracht. Hierna werd de printplaat nog een laatste keer in de oven geplaatst. Na zestien minuten kwamen nog een aantal componenten los en kon worden besloten dat alle nuttige componenten van de verwijderd waren.

Op Figuur 37 is het finale resultaat van dit experiment visueel weergegeven.



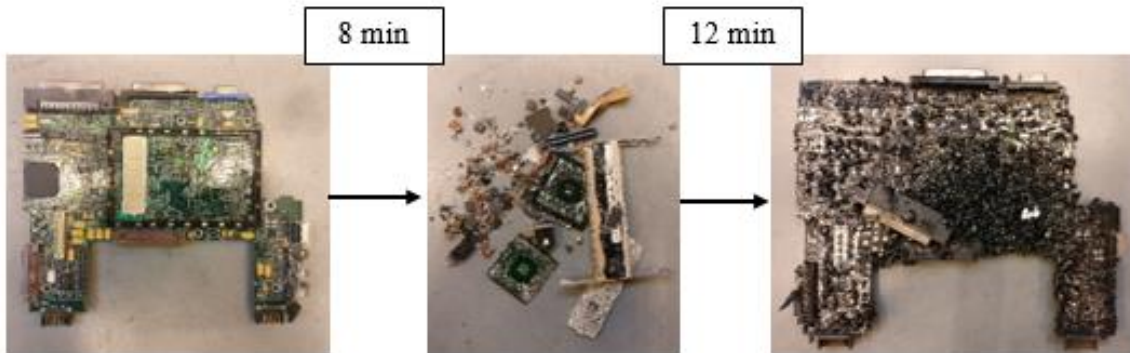
Figuur 37: Resultaat na zestien minuten verwarmen op 230°C

Daarna werd dezelfde proef uitgevoerd, maar nu werd de oven ingesteld op een temperatuur van 265°C. Daaruit bleek dat na twaalf minuten verwarmen de printplaat verbrand en er geen componenten meer loskomen.

Na vier minuten werd de printplaat voor de eerste keer uit de oven gehaald, hier kon worden vastgesteld dat er al veel componenten zelfstandig waren losgekomen, ook nadat de printplaat in trilling werd gebracht kwamen er nog veel componenten los. Na acht minuten verwarmen kwamen nog een paar componenten los, na deze tijd kon worden vastgesteld dat de printplaat soepel werd en begon te verbranden.

Tenslotte werd de printplaat nog een laatste keer in de oven geplaatst, na twaalf minuten kon worden vastgesteld dat de printplaat zwaar verbrand was en geen bijkomende componenten meer los waren gekomen.

In Figuur 38 is het finale resultaat van dit experiment visueel weergegeven.



Figuur 38: Resultaat na twaalf minuten verwarmen op 265°C

Uit deze proeven kan worden besloten dat ‘smelten van de soldeerverbinding’ een effectieve manier is om de componenten te kunnen demonteren. Er moet wel naar een optimale temperatuur worden gezocht. Bij een voldoende lage temperatuur komen alle componenten wel los en verbrand de printplaat niet, maar neemt de demontage veel tijd in beslag. Als de temperatuur te hoog is verbrand de printplaat na een tijd waardoor het mogelijk is dat een deel componenten verloren gaan.

Een nadeel bij deze methode is dat tijdens het verwarmen rookgassen vrijkomen die zorgen voor een enorme reukhinder en schadelijk kunnen zijn voor de gezondheid. Daarvoor moeten luchtzuiveringssystemen en afzuigingen worden voorzien. De mate van schadelijkheid zijn echter onbekend aangezien geen analyse werd gedaan op de samenstelling van de rookgassen.

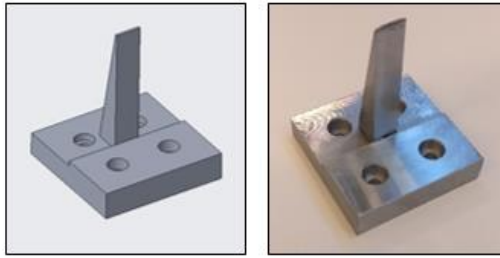
Aangezien er nog een aantal andere demontagetechnieken voorhanden zijn, die dit nadeel niet hebben, werd beslist om voor deze methode geen verdere experimenten uit te voeren.

4.3 Proef 3: Selectief afschrapen componenten

4.3.1 Testen op werking

4.3.1.1 Proefopstelling

Om de methode ‘selectief afschrapen componenten’ op werking te testen, werd een eenvoudige proefopstelling opgebouwd. Er werd gebruikt gemaakt van een 6-assige EPSON-robot die aanwezig is op de onderzoeksgroep ACRO. Vervolgens werd een afschraaptool uitgewerkt die op de robot kon worden gemonteerd. Op onderstaande afbeelding (Figuur 39) is zowel het CAD-model van de afschraaptool als de vervaardigde afschraaptool zichtbaar gemaakt.



Figuur 39: Afschraaptool robot

De schraper bestaat uit twee onderdelen, een bodemplaat en de schraper zelf. De schraper wordt verbonden met de bodemplaat doormiddel van een bout. Hierdoor is de schraper demonteerbaar, en kan deze later eventueel door een ander type van schraper worden vervangen. De 2D detailtekeningen van beide onderdelen zijn terug te vinden in bijlage B.

Voor de huidige schraper werd gekozen voor een spitse driehoekige vorm. Op deze manier kan de schraper eenvoudig tussen alle componenten in.

Daarna moet de printplaat nog worden opgespannen. Dit wordt gedaan door de printplaat vast te klemmen aan de tafel met behulp van lijmklemmen.

Onderstaande afbeelding geeft een beeld van de hele opstelling. (Zie Figuur 40)

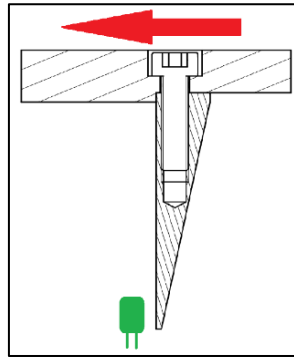


Figuur 40: Opstelling manueel afschrapen met robot

4.3.1.2 Uitvoering

Vervolgens kan deze methode ‘selectief afschrapen componenten’ worden getest. De gevolgde strategie voor het afschrapen van de component is als volgt: de robot handmatig bewegen tot net voor de component, vervolgens de robot laten zakken tot net boven de printplaat, de robot naar voor bewegen totdat de component losspringt, en tenslotte de robot terug omhoog laten komen.

Onderstaande afbeelding geeft deze afschraapstrategie visueel weer (Zie Figuur 41).



Figuur 41: afschraapstrategie

4.3.1.3 Conclusie

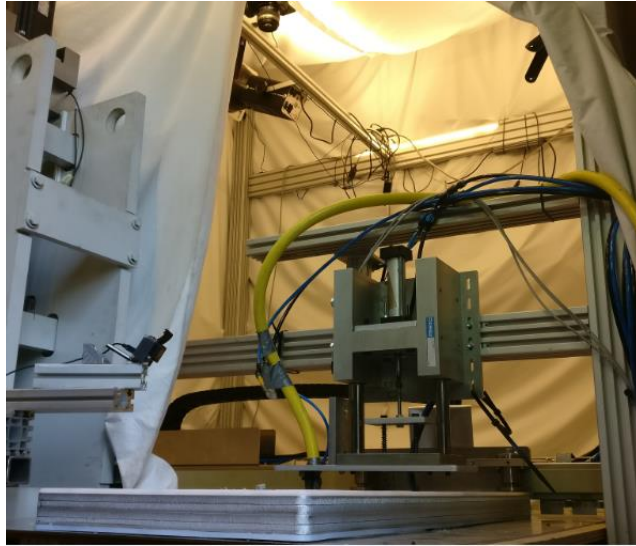
Na het uitvoeren van deze proef bleek dit een goedwerkende methode te zijn. De schraper kon makkelijk bij alle componenten. De componenten kwamen ook als geheel los van de printplaat. Met andere woorden, ze raakten niet verbrijzeld. Daardoor gaat geen massa tantaal verloren. Het enige probleem bij deze proef was dat de gebruikte robot een te laag vermogen had. Daardoor konden de grotere componenten niet worden afgeschrapt. Verder wordt het aangeraden de schraper voldoende lang te maken zodat de componenten, die zich vlak naast grote objecten, zoals bijvoorbeeld koelvinnen bevinden, makkelijk verwijderd kunnen worden.

Op basis van deze resultaten werd beslist deze methode verder uit te werken. Bij vervolgtesten wordt gebruik gemaakt van een andere opstelling, waarbij dit hele afschraapproces geautomatiseerd kan worden en gewerkt wordt met een hogere afschraapkrachten.

4.3.2 Tweede test 'selectief afschrapen componenten'

4.3.2.1 Proefopstelling

Voor het tweede experiment werd gebruik gemaakt van een XY-tafel die ter beschikking werd gesteld door de KU Leuven LCE-onderzoeksgroep binnen het departement Werktuigkunde in Heverlee. Dit systeem beschikt over een computervisiesysteem dat de tantaalcomponenten kan detecteren en lokaliseren. In Figuur 42 en Figuur 43 zijn afbeeldingen van deze opstelling terug te vinden.



Figuur 42: Volledige testopstelling selectief afschrapen met behulp van visiesysteem



Figuur 43: Bovenaanzicht testopstelling selectief afschrapen met behulp van visiesysteem

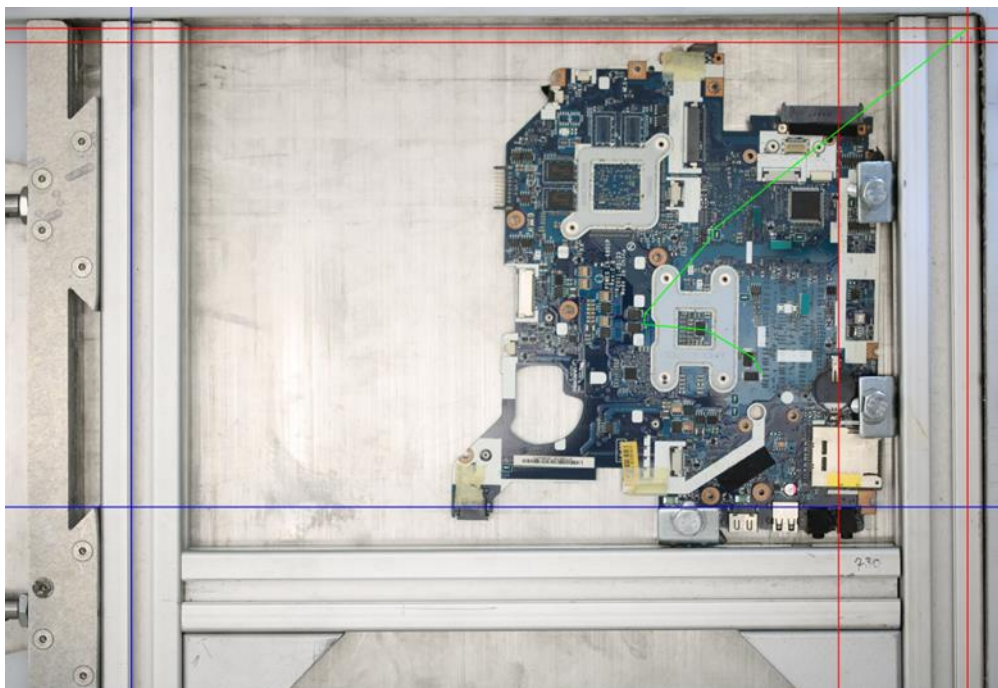
Om de printplaat in deze opstelling te kunnen opspannen wordt gebruik gemaakt van een soort mal die de printplaat langs twee zijden inklemt met behulp van bouten. Figuur 44 toont een foto van de mal waarin een printplaat is ingeklemd.



Figuur 44: Printplaatklem voor testopstelling bij selectief afschrapen met computervisie

Deze mal wordt vervolgens in de opstelling geplaatst, waarbij deze wordt opgespannen met behulp van twee pneumatische cilinders.

Daarna zal de XY-tafel de printplaat onder het visiesysteem positioneren. Het visiesysteem zal dan een foto van de printplaat maken en deze doorsturen naar een computer. De computer detecteert en lokaliseert dan de tanaalcomponenten. Op basis van deze coördinaten zal de computer ook het kortste pad tussen de verschillende componenten berekenen. In Figuur 45 is een foto van een printplaat te zien nadat deze verwerkt werd door het computervisiesysteem



Figuur 45: Padplan voor het afschrapen van de componenten

Daarop is het pad, dat de XY-tafel zal doorlopen, te zien. De bekomen coördinaten van de tantaalcomponenten en het pad worden vervolgens overgemaakt aan een PLC. Het visiesysteem functioneert echter nog niet optimaal en kan daardoor enkel de oranje tantaalcomponenten herkennen. De anderskleurige tantaalcomponenten moeten daardoor nog manueel worden geselecteerd met behulp van de computer. In de volgende fase van dit proces zal de XY-tafel de printplaat transporteren naar het schraapstation. In Figuur 46 is een gedetailleerde weergave van dit schraapstation terug te vinden.



Figuur 46: Schraapstation bij selectief afschrapen met visiesysteem

Dit schraapstation bestaat uit een schraaptool en een pneumatische cilinder die wordt voorzien van een cilindergeleiding. Onderaan deze geleiding wordt een plaat gemonteerd waaraan de schraaptool wordt bevestigd.

De XY-tafel zal de printplaat steeds positioneren op een locatie zodat de schraaptool vlak naast een tantaalcomponent staat. Eens deze positie bereikt is zal de cilinder de schraaptool op de printplaat duwen. Vervolgens zal de XY-tafel de printplaat, over een bepaalde afstand, in de richting van de schraaptool duwen zodat de component van de printplaat wordt geschoven. Tenslotte trekt de cilinder de schraaptool terug naar boven en zal de XY-tafel naar de positie van de volgende component bewegen. Dit proces blijft zich herhalen tot alle geselecteerde componenten van de printplaat gedemonteerd zijn.

Om de gedemonteerde componenten af te voeren werd een soort stofzuiger aan het schraapstation bevestigd. Hierdoor wordt de afgeschraapte component onmiddellijk opgezogen en afgevoerd. De stofzuiger bestaat uit een darm waarin een onderdruk wordt gecreëerd doormiddel van het Venturi-effect. Deze darm mond uit in een opvangbak waardoor de componenten tegelijk worden verzameld.

Tenslotte wordt de printplaat nog naar een finale positie getransporteerd, waar deze verwisseld kan worden met een nieuwe printplaat.

4.3.2.2 *Uitvoering proef*

Aan de hand van deze opstelling werden vervolgens proeven uitgevoerd. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een batch bestaande uit tien printplaten, oftewel twintig printplaatzijden. Deze printplaten waren allemaal afkomstig uit notebooks, deze werden gekozen omdat dit soort printplaten ook binnenkomen binnen het recyclagebedrijf.

Voor elke printplaatzijde werd het aantal aanwezige tantaalcomponenten geregistreerd, daarin werd een onderscheid gemaakt tussen de kleine, middelgrote en de grote componenten. De kleine componenten zijn ongeveer één millimeter breed en twee millimeter lang, de middelgrote componenten zijn ongeveer drie millimeter breed en vier millimeter lang en de grote componenten zijn ongeveer vier millimeter breed en acht millimeter lang [3].

Tijdens de proef werd geregistreerd hoeveel componenten per formaat effectief gedemonteerd en opgezogen werden. Op deze manier kan worden vastgesteld welke componentgroottes al dan niet problemen opleveren voor dit demontagesysteem.

Daarnaast werd ook de totaal gedemonteerde massa van elke componentgrootte gewogen. Door deze dan te delen door het aantal bijhorende gedemonteerde componenten, kan worden bepaald wat de gemiddelde massa per componentgrootte is.

Ook werd de verwerkingstijd per printplaat geregistreerd. Op basis daarvan kan achteraf een ruwe schatting worden gemaakt van verwerkingstijden en mogelijke opbrengsten per tijdseenheid.

Verder leek het ook nuttig het aantal verbrijzelde componenten bij te houden. Het is belangrijk dat zo weinig mogelijk componenten verbrijzeld worden aangezien de component dan opbreekt in verschillende stukjes, waardoor een bepaalde hoeveelheid massa tantaal verloren gaat. Daardoor zal de componentwaarde dalen.

4.3.2.3 *Resultaten en Conclusies*

Na het uitvoeren van deze proef blijkt opnieuw dat de methode ‘selectief afschrappen van componenten’ een goedwerkende demontagemethode is. In Tabel 5 zijn de kwantitatieve resultaten, die werden opgenomen tijdens dit experiment, weergegeven.

De massa's voor elke componentgrootte in deze tabel werden berekend door de gemiddelde componentmassa van elke componentgrootte te vermenigvuldigen met het aantal componenten van dezelfde grootte.

De gemiddelde componentmassa van elke componentgrootte werd berekend door een gemiddelde te nemen van een totale massa van een reeks componenten van dezelfde grootte. In onderstaande tabel (Tabel 4) is deze berekening terug te vinden.

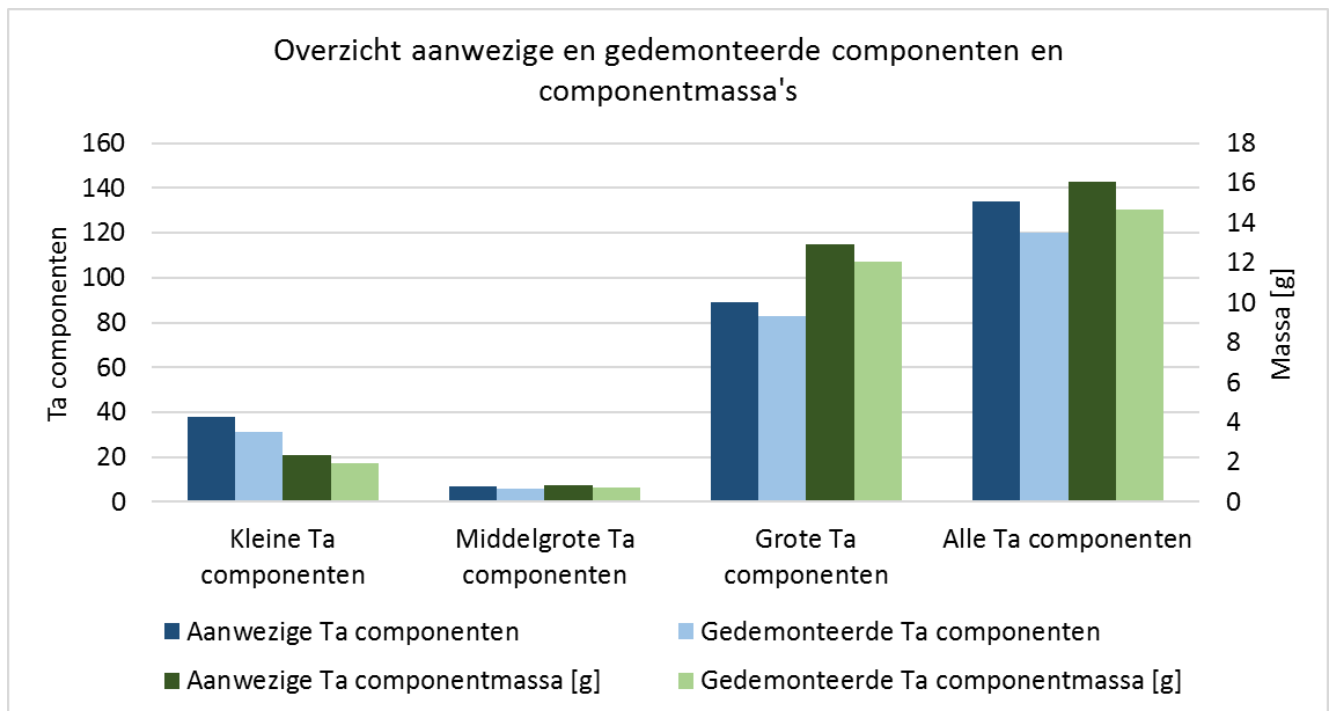
Tabel 4: Massaberekeningen Ta componenten

Massaberekeningen		
type	aantal	massa [g]
Kleine zwarte component	11	0,69
Middelgrote zwarte component	0	0,00
Grote zwarte component	80	10,76
Kleine oranje component	28	1,72
Middelgrote oranje component	5	0,59
Oranje groot	9	2,13
Alle kleine componenten	39	2,41
Alle middelgrote componenten	5	0,59
Alle grote componenten	89	12,89
Gemiddelde kleine componenten		0,062
Gemiddelde middelgrote componenten		0,12
Gemiddelde grote componenten		0,14

Om een goed overzicht te krijgen tussen de aanwezige componenten en massa's en de gedemonteerde componenten en massa's, worden deze grootheden uitgezet in een staafdiagram. Dit staafdiagram is in Figuur 47 terug te vinden.

Tabel 5: Resultaten experiment 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem

Resultaten proef 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem											
Printplaat nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
Aanwezig aantal kleine Ta componenten	0	0	4	4	0	3	0	3	0	24	38
Gedemonteerd aantal kleine Ta componenten	0	0	3	3	0	3	0	3	0	19	31
Demontage efficiëntie kleine Ta componenten [%]	0,00	0,00	75,00	75,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	79,17	81,58
Massa aanwezige kleine Ta componenten [g]	0,00	0,00	0,25	0,25	0,00	0,19	0,00	0,19	0,00	1,48	2,35
Massa gedemonteerde kleine Ta componenten [g]	0,00	0,00	0,19	0,19	0,00	0,19	0,00	0,19	0,00	1,18	1,92
Aanwezig aantal middelgrote Ta componenten	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7
Gedemonteerd aantal middelgrote Ta componenten	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6
Demontage-efficiëntie middelgrote Ta componenten [%]	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	85,71
Massa aanwezige middelgrote Ta componenten [g]	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,83
Massa gedemonteerde middelgrote Ta componenten [g]	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,71
Aanwezig aantal grote Ta componenten	5	1	9	5	7	15	14	14	15	4	89
Gedemonteerd aantal grote Ta componenten	4	1	9	3	6	15	14	14	13	4	83
Demontage-efficiëntie grote Ta componenten [%]	80,00	100,00	100,00	60,00	85,71	100,00	100,00	100,00	86,67	100,00	93,26
Massa aanwezige grote Ta componenten [g]	0,72	0,14	1,30	0,72	1,01	2,17	2,03	2,03	2,17	0,58	12,89
Massa gedemonteerde grote Ta componenten [g]	0,58	0,14	1,30	0,43	0,87	2,17	2,03	2,03	1,88	0,58	12,02
Totaal aantal aanwezige Ta componenten	7	1	13	9	7	18	14	17	15	33	134
Totaal aantal gedemonteerde Ta componenten	5	1	12	6	6	18	14	17	13	28	120
Demontage-efficiëntie alle Ta componenten [%]	71,43	100,00	92,31	66,67	85,71	100,00	100,00	100,00	86,67	84,85	89,55
Totale massa aanwezige Ta componenten [g]	0,96	0,14	1,55	0,97	1,01	2,36	2,03	2,21	2,17	2,65	16,07
Totale massa gedemonteerde Ta componenten [g]	0,70	0,14	1,49	0,62	0,87	2,36	2,03	2,21	1,88	2,35	14,65
Massa demontage-efficiëntie	72,62	100,00	96,01	63,82	85,71	100,00	100,00	100,00	86,67	88,35	91,16
Gemiddeld aantal Ta componenten per printplaat											13
Verwerkigstijd per printplaat [s]	6,25	1,15	28,98	22,61	13,49	44,87	37,64	35,58	34,14	64,67	289,38
Gemiddelde verwerkingstijd per component [s]											28,94
Gemiddelde schraaptijd per component [s/comp]											2,16
Verbrijzelde componenten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gedemonteerde componenten (incl. verbrijzelde)	5	1	12	6	6	18	14	17	13	28	120
Percentage verbrijzelde componenten [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Figuur 47: Overzicht experiment 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem

Op dit staafdiagram staat het aantal aanwezige componenten en de hoeveelheid componentmassa's voor elke componentengroete steeds tegenover het gedemonteerde aantal componenten en componentmassa's van elke componentengroete. Tenslotte werd de totale som van al deze componenten en componentmassa's nog opgenomen in dit staafdiagram.

Hierop is te zien dat de grote tantaalcomponenten in het grootste aantal, met een totaal van 89 componenten, voorkomen op de printplaten. Dit is een positief resultaat aangezien deze componenten het grootste massa-aandeel componentmassa vertegenwoordigen ten opzichte van de andere componentengroetes. Als naar de demontagestaven van de grote tantaalcomponenten wordt gekeken kan ook worden opgemerkt de het grootste deel van de aanwezige componenten wordt gedemonteerd.

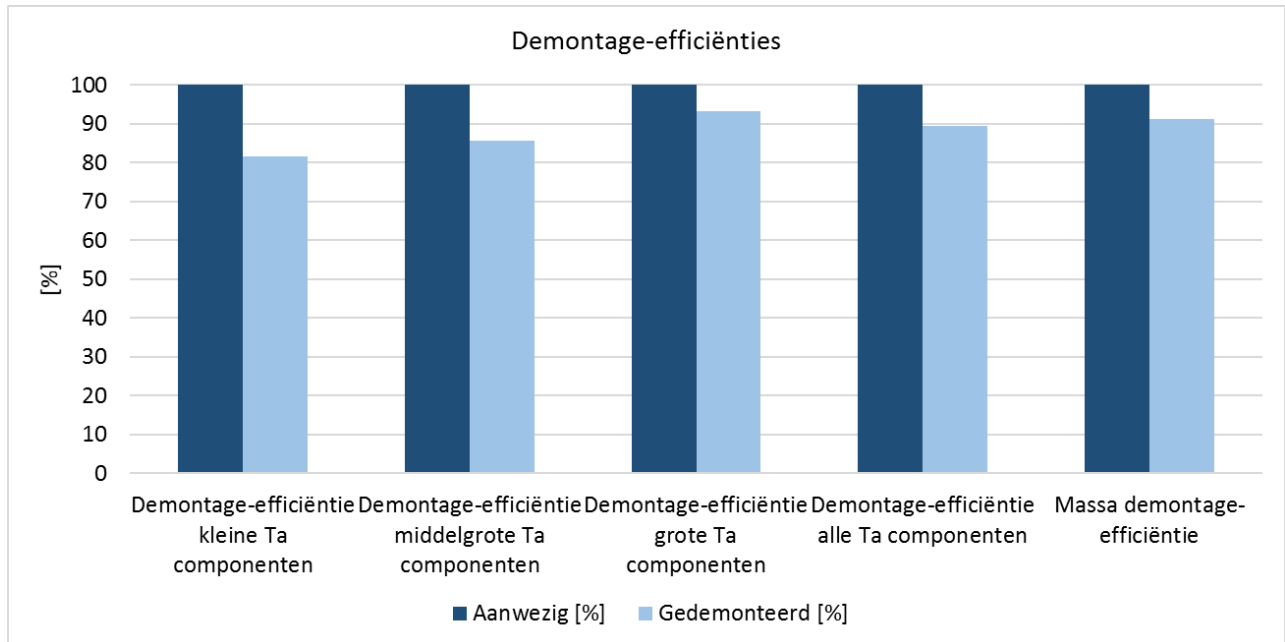
Na de grote tantaalcomponenten volgen de kleine tantaalcomponenten in aantal aanwezige componenten, deze komen met een totaalaantal van 38 componenten voor. Als naar de demontagestaven van de kleine tantaalcomponenten wordt gekeken kan opnieuw worden opgemerkt dat bijna alle kleine tantaalcomponenten worden gedemonteerd.

Tenslotte zijn er ook nog een aantal middelgrote tantaalcomponenten aanwezig op de printplaten, dit totaalaantal bedraagt slechts zeven componenten. Als naar de demontagestaven van de middelgrote componenten wordt gekeken kan weer worden vastgesteld dat bijna alle aanwezige middelgrote componenten worden gedemonteerd. Gezien het lage aantal aanwezige middelgrote componenten is het moeilijk hier iets significant uit de besluiten. Aangezien de aanwezige kleine componenten ook bijna allemaal gedemonteerd worden, kan worden verondersteld dat demonteren van middelgrote componenten met deze demontagemethode niet veel problemen zal opleveren.

Omdat de aanwezige componenten van elke componentengroete in hoge aantallen gedemonteerd kunnen worden, wordt het grootste deel van de aanwezige componenten ook

effectief gedemonteerd. Hierdoor zal ook het grootste deel van de aanwezige componentmassa effectief van de printplaat worden gehaald.

Om de verhoudingen tussen de aanwezige componenten en componentmassa's en de gedemonteerde componenten en componentmassa's van elke componentgrootte beter te kunnen bestuderen werden de demontage-efficiënties berekend en uitgezet in een staafdiagram. Dit staafdiagram is terug te vinden in Figuur 48.



Figuur 48: Demontage-efficiënties, 'selectief afschrapen componenten' met visiesysteem

Uit dit staafdiagram kan worden afgeleid dat de demontage-efficiëntie afneemt als de componentgrootte afneemt. Ondanks deze efficiëntie-afname bedraagt de demontage-efficiëntie voor de kleine componenten nog steeds 81,58 % tegenover 93,26 % voor de grote componenten. Deze efficiëntiedaling zal een kleinere invloed op de totale gedemonteerde massa hebben aangezien de kleine componenten een kleiner aandeel in vertegenwoordigen in totale de componentmassa.

De demontage-efficiëntie, berekend op basis van de componenten bedraagt 89,55 %. De demontage-efficiëntie, berekend op basis van de componentmassa's bedraagt 91,16%. De demontage-efficiëntie, berekend op basis van componentmassa's ligt hoger omdat het demontagerendement van de grote tantaalcomponenten hoger ligt dan de demontage-efficiënties van de andere componentgroottes en deze componenten de grootste massa bezitten.

Op basis van deze resultaten kan worden besloten dat deze demontagemethode hoge demontage-efficiënties kan behalen.

Een probleem dat tijdens dit experiment kon worden waargenomen was dat een aantal componenten niet volledig van de printplaat werden geschraapt, waardoor ze nog met één voet nog aan de printplaat bleven hangen. Dit probleem kan worden verholpen door het schraap pad van de schraper op de printplaat verlengen, zodat de schraper minstens over beide

voeten van de component passeert. Indien deze verbetering wordt aangebracht wordt verondersteld dat de demontage-efficiëntie nog een aantal procent zal toenemen.

Uit Tabel 5 kan verder nog worden afgeleid dat de gemiddelde verwerkingstijd per printplaat ongeveer 29 s bedraagt bij dit experiment. Verder werd ook berekend dat de printplaten uit deze batch gemiddeld gezien 13 componenten per printplaat bezitten. Dit betekend dus dat gemiddeld gezien 2,23 s wordt uitgerekend om een component van de printplaat te schrapen.

Deze schraaptijd kan eventueel nog worden ingekort door gebruik te maken van een printplaatinspanning en schraaparm met een lagere massa. Hierdoor wordt het geheel dynamischer waardoor de printplaat sneller naar de nieuwe coördinaat kan worden verplaatst, en de schraaparm sneller naar onder kan bewegen.

Als deze 29 s wordt vermenigvuldigd met het opgenomen motovermogen kan een schatting worden gemaakt van de verbruikte energie voor één printplaat. Bij deze opstelling werden twee motoren gebruikt, die beide een maximaal vermogen van 750 W kunnen leveren. Aangezien er niet voortdurend geschraapt wordt en dit motorvermogen niet volledig nodig is om de benodigde afschraapkracht te leveren, wordt verondersteld dat beide motoren gemiddeld gezien 50% van dit motorvermogen opnemen. In dat geval bedraagt het totaal opgenomen motorvermogen 750W. Als dit vermogen nu wordt vermenigvuldigd met 29 s, oftewel 0,008 h, wordt een energieverbruik van 6 Wh per printplaat bekomen. Omgerekend bedraagt de verbruikte energie naar schatting dus 0,006 kWh.

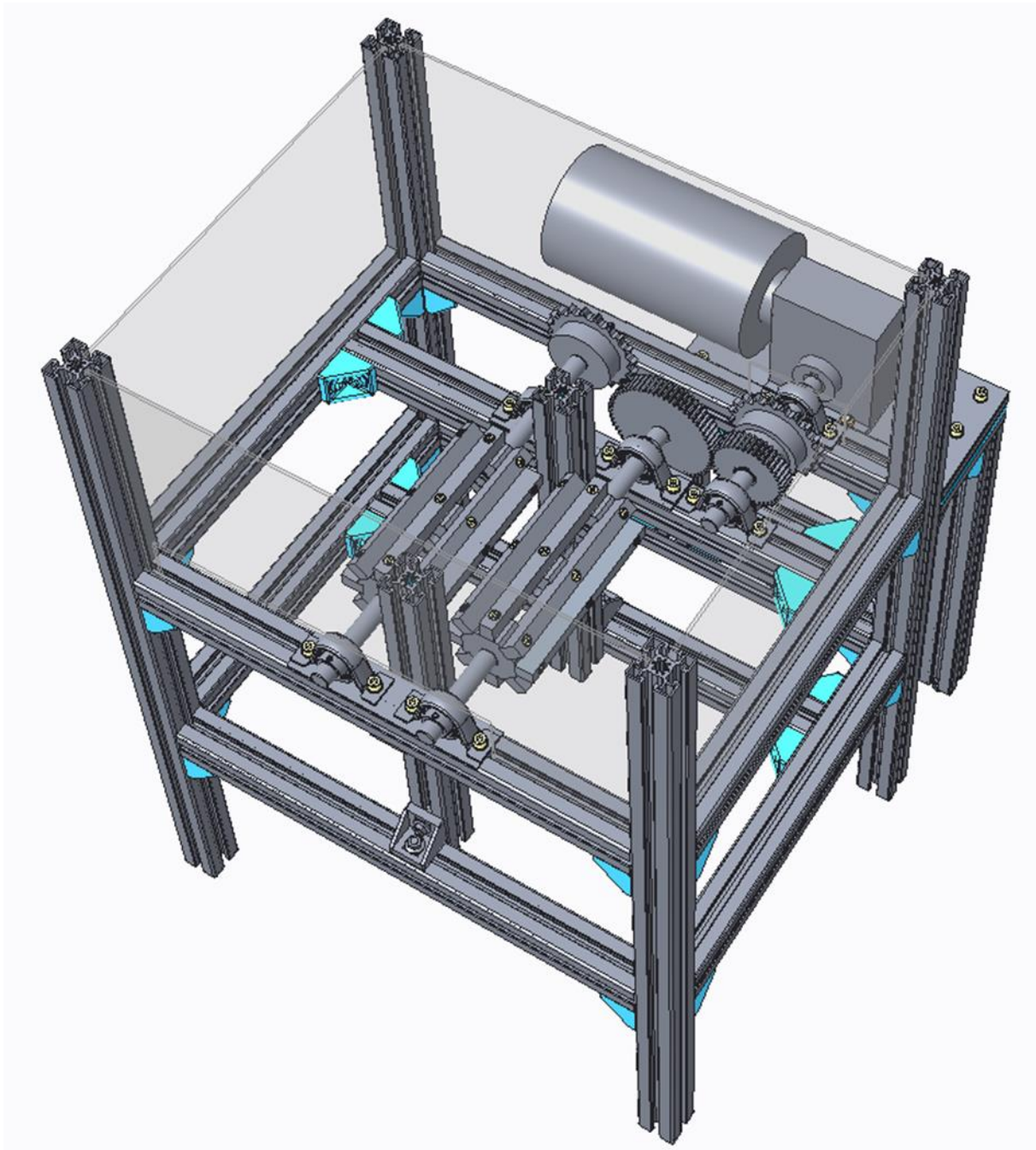
Tenslotte staat in Tabel 5 ook vermeld dat het percentage verbrijzelde componenten nul procent bedraagt. Dit betekent dat de componenten, gedurende dit experiment, steeds als geheel van de printplaat werden gehaald waardoor er geen massa tantaal verloren gaat.

4.4 Proef 4: Afschrapen componenten met shredder

4.4.1 Testen op werking

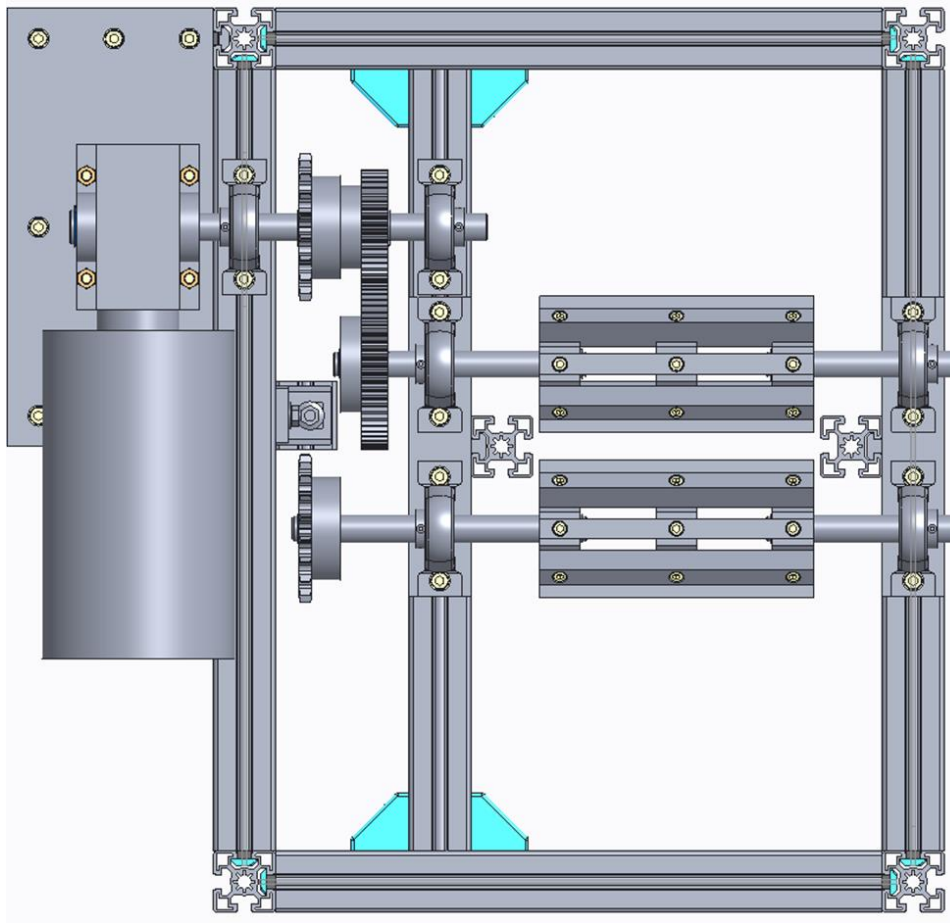
4.4.1.1 Proefopstelling

Voor het testen van de methode ‘afschrapen componenten met shredder’ werd een volledige shredder testmodule uitgewerkt en opgebouwd. Op Figuur 49 is het CAD-model van de shredder weergegeven.



Figuur 49: CAD-model shredder testmodule

Om een beter overzicht te krijgen van de belangrijkste componenten is in Figuur 50 het bovenaanzicht van deze shredder weergegeven.

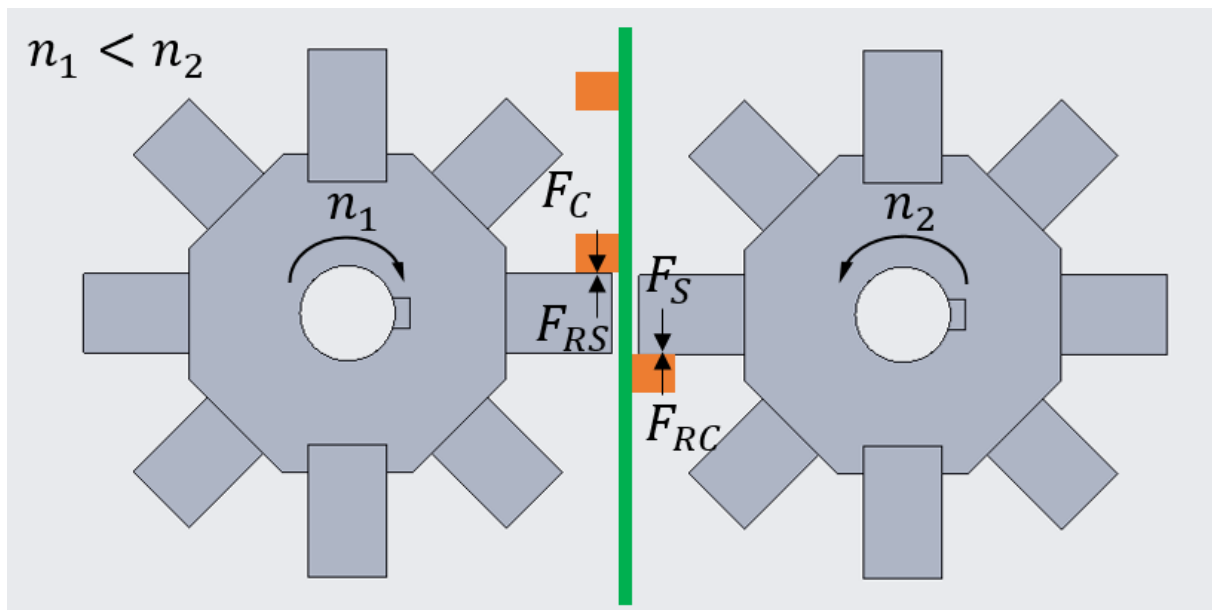


Figuur 50: Boven-aanzicht shredder testmodule

Bij deze shredder worden printplaten via de geleidingen doorheen de shredderwielen getrokken. Vervolgens worden de losse componenten en geschraapte printplaat onderaan opgevangen.

Om de printplaat doorheen de shredder te trekken is het belangrijk dat de shredderwielen in tegengestelde richting draaien, zodat de printplaat naar binnen wordt getrokken. Dit wordt gerealiseerd door gebruik te maken van een tandwiel- en kettingoverbrenging. Het gedreven tandwiel zal daarbij in tegengestelde richting draaien ten opzichte van de motordraairichting, het gedreven kettingwiel daarentegen draait in de draairichting van de motor.

Zoals eerder vermeld wordt getracht de componenten van de printplaat te verwijderen door beide shredderwielen met een verschillende snelheid ten opzichte van elkaar te laten draaien, hierdoor een trekkend effect te creëren, en de componenten zo van de printplaat te trekken. Figuur 51 maakt dit principe zichtbaar.



Figuur 51: Krachtenwerkingen shredderwielen op printplaatcomponenten

Hierin is:

- F_S de kracht die het rechter shredderwiel levert op de component
- F_{RC} de reactiekracht geleverd door de printplaatcomponent
- F_C de kracht geleverd door een component op het linker shredderwiel
- F_{RS} de reactiekracht geleverd door het linker shredderwiel

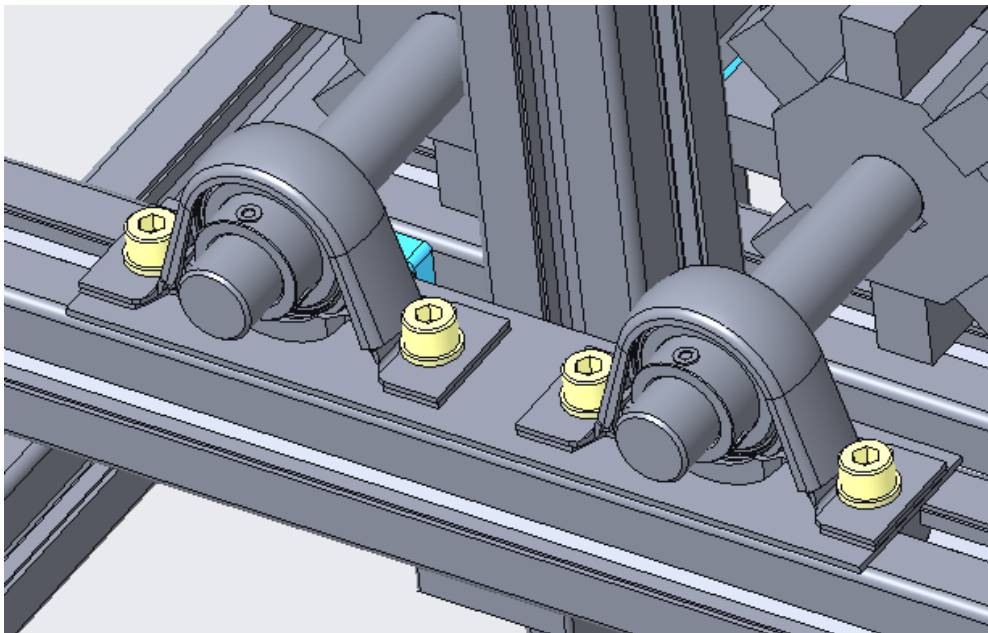
Het rechter shredderwiel draait sneller als het linker shredderwiel. Daardoor ontstaat op het rechter shredderwiel een neerwaartse kracht op de printplaatcomponenten en zal het linker shredderwiel een opwaartse reactiekracht leveren om de printplaatcomponenten tegen te houden.

De verschillende shredderwieltoerentallen worden bij deze proefopstelling gerealiseerd door gebruik te maken van een tandwieloverbrengingsverhouding die verschillend is van één. Voor deze proefopstelling werd een tandwieloverbrengingsverhouding van 1,5 gekozen.

Aangezien printplaten zowel grote als kleine componenten bevatten ontstond het idee om het shredderproces op te delen in verschillende shredderstappen. Bij de eerste stappen worden de shredderwielen op een relatief grote afstand ten opzichte van elkaar geplaatst, hierdoor worden eerst de grote componenten verwijderd. In de daaropvolgende stappen worden de shredderwielen steeds korter en korter tegenover elkaar geplaatst, hierdoor worden uiteindelijk ook kleinere componenten afgeschraapt. In de praktijk kan dit worden gerealiseerd door de verschillende shredderstappen onder elkaar te plaatsen.

Om de proefopstelling eenvoudig en goedkoop te houden werd hierbij één van de twee shredderwielen beweegbaar opgesteld, dit was mogelijk door de kettingoverbrenging te combineren met een kettingspanner. In eerste instantie staan de shredderwielen ver uit elkaar, vervolgens wordt hier dan een printplaat doorgedruwd. Daarna wordt voor de volgende stap het ene shredderwiel dicht bij het andere geplaatst waarna dezelfde printplaat weer door de shredder wordt gedruwd. Om de posities van de shredderwielen te borgen wordt gebruik gemaakt van diverse afstelplaatjes die onder de lagerhuizen worden geplaatst. Hierdoor

kunnen de lagerhuizen niet ten opzichte van elkaar wegschuiven. Figuur 52 maakt dit principe visueel zichtbaar.



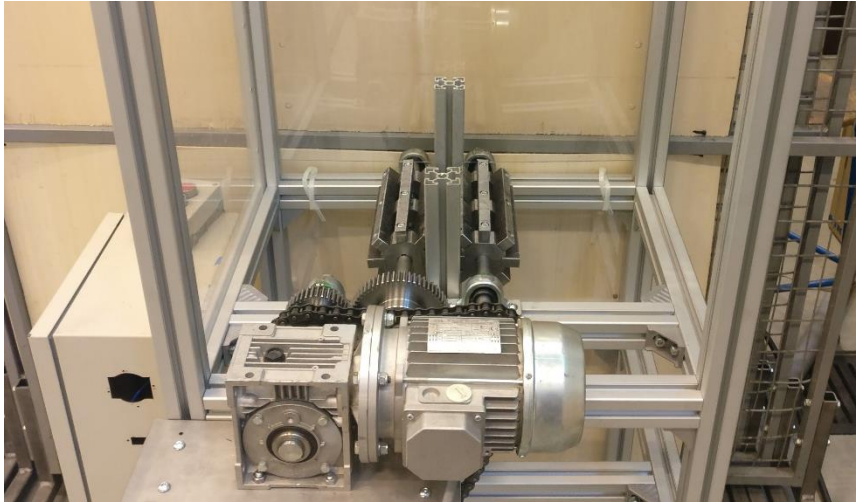
Figuur 52: Afstelplaatjes onder lagerhuizen

In totaal zijn er drie verschillende afstelplaatjes vervaardigd, er kunnen dus drie verschillende shreddersteps worden getest. Bij de eerste shredderstep staan de shredderwielen op 20 mm van elkaar, bij de tweede shredderstep 10 mm en bij de laatste shredderstep 2 mm.

Om de opstelling aan te drijven wordt gebruik gemaakt van een driefase asynchrone motor met een nominaal vermogen van 370W. Op deze motor is een wormwielreductor geplaatst met een overbrengingsverhouding van 1:100, daardoor wordt het motortoerental gereduceerd en neemt het aandrijfkoppel toe. De toename van dit motorkoppel is nodig om een voldoende grote afschraapkracht te ontwikkelen. Aangezien het nominaal motorvermogen, nominaal motortoerental en overbrengingsverhouding van de reductor bekend zijn kan het aandrijftoerental en koppel worden berekend, deze bedragen respectievelijk 13,7 toeren per minuut en 257,9 Nm.

De hele shreddertestmodule werd zowel mechanisch als elektrisch volledig uitgetekend. De 2D-detailtekeningen van het mechanisch gedeelte zijn terug te vinden in bijlage C.

Voor de eenvoud en instelbaarheid werd het frame van de shredder opgebouwd uit Boschrexrothprofielen. De motor wordt op een in hoogte verstelbaar platform geplaatst zodat deze eenvoudig kan worden uitgelijnd. De benodigde onderdelen werden vervaardigd binnen een interne werkplaats. In Figuur 53 is de opgebouwde shreddertestmodule weergegeven.



Figuur 53: Opgebouwde testopstelling shredder

4.4.1.2 Uitvoering proef

Eens de testmodule gerealiseerd werd, kon de methode ‘afschrapen componenten met shredder’ worden getest. Er werd getest op een batch van vijftien printplaten. De printplaten waren afkomstig uit diverse soorten elektronische toestellen zoals desktops en laptops. Er werd voor deze printplaten gekozen omdat deze ook voorkomen binnen het recyclagebedrijf.

Voor elk van deze printplaten werd gekwantificeerd hoeveel tantaalcomponenten er aanwezig waren. Verder werd van elke printplaat ook een foto van de voor en achterzijde gemaakt. Op deze manier kan na het experiment eenvoudig worden gecontroleerd wat de invloed van de shredder op de printplaten is. Op onderstaande afbeelding zijn de printplaten uit de batch zichtbaar (Zie Figuur 54).



Figuur 54: Batch printplaten voor shredder

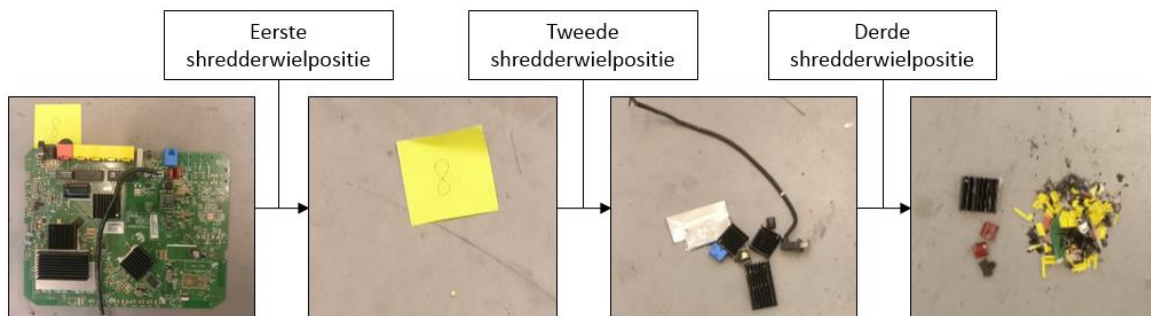
Vervolgens werden deze printplaten stuk voor stuk doorheen de shredder geduwd. In eerste instantie werden de shredderwielen op een afstand twintig millimeter van elkaar geplaatst. Daar werden alle printplaten maximaal vijf keer doorgeduwd. Als bleek dat geen componenten meer loskwamen en de printplaat gewoon door de shredder viel, werd al eerder gestopt met het schredden van de printplaat. Voor elke printplaat die door de shredder werd geduwd, werd geregistreerd hoelang de effectieve shreddertijd was en hoeveel tantaalhoudende componenten er loskwamen. Met de effectieve shreddertijd wordt de tijdsperiode bedoeld tussen het punt waarbij de printplaat de shredderwielen intreedt, tot het punt waarbij de printplaat de shredderwielen volledig uitreedt. Vervolgens werden deze

tijden per shredderwielpositie bij elkaar opgeteld zodat de totale verwerkingstijd van elke printplaat, bij elke shredderwielpositie wordt bekomen.

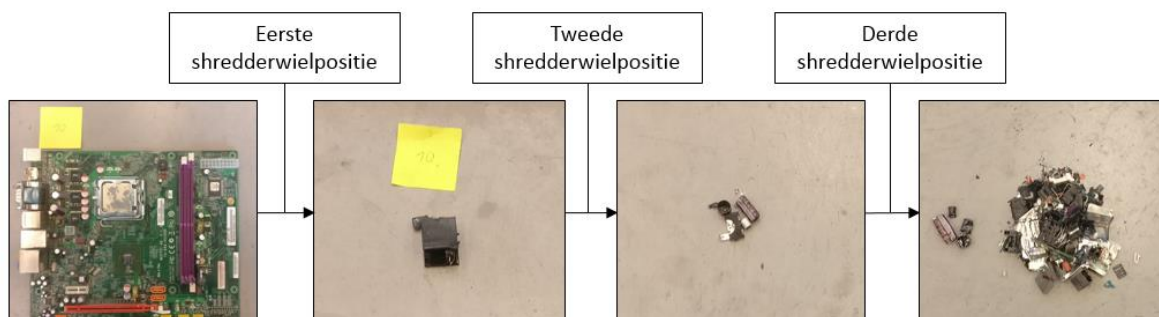
Nadat elke printplaat maximaal vijf keer door de shredder werd geduwd, werden de shredderwielen dichter bij elkaar geplaatst met behulp van de afstelplaatjes. Vervolgens wordt elke printplaat opnieuw maximaal vijf keer door de shredder geduwd. Deze procedure wordt tenslotte nog eens herhaald voor de laatste shredderstep met de kleinste tussenafstand.

4.4.1.3 Resultaten en conclusies

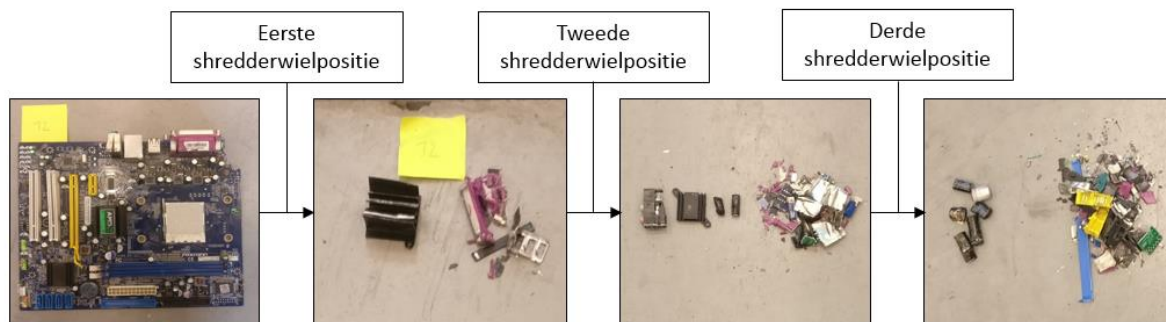
Na het uitvoeren van deze proef kon worden vastgesteld dat de shredder effectief componenten van de printplaat schraapt. In onderstaande afbeeldingen zijn een aantal voorbeelden terug te vinden van componenten die loskwamen bij elke shredderwielpositie. Dit geeft een indicatie naar de hoeveelheid en grootte van de componenten die loskomen na elke shredderwielpositie.



Figuur 55: Eerste voorbeeld componentdemontage, verschillende shredderwielposities



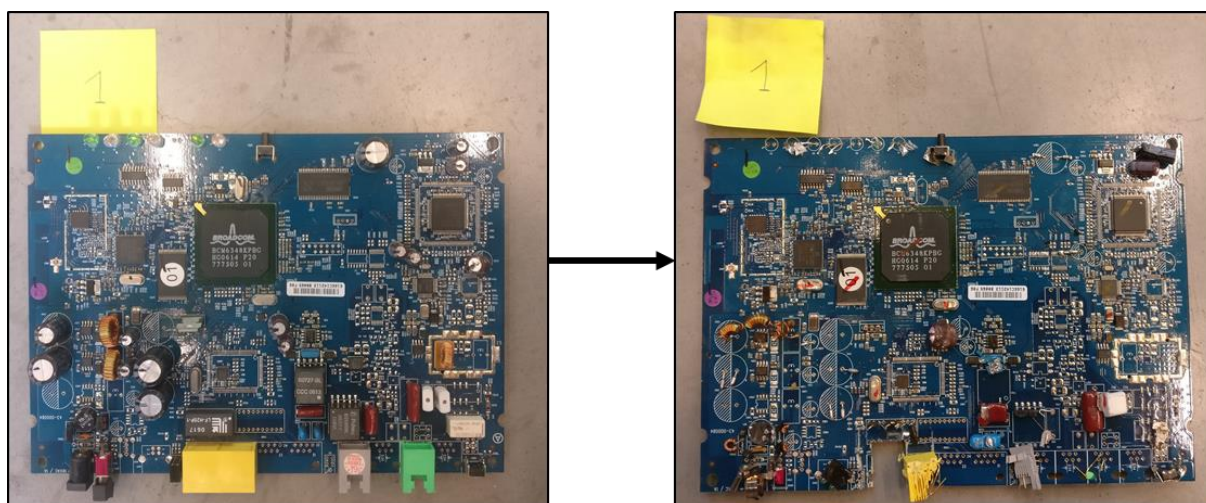
Figuur 56: Tweede voorbeeld componentdemontage, verschillende shredderwielposities



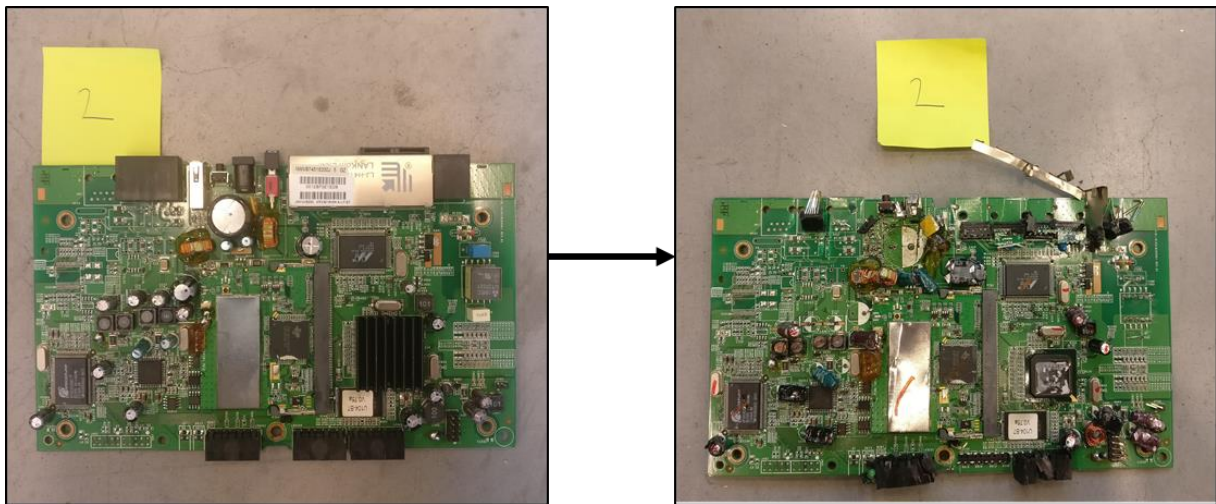
Figuur 57: Derde voorbeeld componentdemontage, verschillende shredderwielposities

Uit bovenstaande afbeeldingen kan worden afgeleid dat in de eerste shredderwielpositie de grote componenten loskomen, in de tweede shredderwielpositie de iets minder grote componenten worden gedemonteerd en in de derde shredderwielpositie de kleine componenten worden verwijderd. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de afstand tussen de shredderwielen bepalend is voor de componentgrootte die gedemonteerd wordt. Dit was ook de opzet voor het instelbaar opstellen van één van de shredderwielen.

Ook de printplaat zelf is nog intact nadat deze de derde shredderwielpositie heeft doorlopen. Op onderstaande afbeeldingen zijn een aantal printplaten terug te vinden waarbij de linkse afbeelding de printplaat voorstelt voordat deze door de shredder werd geduwd, en de rechtse afbeelding de printplaat voorstelt nadat deze de drie shredderwielposities heeft doorlopen.



Figuur 58: Voorbeeld één voor/na shredder



Figuur 59: Voorbeeld twee voor/na shredder

In Tabel 6 zijn de kwantitatieve resultaten die gedurende dit experiment werden geregistreerd terug te vinden. Zo werd bijgehouden voor elke shredderwielpositie hoeveel keer de printplaat effectief door de shredder werd geduwd, wat de effectieve shreddertijd was en hoeveel tantaalcomponenten steeds loskwamen. Op basis van deze gegevens kan worden berekend hoeveel keer de printplaat door de shredder werd geduwd, het totaalaantal gedemonteerde tantaalcomponenten per printplaat en de totale verwerkingstijd per printplaat. Tenslotte kan op basis van de verwerkingstijd per printplaat de gemiddelde shreddertijd per shredderstep worden berekend.

Tabel 6: Resultaten eerste proef 'bulk demonteren met shredder'

Eerste proef 'bulk afschrapen met shredder'																
Printplaat nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
Aanwezig aantal Ta componenten	6	4	5	0	12	3	2	2	1	1	0	0	1	2	23	62
Shredderwielpositie 1 [20 mm]																
Aantal keer door shredder	1	0	0	0	0	2	0	0	0	3	5	5	0	5	3	19
Shreddertijd [s]	3,40	0,00	0,00	0,00	0,00	7,25	0,00	0,00	0,00	9,74	21,64	33,33	0,00	95,95	11,60	86,96
Gedemonteerd aantal Ta componenten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shredderwielpositie 2 [10 mm]																
Aantal keer door shredder	5	5	3	5	5	3	2	5	3	5	5	5	2	5	3	56
Shreddertijd [s]	18,60	16,72	6,61	11,72	19,95	11,51	6,19	17,42	9,49	25,58	28,35	31,39	2,81	29,01	8,58	214,92
Gedemonteerd aantal Ta componenten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shredderwielpositie 3 [2 mm]																
Aantal keer door shredder	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	70
Shreddertijd [s]	22,23	27,20	16,84	19,09	24,89	20,11	19,87	22,97	17,43	34,77	34,75	31,26	22,92	28,53	26,10	340,43
Gedemonteerd aantal Ta componenten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totaal aantal keer door shredder	11	10	8	10	10	10	7	10	8	13	15	15	7	15	11	145
Totale verwerkingstijd [s]	44,23	43,92	23,45	30,81	44,84	38,87	26,06	40,39	26,92	70,09	84,74	95,98	25,73	153,49	46,28	642,31
Gemiddelde shreddertijd per shredderstap [s]	4,02	4,39	2,93	3,08	4,48	3,89	3,72	4,04	3,37	5,39	5,65	6,40	3,68	10,23	4,21	59,25
Algemeen gemiddelde [s]	4,23															
Totaal aantal gedemonteerde Ta componenten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Uit deze tabel kan worden afgeleid dat in totaal geen enkele tantaalcomponent werd gedemonteerd. Dit is niet acceptabel aangezien er expliciet gevraagd wordt naar dit soort componenten. Als de grootte van gedemonteerde componenten wordt vergeleken met de grootte van de tantaalcomponenten, kan worden vastgesteld dat de tantaalcomponenten over het algemeen nog kleiner zijn dan de reeds gedemonteerde componenten. Eerder in deze paragraaf werd vermeld dat de gedemonteerde componentgrootte afhankelijk is van de afstand tussen de twee shredderwielen. Voor het demonteren van de tantaalcomponenten moeten de shredderwielen nog dichter tegenover elkaar worden geplaatst. Aangezien de ruimte tussen de shredderwielen bij de derde shredderwielpositie al zeer nauw is, dient dit zeer nauwkeurig te gebeuren. Hoe deze nauwe afstelling kan worden aangepakt en nieuwe testresultaten worden in volgende paragraaf besproken.

Verder kan uit deze tabel worden afgeleid dat de gemiddelde verwerkingstijd van één printplaat die één keer door de shredder wordt geduwd ongeveer 4 s bedraagt. Als wordt verondersteld dat alle printplaten voor elke shredderwielpositie vijf keer door de shredder wordt geduwd, zou de totale verwerkingstijd gemiddeld gezien ongeveer 60 s bedragen. Het is moeilijk om iets over deze tijd te zeggen aangezien het hier om een testopstelling gaat. Voor een industriële installatie wordt verondersteld dat een groter motorvermogen wordt gebruikt waardoor wordt aangenomen dat deze tijd nog sterkt gereduceerd kan worden. De rode aangeduide tijden werden hierbij niet meegerekend, aangezien tijdens experiment iets fout ging met deze printplaat. Daardoor werd de verwerkingstijd te hoog en dus niet relevant.

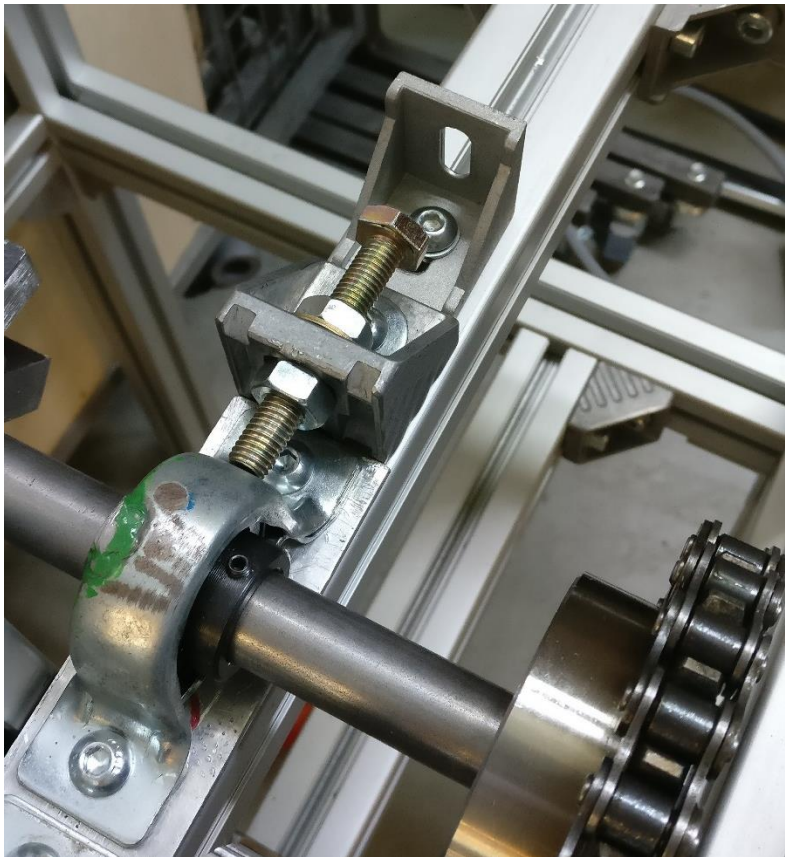
Als deze 60 s wordt vermenigvuldigd met het opgenomen motovermogen kan een schatting worden gemaakt van de verbruikte energie voor één printplaat. Aangezien het opgenomen motorvermogen 370W bedraagt en 60 s gelijk is aan 0,017 h, bedraagt de verbruikte energie voor één printplaat 6,2 Wh, oftewel 0,0062 kWh.

4.4.2 Tweede test 'Bulk demonteren met shredder'

Aangezien de tantaalcomponenten niet van de printplaten werden geschraapt bij de eerste versie van de proefopstelling, werd beslist een aanpassing te doen aan de proefopstelling en het experiment opnieuw uit te voeren.

4.4.2.1 *Aanpassingen proefopstelling*

Uit de resultaten van de proef uit vorige paragraaf werd aangenomen dat de tantaalcomponenten op de printplaat bleven zitten omdat de afmetingen van de tantaalcomponenten nog te klein waren om gedemonteerd te worden met de derde shredderwielpositie. Hierdoor moeten de shredderwielen nog korter bij elkaar worden geplaatst. Aangezien de shredderwielen bij de derde shredderwielpositie al zeer kort bij elkaar staan, moet deze afstelling nauwkeurig kunnen gebeuren omdat de shredderwielen elkaar nooit mogen raken als ze draaien. Om deze nauwkeurige afstelling mogelijk te maken werden stelschroeven aangebracht op het frame om het lagerhuis, waarin de beweegbare shredderwielas steunt, naar het andere shredderwiel te duwen. Op deze manier kunnen de shredderwielen nauwkeurig op een zeer kleine afstand ten opzichte van elkaar worden ingesteld. Op Figuur 60 is de aanpassing aan de opstelling visueel weergegeven.



Figuur 60: Stelschroef lagerhuis shredder

4.4.2.2 *Uitvoering experiment*

Vervolgens werd de proef uit paragraaf 4.4.1 herhaald voor een batch van zes printplaten. De tantaalcomponenten op de printplaten worden opnieuw geteld, het enige verschil is nu dat er nog een onderscheid werd gemaakt tussen de verschillende componentgroottes, namelijk: klein, middelgroot en groot. De kleine componenten zijn ongeveer één millimeter breed en twee millimeter lang, de middelgrote componenten zijn ongeveer drie millimeter breed en vier millimeter lang en de grote componenten zijn ongeveer vier millimeter breed en acht millimeter lang [3].

Na elke shredderstep worden de gedemonteerde tantaalcomponenten per componentgrootte geregistreerd.

Verder wordt ook het totaal aantal shredderstappen per printplaat bijgehouden. Het verschil met vorige proef is dat de printplaat bij dit experiment een willekeurig aantal keer door de shredder wordt geduwd. De printplaat zal net zoveel keer door de shredder worden geduwd tot er geen componenten meer van de printplaat komen.

Tenslotte wordt nu ook het aantal verbrijzelde componenten per printplaat bijgehouden. Het is belangrijk dat het aantal verbrijzelde componenten minimaal is. Dit is omdat als een component verbrijzeld wordt deze in stukjes worden gebroken, hierdoor zal steeds een bepaalde hoeveelheid massa tantaal verloren gaan.

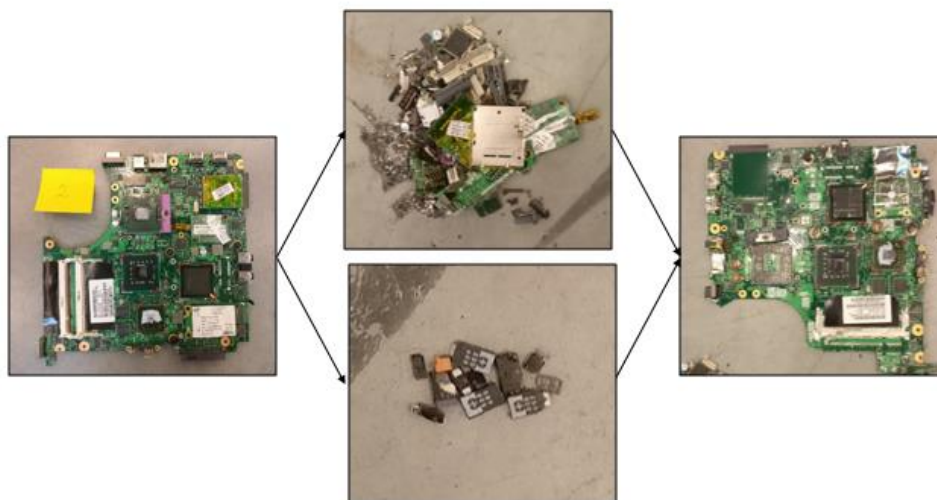
Een tweede reden om het aantal verbrijzelde componenten zo laag mogelijk te houden is om de sorteermogelijkheden, na het demonteren van alle componenten, zo breed mogelijk te

houden. Aangezien deze demontagemethode alle componenten gelijktijdig van de printplaat demonteert is het noodzakelijk de gewenste componenten uit de massastroom componenten te filteren. Potentiële sorteermethoden kunnen zich baseren op computervisie. Als de componenten onherkenbaar verbrijzeld worden, wordt het moeilijk voor een visiesysteem deze componenten te herkennen, waardoor deze sorteertechnieken op voorhand al uitgesloten worden.

Om de proef vlot te laten verlopen werden grote componenten, zoals koelvinnen en grote koppelingen, handmatig van de zes printplaten verwijderd. Op deze manier moesten niet alle shredderstappen worden doorlopen en konden de printplaten onmiddellijk door de nieuwe shredderwielpositie worden geduwd.

4.4.2.3 Resultaten en conclusies

Na het uitvoeren van dit experiment kan worden besloten dat als de shredderwielen dicht genoeg bij elkaar staan de tantaalcomponenten weldegelijk van de printplaat worden geschraapt. Figuur 61 geeft het resultaat van één printplaat weer die een aantal keer door de shredder werd geduwd.



Figuur 61: Resultaat aanpassing shredderwiel positie

Daarop is te zien dat de tantaalcomponenten als geheel van de printplaat worden gehaald. Nadat meerdere printplaten door de shredder werden geduwd kon echter ook worden vastgesteld dat een deel van de componenten verbrijzeld werden.

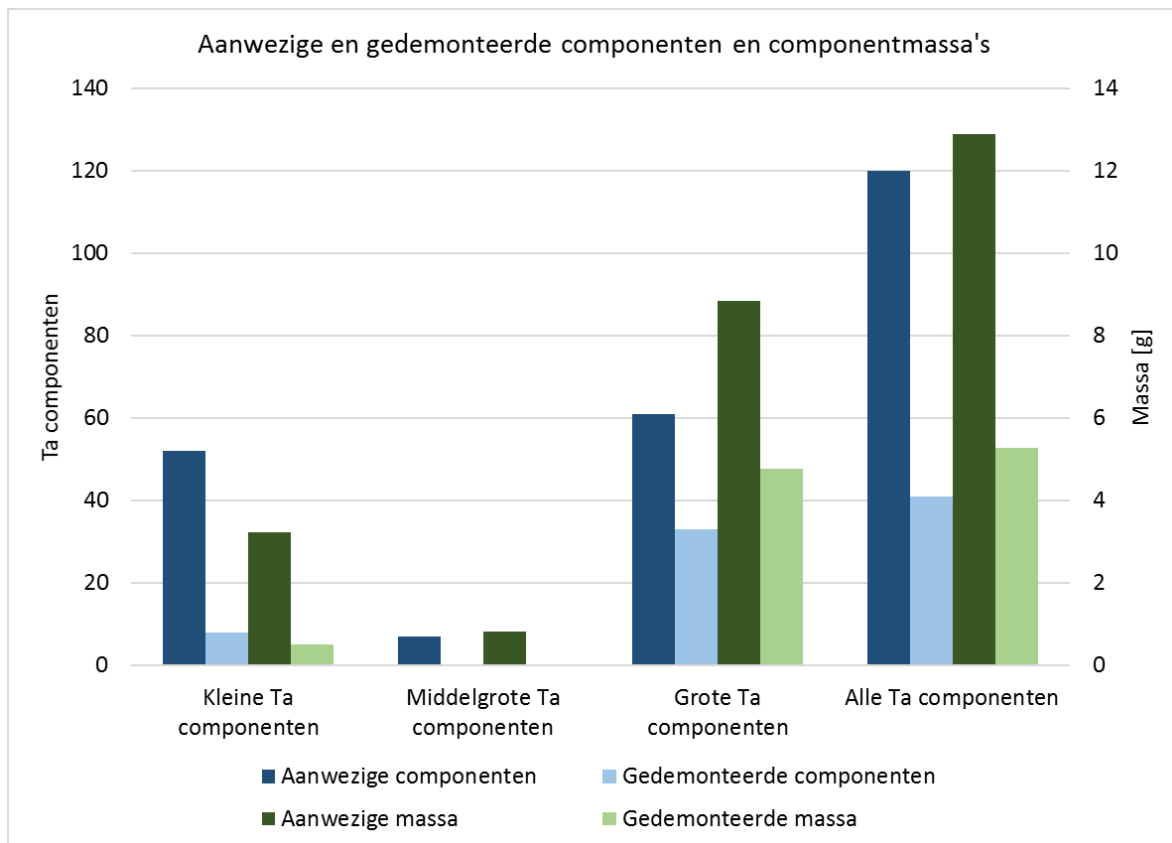
Tabel 7 toont de kwantitatieve resultaten die werden geregistreerd gedurende dit experiment.

Tabel 7: Resultaten tweede proef 'afschrapen componenten met shredder'

tweede proef 'bulk afschrapen met shredder'							
Printplaat nr.	1	2	3	4	5	6	Σ
Aantal keer door shredder	8	9	7	6	9	6	45
Aanwezig aantal kleine Ta componenten	20	12	0	0	0	20	52
Gedemonteerd aantal kleine Ta componenten	1	5	0	0	0	2	8
Demontage-efficiëntie kleine Ta componenten [%]	5,00	41,67	0,00	0,00	0,00	10,00	15,38
Massa aanwezige kleine Ta componenten [g]	1,24	0,74	0,00	0,00	0,00	1,24	3,22
Massa gedemonteerde kleine Ta componenten [g]	0,06	0,31	0,00	0,00	0,00	0,12	0,49
Aanwezig aantal middelgrote Ta componenten	0	0	5	2	0	0	7
Gedemonteerd aantal middelgrote Ta componenten	0	0	0	0	0	0	0
Demontage-efficiëntie middelgrote Ta componenten [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Massa aanwezige middelgrote Ta componenten [g]	0,00	0,00	0,59	0,24	0,00	0,00	0,83
Massa gedemonteerde middelgrote Ta componenten [g]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aanwezig aantal grote Ta componenten	7	6	11	7	22	8	61
Gedemonteerd aantal grote Ta componenten	4	4	9	3	8	5	33
Demontage-efficiëntie grote Ta componenten [%]	57,14	66,67	81,82	42,86	36,36	62,5	54,10
Massa aanwezige grote Ta componenten [g]	1,01	0,87	1,59	1,01	3,19	1,16	8,84
Massa gedemonteerde grote Ta componenten [g]	0,58	0,58	1,30	0,43	1,16	0,72	4,78
Totaal aantal aanwezige Ta componenten	27	18	16	9	22	28	120
Totaal aantal gedemonteerde Ta componenten	5	9	9	3	8	7	41
Demontage-efficiëntie alle Ta componenten [%]	18,519	50	56,25	33,333	36,364	25	34,17
Massa aanwezige Ta componenten [g]	2,25	1,61	2,18	1,25	3,19	2,40	12,88
Massa gedemonteerde Ta componenten [g]	0,64	0,89	1,30	0,43	1,16	0,85	5,28
Massa demontage-efficiëntie [%]	28,489	55,152	59,686	34,756	36,364	35,395	40,96
Verbrijzelde componenten	1	3	2	0	1	3	10
Gedemonteerde componenten (incl. verbrijzelde)	6	12	11	3	9	10	51
percentage verbrijzelde componenten [%]	16,67	25,00	18,18	0,00	11,11	30,00	19,61

Voor elke printplaat werden ook de aanwezige en gedemonteerde totaalcomponentmassa's bepaald.

Om een visueel overzicht te kunnen krijgen tussen de aanwezige en gedemonteerde componenten en componentmassa en de gedemonteerde componenten en componentmassa's, worden deze resultaten uitgezet in een staafdiagram. Dit staafdiagram is in Figuur 62 terug te vinden.



Figuur 62: Overzicht aanwezige en gedemonteerde componenten en componentmassa's

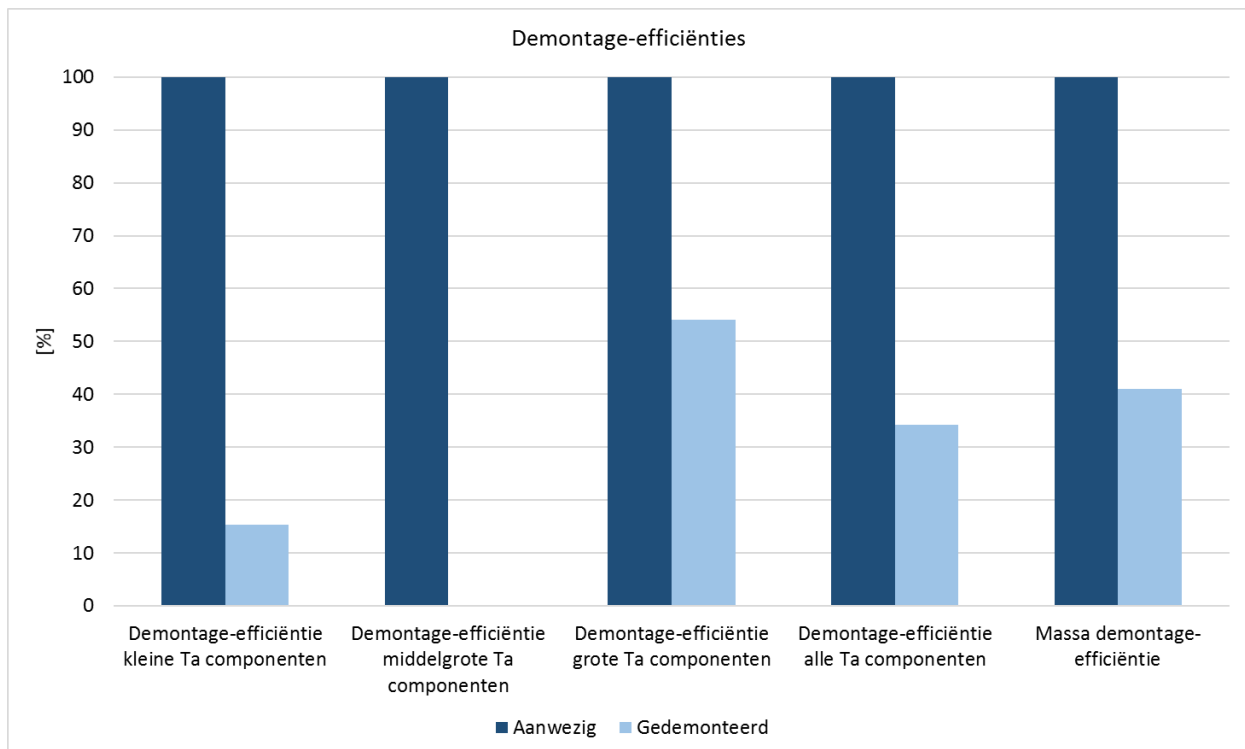
Op dit staafdiagram staat het aantal aanwezige componenten en hoeveelheid componentmassa's voor elke componentengroete steeds tegenover het gedemonteerde aantal componenten en componentmassa's van elke componentengroete. Tenslotte werd de totale som van al deze componenten en componentmassa's nog opgenomen in dit staafdiagram.

Er kan worden vastgesteld dat de grote tantaalcomponenten het meest voorkomen met een totaal aantal van 61. Dit is een positief resultaat aangezien de grote componenten de grootste hoeveelheid massa vertegenwoordigen ten opzichte van de andere componentengroetes. Als naar de demontagebalken van de grote tantaalcomponenten wordt gekeken, kan worden vastgesteld dat slechts 33 van deze 61 componenten gedemonteerd werden. Daardoor zal een grote hoeveelheid massa tantaalcomponenten op de printplaten blijven zitten.

Op de tweede plaats komen de kleine componenten in de grootste aantallen voor met een totaal van 52 componenten. Als naar de demontagebalken van de kleine tantaalcomponenten wordt gekeken, kan worden vastgesteld dat slechts acht kleine tantaalcomponenten van de 52 worden gemonteerd.

Tenslotte zijn er nog een aantal middelgrote componenten, hiervan zijn er in totaal slechts zeven aanwezig. Deze komen maar in kleine aantallen voor op de printplaten. Van deze componentengroete werd zelfs geen enkele component gedemonteerd. Gezien de lage aanwezigheid van de middelgrote componenten is het moeilijk hier iets over te besluiten. Omdat de andere componentengroetes ook maar in kleine mate worden gedemonteerd, kan worden aangenomen dat de middelgrote componenten ook maar in kleine mate gedemonteerd zullen worden.

Om een duidelijker beeld te krijgen tussen de verhoudingen van de gedemonteerde componenten en componentmassa's en de aanwezige componenten en componentmassa's werden de demontage-efficiënties berekend en uitgezet in een staafdiagram. Dit staafdiagram is terug te vinden in Figuur 63.



Figuur 63: Demontage-efficiëntie bij 'Bulk afschrapen met shredder'

Daarop is te zien dat de demontage-efficiëntie van de kleine tantaalcomponenten 15,38% bedraagt en de demontage-efficiëntie van de grote tantaalcomponenten 54,1%. De demontage-efficiëntie van de grote tantaalcomponenten ligt dus drie keer hoger dan deze van de kleine tantaalcomponenten. Hieruit kan worden afgeleid dat naarmate de componenten kleiner worden, het systeem steeds meer moeite heeft om de componenten te demonteren.

De demontage-efficiëntie van de middelgrote componenten bedraagt nul procent, hierover kan echter niets significant worden besloten aangezien in totaal slechts zeven middelgrote componenten aanwezig waren, verdeeld op alle printplaten uit de batch.

De totale demontage-efficiëntie, berekend op basis van alle componenten, bedraagt 34,17%, de demontage-efficiëntie, berekend op basis van de componentmassa's, bedraagt 43,06%. De demontage-efficiëntie, berekend op basis van componentmassa's, ligt hoger dan de demontage-efficiënties die werden berekend op basis van componenten. Dit is te verklaren doordat de grote componenten in de grootste aantallen worden gedemonteerd en deze de grootste massa bezitten.

Het is belangrijk dat de demontage-efficiëntie, berekend op basis van componentmassa's, het hoogst is, aangezien daarmee de opbrengsten worden berekend. De demontage-efficiëntie van 43,06% is echter veel te laag, hierdoor zal een te grote massa tantaal verloren gaan.

Uit deze resultaten kan worden besloten dat de demontage-efficiënties voor de huidige opstelling veel te laag liggen. Daardoor moeten aanpassingen aan de testmodule gebeuren en moeten opnieuw testen worden uitgevoerd.

In eerste instantie moeten de shredderwielen nog korter bij elkaar worden geplaatst. Daardoor kunnen de kleinere componenten ook worden geraakt door de shredderbladen, waardoor ze van de printplaat worden geschraapt. Een tweede mogelijke optimalisatie is gebruik maken van meer, dünnere schraapplaten op de shredderwielen. Daardoor komen de shredderwielen meer in contact met de printplaten, waardoor meer componenten geschraapt kunnen worden. Tenslotte kan het toerentalverschil tussen de shredderwielen nog worden vergroot, indien deze optimalisatie wordt toegepast passeren de schraapbladen meerdere keren over dezelfde positie op de printplaat. Daardoor is de kans groter dat meerdere componenten, op een bepaalde plaats van de printplaat, worden afgeschraapt.

Tenslotte wordt in Tabel 7 ook het percentage verbrijzelde componenten ten opzichte van het totaal aantal gedemonteerde componenten weergegeven, deze bedraagt ongeveer 20 %. De componenten worden verbrijzeld doordat ze tussen de shredderwielen komen te zitten, in plaats van dat ze worden afgeschraapt. Daardoor zal een bepaalde hoeveelheid massa tantaal per component verloren gaan. Verder zal 20 % van de componenten ook moeilijk herkenbaar worden voor een computervisiesysteem, als deze technologie gebruikt wordt voor een sorteerstap na demontage.

Om het percentage verbrijzelde componenten te verlagen kunnen ook nog een aantal optimalisaties worden gedaan aan de shreddertestopstelling. Een mogelijke optimalisatie zou het gebruik van parallellepipedumvormige schraapbladen, ten opzichte van de huidige balkvormige schraapbladen zijn. Daardoor zal het oppervlaktecontact tussen de schraapbladen en de printplaat verminderen, waardoor de kans afneemt dat een component tussen de schraapbladen gekneld raakt.

4.5 Besluit proeven

Op basis van de resultaten uit deze proeven kan worden besloten dat drie van de vier demontagemethoden effectief werken, dit zijn ‘smelten soldeerverbinding’, ‘selectief afschrapen componenten’ en ‘afschrapen van componenten met shredder’.

Aangezien de demontagemethode ‘smelten soldeerverbinding’ rookgassen uitstoot, die een enorme reukhinder veroorzaakte, en er nog twee andere werkende demontagetechnieken zijn, werd beslist deze niet verder te onderzoeken. Daardoor blijven enkel de demontagetechnieken ‘selectief afschrapen componenten’ en ‘bulk afschrapen componenten’ over. In het volgende hoofdstuk worden de geregistreerde parameters van deze twee werkende systemen langs elkaar gelegd, zodat ze vergeleken kunnen worden

5 Vergelijking werkende systemen

Onder werkende systemen wordt ‘selectief afschrapen componenten’ en ‘bulk afschrapen met shredder’ bedoeld. Smelten van tin is ook een effectieve demontage methode. Aangezien bij deze demontagemethode rookgassen vrijkwamen, die een sterke reukhinder veroorzaakte, werd besloten om geen verdere testen te doen op dit systeem. Daardoor wordt deze demontagemethode dan ook niet opgenomen in dit hoofdstuk.

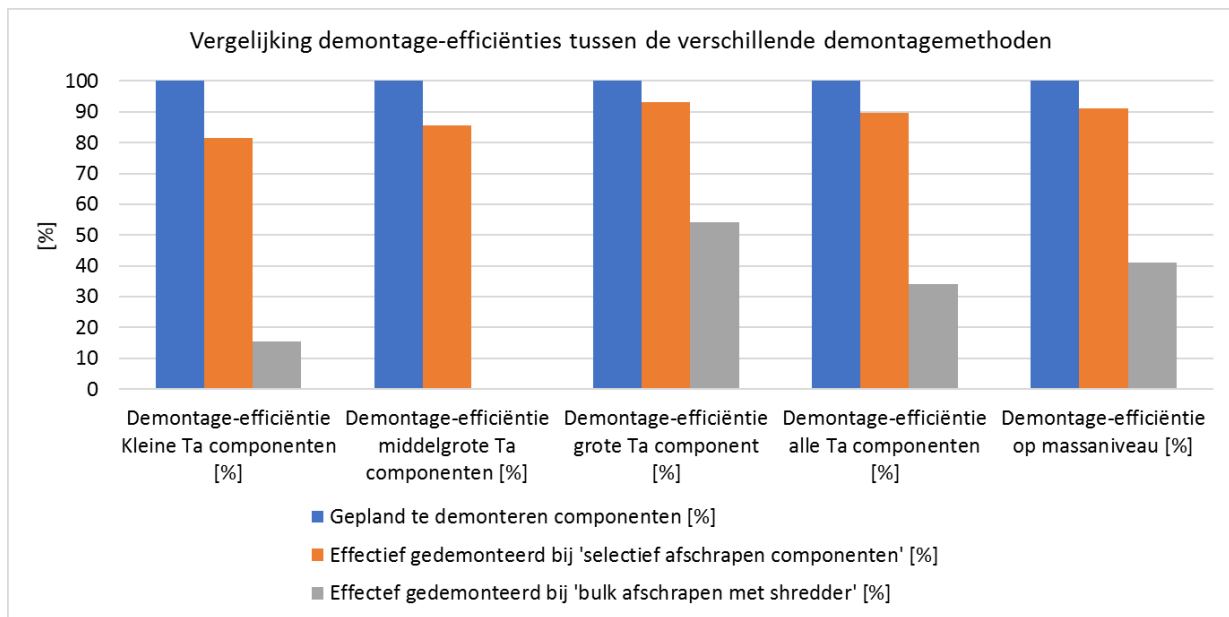
5.1 Demontage-efficiëntie

Voor zowel selectief afschrapen van componenten als bulkdemonteren met shredder werd het aantal aanwezige en gedemonteerde componenten bijgehouden. Voor deze componenten werd een onderscheid gemaakt van kleine, middelgrote en grote componenten. Van deze aanwezige en gedemonteerde componenten werden ook de componentmassa's berekend. Op basis van deze gegevens kunnen dan de verschillende demontage-efficiënties worden berekend. Alle demontage-efficiënties voor de twee systemen zijn terug te vinden in Tabel 8.

Tabel 8: Vergelijkende tabel demontage-efficiënties

Demontage-efficiëntie	Selectief afschrapen componenten	Bulk afschrapen met shredder
Demontage-efficiëntie Kleine Ta componenten [%]	81,58	15,38
Demontage-efficiëntie middelgrote Ta componenten [%]	85,71	0,00
Demontage-efficiëntie grote Ta component [%]	93,26	54,10
Demontage-efficiëntie alle Ta componenten [%]	89,55	34,17
Demontage-efficiëntie op massaniveau [%]	91,16	40,96

Om deze resultaten makkelijker ten opzichte van elkaar te kunnen afwegen worden ze in een staafdiagram geplaatst, zoals terug te vinden in Figuur 64.



Figuur 64: Staafdiagram vergelijking demontage-efficiënties

Daaruit kan worden afgeleid dat de demontage-efficiëntie van ‘selectief afschrapen componenten’ voor alle categorieën hoger ligt dan bij ‘bulk afschrapen componenten met shredder’.

Als de optimalisaties, die vermeld werden in paragraaf 4.3.2.3 en 4.4.2.3, worden toegepast, wordt verondersteld dat de demontage-efficiënties van beide demontagemethoden nog kunnen toenemen. Om te controleren in welke mate deze toenemen moeten opnieuw testen worden uitgevoerd nadat de optimalisaties worden aangebracht.

Er wordt verwacht dat de demontage-efficiëntie van ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ nog steeds een stuk lager zal liggen dan deze van ‘selectief afschrapen van componenten’. Dit is omdat bij ‘selectief afschrapen van componenten’ de componenten gecontroleerd worden gedemonteerd, daardoor is de kans groter dat de gewenste component effectief wordt gedemonteerd. Bij de demontagemethode ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ worden de componenten willekeurig afgeschraapt. Daardoor is het mogelijk dat een aantal gewenste componenten tussen twee opeenvolgende shredderbladen komen te zitten en dus niet worden afgeschraapt.

Op basis van de parameter ‘demontage-efficiëntie’ wordt aangeraden de demontagemethode ‘selectief afschrapen van componenten’ verder te onderzoeken aangezien deze methode de hoogste demontage-efficiënties behaalt.

5.2 Verwerkingstijden

Bij het uitvoeren van de proeven werd van elke proefopstelling ook de gemiddelde verwerkingstijd per printplaat bijgehouden.

In Tabel 9 kan de gemiddelde printplaatverwerkingstijd voor zowel het ‘selectief afschrapen van de componenten’ als voor het ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ worden teruggevonden.

Tabel 9: Vergelijkende tabel gemiddelde verwerkingstijden per printplaat

	Selectief afschrapen componenten	Bulk afschrapen met shredder
Gemiddelde verwerkingstijd [s]	29	60

In Tabel 9 kan worden gezien dat de methode ‘bulk afschrapen met shredder’ gemiddeld gezien meer dan dubbel zolang duurt als de methode ‘selectief afschrapen componenten’. Aangezien deze resultaten volgen uit proefopstellingen is het minder relevant deze te vergelijken. Bij industriële installaties kan voor de methode ‘bulk demonteren met shredder’ gebruik worden gemaakt grotere motorvermogens, waardoor verwacht wordt dat de verwerkingstijden sterk kunnen worden ingekort.

Ook de gemiddelde verwerkingstijd van de methode ‘selectief afschrapen componenten’ kan worden gereduceerd door een aantal aanpassingen, die vermeld werden in paragraaf 4.3.2.3, aan te brengen aan de opstelling.

Op basis van ‘verwerkingstijden’ kunnen nog geen conclusies worden getrokken voor de keuze van een bepaalde demontagemethode, aangezien deze nog sterk kunnen variëren als er aanpassingen aan de systemen worden gedaan. Daarvoor moeten deze aanpassingen eerst worden aangebracht en getest.

5.3 Energieverbruik

Als de gemiddelde verwerkingstijd per printplaat en het opgenomen motorvermogen van een proefopstelling bekend is, kan hieruit de energie worden berekend. Dit werd zowel voor de testopstelling van ‘selectief afschrapen componenten’ als voor de testopstelling voor ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ berekend. Het energieverbruik voor het verwerken van één printplaat is in onderstaande tabel terug te vinden.

Tabel 10: Vergelijkende tabel gemiddeld energieverbruik per printplaat

	Selectief afschrapen componenten	Bulk afschrapen met shredder
Energieverbruik per printplaat [kWh]	0,0060	0,0062

Uit deze tabel kan worden afgeleid dat beide installaties, per printplaat, ongeveer evenveel energie opnemen. Aangezien het hier om proefopstellingen gaat, is deze vergelijking minder relevant. Bij een industriële installatie wordt verwacht dat voor de methode ‘bulk demonteren met shredder’ een motor met groter vermogen zal worden gekozen om de verwerkingstijd per

printplaat te reduceren. Indien dit het geval is, zal de energieprijis voor de methode ‘bulk demonteren met shredder’ toenemen.

Om op basis van energieverbruik een keuze te kunnen maken naar het meest geschikte demontagesysteem, moet eerst worden getest hoeveel bijkomende printplaten, en met welke demontage-efficiëntie, kunnen worden verwerkt met de methode ‘bulk demonteren met shredder’ als het motorvermogen hiervan toeneemt. Als in verhouding een grotere massa componenten per energie-eenheid wordt gedemonteerd in vergelijking met de methode ‘selectief afschrapen componenten’ kan op energievlak best worden gekozen voor de methode ‘bulk afschrapen met shredder’.

5.4 Componentbeschadiging

Om het aantal mogelijke sorteertechnieken zo breed mogelijk te houden is het ook belangrijk dat de componenten niet onherkenbaar verbrijzeld worden. Als een sorteertechniek wordt gekozen waarbij gebruik wordt gemaakt van computervisie, kan het moeilijk worden voor het visiesysteem om de gewenste componenten te herkennen. Daardoor kunnen sorteertechnieken die zich baseren op computervisie al geschraapt worden als het percentage verbrijzelde componenten te hoog ligt.

Een tweede probleem hierbij is dat als de componenten verbrijzeld worden, deze zich opsplitsen in kleine stukjes. Daardoor zal steeds een bepaald hoeveelheid massa tantaal verloren gaan.

In Tabel 11 kan het percentage verbrijzelde componenten worden teruggevonden van de methodes ‘selectief afschrapen componenten’ en ‘bulk demonteren met shredder’.

Tabel 11: Vergelijkende tabel componentbeschadiging

	Selectief afschrapen componenten	Bulk afschrapen met shredder
Componentbeschadiging [%]	0	20

Uit Tabel 11 kan worden afgeleid dat bij het selectief afschrapen geen componenten werden verbrijzeld. Daardoor worden alle componenten volledig gerecupereerd. Bij de demontagemethode ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ kan worden gezien dat ongeveer twintig procent van de gedemonteerde componenten verbrijzeld werd, daardoor zal steeds een bepaalde hoeveelheid massa tantaal verloren gaan, en zijn de componenten moeilijk herkenbaar voor een eventuele sorteerstep met computervisie. De verbrijzeling is het gevolg van de walswerking van de shredderwielen waardoor de componenten op elkaar worden geduwd. Dit percentage kan mogelijk een aantal procent worden teruggetrokken indien een aantal optimalisaties aan de testmodule worden aangebracht. Een mogelijke optimalisatie werd vermeld in paragraaf 4.4.2.3.

Voor de keuze op vlak van ‘componentbeschadiging’ wordt best gekozen voor de demontagemethode ‘selectief afschrapen componenten’ aangezien deze het minste aantal componenten verbrijzeld.

5.5 Return on investment

Voor de return on investment wordt een industriële installatie met een vol automatische aan- en afvoer voor de printplaten en componenten verondersteld. Er worden dan ook geen arbeidskosten in rekening gebracht bij deze berekening. Verder worden ook de onderhoudskosten aan de installatie niet in rekening gebracht.

De return on investment wordt berekend op basis van de afvalstroom printplaten die jaarlijks bij het recyclagebedrijf terecht komen. In Tabel 12 kan de jaarlijkse hoeveelheid te verwerken printplaten per soort worden teruggevonden. Hierbij staat ook steeds de gemiddelde massa tantaal, die zich op een bepaald type printplaat bevindt, vermeld. Op basis hiervan kan de gemiddelde tantaalwaarde per printplaat dan worden geschat.

Tabel 12: Jaarlijkse afvalstroom printplaten recyclagebedrijf

Meest ontmantelde WEE categorieën	Jaarlijks gemiddelde aantal producten	Jaarlijkse productmassa (kg)	Gemiddelde hoeveelheid massa Ta-component per product (g)	Opbrengst aan Ta-componenten per product (€)	Totale jaarlijkse opbrengst (€)
moederborden Notebook	75000	150000	2	0,3605	27037,50
flatscreen monitor	30000	450000	0,1	0,0180	540,75
moederborden desktop	200000	1872000	0,2	0,0361	7210,00
Σ	305000	2472000			34788,25

De opbrengst van zuiver tantaal bedraagt gemiddeld 360,5 euro per kg. De waarde van tantaalhoudende componenten per kg wordt verondersteld op 50% van de waarde van zuiver tantaal, deze bedraagt dan 180,25 euro per kg. Met deze waarde voor de tantaalcomponenten wordt dan ook verder gerekend in deze ROI.

Uit de tabel valt op te merken dat de laptop printplaten 10 maal zoveel tantaal bevatten als de desktop printplaten en zelfs 20 maal zoveel als de flatscreen monitor printplaten. Als wordt gekeken naar de jaarlijkse maximale opbrengst van de printplaten per soort kan worden gezien dat de opbrengst van de flatscreen monitorprintplaten zeer klein is. Om 30000 printplaten van flatscreen monitors te verwerken is gemiddeld gezien een maximale opbrengst van slechts 540,75 euro mogelijk. De opbrengst van de desktop printplaten is dubbel zo hoog voor hetzelfde aantal printplaten ten opzichte van de printplaten van flatscreen monitors, maar deze hebben ook eerder een lage opbrengst. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat in eerste instantie voornamelijk de laptopprintplaten moeten worden verwerkt, aangezien deze printplaten het meeste tantaal bezitten en dus ook het meeste opbrengen. Indien al de laptop printplaten verwerkt zijn, kunnen de desktopprintplaten worden verwerkt. Eens deze verwerkt zijn kan nog worden overgeschakeld naar de flatscreenmonitorprintplaten.

De ROI wordt zowel voor een mogelijke industriële schraperinstallatie als voor een mogelijke industriële shredderinstallatie berekend. Voor beide demontagemethodes wordt vertrokken van enkele gemeenschappelijke parameters, deze zijn zichtbaar in Tabel 13.

Tabel 13: Algemene gegevens ROI

Algemene gegevens:	
kostprijs per kWh [euro]:	0,22
Opbrengst aan tantaalcomponent per kg[euro]:	180,25
Aanwezige printplaten laptop [/]:	75000
Aanwezige printplaten desktop [/]:	200000
Aanwezige printplaten flatscreen monitor [/]:	30000
Machine uren per dag [/]:	8
Werkdagen per jaar [/]:	254

Zoals reeds besproken bedraagt de waarde van tantaalcomponent 180,25 euro per kg. Eerst worden zoveel mogelijk laptop printplaten verwerkt, indien 75000 stuks zijn bereikt zal er worden overgeschakeld naar desktop printplaten waarvan er per jaar maximaal 200000 verwerkt kunnen worden. Als er dan nog capaciteit over is zullen de printplaten van flatscreen monitors verwerkt worden. Er worden 254 werkdagen per jaar verondersteld, waarbij de machine elke dag maximaal acht uur lang printplaten zal verwerken.

5.5.1 ROI schraper

5.5.1.1 Veronderstellingen

De huidige verwerkingstijd van de testopstelling van de schraper bedraagt ongeveer 28,9 seconden. Aangezien voor een industriële installatie de schraapunit dynamischer uitgevoerd kan worden wordt er verondersteld dat de verwerkingstijd nog met 30% kan afnemen, de verwerkingstijd bedraagt dan 20,3 seconden.

De investeringskost van de gehele installatie wordt verondersteld op 150000 euro. Dit is de kost voor een vol automatische installatie met aanvoer, demontage en afvoer.

Voor de werkingskost wordt enkel de elektriciteitskost in rekening gebracht. Voor de elektriciteitskost van de demontagemodule wordt gerekend met het twee motoren die elk een nominaal vermogen van 750W hebben. Er wordt verondersteld dat deze gemiddeld gezien continu op een belasting van 50% zal werken. Deze veronderstelling werd gemaakt omdat de motoren niet voortdurend aan het schrapen zijn, waardoor het volle motorvermogen niet continu wordt opgenomen. Op basis hiervan wordt dan de elektriciteitskost van de demontagemodule bepaald. De elektriciteitskost van de aan- en afvoer wordt berekend op basis van een factor ten opzichte van het verbruik van de demontagemodule. Er wordt verondersteld dat de aan- en afvoer 50% van het demontagevermogen opneemt.

Op basis van bovenstaande gegevens kan nu een ruwe ROI-berekening worden gemaakt voor een mogelijk industrieel systeem dat de componenten selectief van de printplaat demonteert.

5.5.1.2 Verwerkingscapaciteit

Als eerste zal de verwerkingscapaciteit worden herrekend naar de capaciteit op jaarbasis, deze berekening is terug te vinden in Tabel 14.

Tabel 14: Verwerkingscapaciteit schraper

Verwerkingscapaciteit:	
Gem. verwerkingstijd per printplaat [s]:	20,30
Verwerkt aantal printplaten [1/uur]:	177,3
Verwerkte aantal printplaten [1/dag]:	1419
Verwerkings capaciteit printplaten [1/jaar]:	360355
Verwerkte printplaten laptop [1/jaar]:	75000
Verwerkte printplaten desktop[1/jaar]:	200000
Verwerkte printplaten flatscreen monitor [1/jaar]:	30000
Totaal aantal verwerkte printplaten [1/jaar]:	305000

Als de verwerkingstijd voor één printplaat wordt omgerekend naar het aantal printplaten dat op jaarbasis kan worden verwerkt, wordt een capaciteit van 360355 printplaten per jaar bekomen. Dit wil zeggen dat dit systeem een overcapaciteit heeft, aangezien jaarlijks bij het recyclagebedrijf slechts 305000 terecht komen. Er is dus nog ruimte om meer printplaten te verwerken, indien deze machine praktisch gerealiseerd kan worden.

5.5.1.3 Investeringskost en werkingskost

Zoals eerder vermeld wordt de totale investeringskost op 150000 euro geschat.

De gegevens en uitkomsten van de totale elektriciteitskost zijn zichtbaar in Tabel 15.

Tabel 15: Investeringskost en werkingskost, ROI schraper

Elektriciteitskost demontagemodule:	
Nominaal motorvermogen [W]:	750
Aantal nodige motoren [/]	2
Percentage belasting [%]	50
Gem. demontagetijd printplaat [s]:	20,3
Gem. demontagetijd printplaat [uur]:	0,0056
Verbruikte elektriciteit per printplaat [kWh]:	0,0042
Verbruikte elektriciteit per printplaat [euro]:	0,00093
Verbruikte elektriciteit per jaar [euro]:	284
Elektriciteitskost aan- en afvoer:	
Percentage verbruik t.o.v. demontagemodule [%]	50
Verbruikte elektriciteit per jaar aan- en afvoer [euro]	142
Totale werkingskost:	
Totale verbruikte elektriciteit per jaar [euro]:	425,7

Er werd een schatting gemaakt van de verbruikte elektriciteit per printplaat door het nominale motorvermogen te vermenigvuldigen met het aantal motoren, het belastingpercentage en de gemiddelde demontagetijd per printplaat. Op basis daarvan kan de elektriciteitskost per printplaat en de kost per jaar van deze installatie bepaald worden. Uit deze berekening volgt dat de elektriciteitskost van de demontagemodule op 283,78 euro per jaar geschat kan worden. De elektriciteitskost van de aan- en afvoer werd geschat op 50% van de

elektriciteitskost van de demontagemodule. Dit kom bijgevolg uit op 141,89 euro per jaar. De totale jaarlijkse werkingskost wordt dan geschat op 425,7 euro.

5.5.1.4 Omzet en winst

Voor het bepalen van de omzet wordt eerst de omzet van de laptopprintplaten berekend, vervolgens van de desktopprintplaten en tenslotte van de flatscreenmonitorprintplaten. De omzetberekeningen van de laptopprintplaten zijn zichtbaar in Tabel 16.

Tabel 16: Omzet printplaten laptop, ROI schraper

Omzet printplaten laptop:	
Gem. massa tantaal per printplaat [g]:	2
Demontage efficiëntie [%]:	91,6
Gem. massa tantaal per printplaat [kg]:	0,00183
Omzet aan tantaal per kg [euro]:	180,25
Omzet aan tantaal per prinplaat [euro]:	0,3302
Omzet per jaar [euro]:	24766

Eerst werd de gemiddelde massa gedemonteerde tantaal per printplaat bepaald. Hiervoor werd de gemiddelde aanwezige massa tantaal per printplaat vermenigvuldigd met de massademontage-efficiëntie. Op basis van de omzet van tantaal per kg en het aantal gedemonteerde printplaten kan de jaarlijkse omzet berekend worden. Deze bedraagt naar schatting 24766 euro per jaar voor de laptopprintplaten.

Vervolgens wordt op dezelfde berekeningswijze de omzet voor desktop printplaten berekend. De resultaten daarvan zijn zichtbaar in Tabel 17.

Tabel 17: Omzet printplaten desktop, ROI schraper

Omzet printplaten desktop	
Gem. massa tantaal per printplaat [g]:	0,2
Demontage efficiëntie [%]:	91,6
Gem. massa tantaal per printplaat [kg]:	0,0001832
Omzet aan tantaal per kg [euro]:	180,25
Omzet aan tantaal per prinplaat [euro]:	0,03302
Omzet per jaar [euro]:	6604

De omzet van de desktop printplaten bedraagt naar schatting 6604 euro per jaar.

In Tabel 18 zijn de resultaten zichtbaar van flatscreenmonitorprintplaten.

Tabel 18: Omzet printplaten monitors, ROI schraper

Omzet printplaten monitors	
Gem. massa tantaal per printplaat [g]:	0,1
Demontage efficiëntie [%]:	91,6
Gem. massa tantaal per printplaat [kg]:	0,0000916
Omzet aan tantaal per kg [euro]:	180,25
Omzet aan tantaal per prinplaat [euro]:	0,0165109
Omzet per jaar [euro]:	495,327

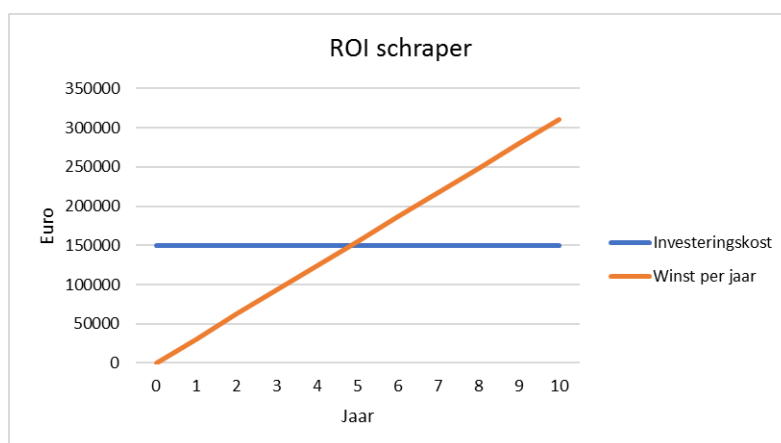
De omzet van de printplaten van flatscreen monitors bedraagt naar schatting 495 euro per jaar.

De totale omzet is de som van de omzetten van de laptopprintplaten, desktopprintplaten en flatscreenmonitorprintplaten. De totale omzet bedraagt naar schatting dus 31866 euro per jaar.

Vervolgens kan de winst berekend worden door de omzet te verminderen met de werkingskosten. De winst bedraagt 31440 euro per jaar. Er valt op te merken dat de omzet, en dus ook de winst, sterk verhoogd kunnen worden als de desktopprintplaten en flatscreenmonitor printplaten worden vervangen door laptopprintplaten.

5.5.1.5 ROI

Op basis van de investeringskost, de opbrengst en de werkingskosten wordt de cumulatieve opbrengst bepaald. De resultaten hiervan zijn visueel weergegeven in Figuur 65.



Figuur 65: ROI, ROI schraper

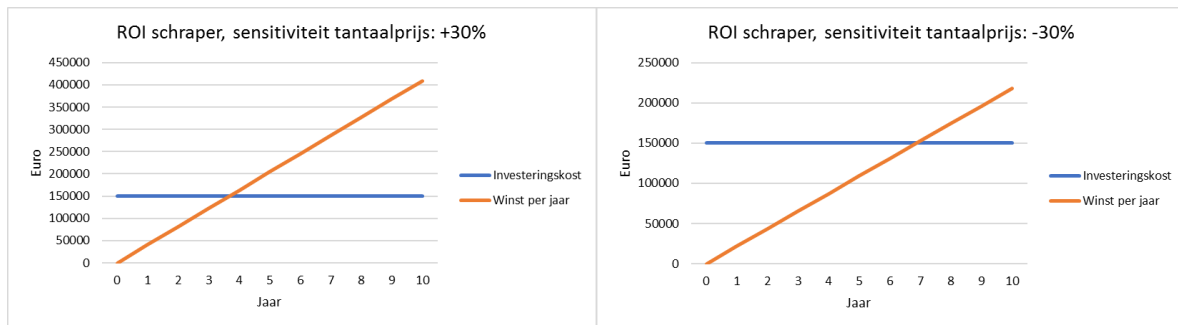
Op de grafiek kan worden gezien dat de return on investment voor dit systeem naar schatting iets minder dan vijf jaar bedraagt.

5.5.1.6 Sensitiviteits-studie

Aangezien de waarde van bepaalde parameters sterk kan fluctueren en afhankelijk is van relatief onzekere aannames zal in de invloed hiervan worden onderzocht op de return on investment door middel van een sensitiviteits-studie. De parameters waarop een sensitiviteit

wordt toegepast zijn tantaalprijs, energiekost, investeringskost en massademontage-efficiëntie.

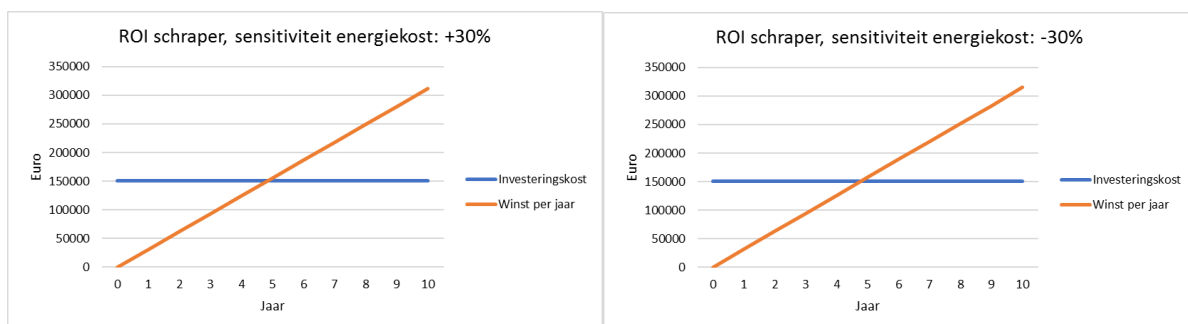
De tantaalprijs kan zeer sterk fluctueren, er werd gekozen om een invloed van +30% en -30% op de huidige tantaalcomponentprijs te bestuderen. In Figuur 66 is de invloed van de prijsvariatie zichtbaar, aan de linkerkant de invloed op een prijsstijging van 30% en aan de rechterkant een prijsdaling van 30%.



Figuur 66: sensitiviteit tantaalprijs, ROI schraper

Er is zichtbaar dat in prijsstijging van 30% ervoor zorgt dat de ROI naar schatting ongeveer 3,5 jaar bedraagt, een prijsdaling van 30% zorgt voor een ROI van ongeveer 7 jaar. Daaruit kan dus worden besloten dat een fluctuatie in tantaalprijs een grote invloed heeft op de ROI.

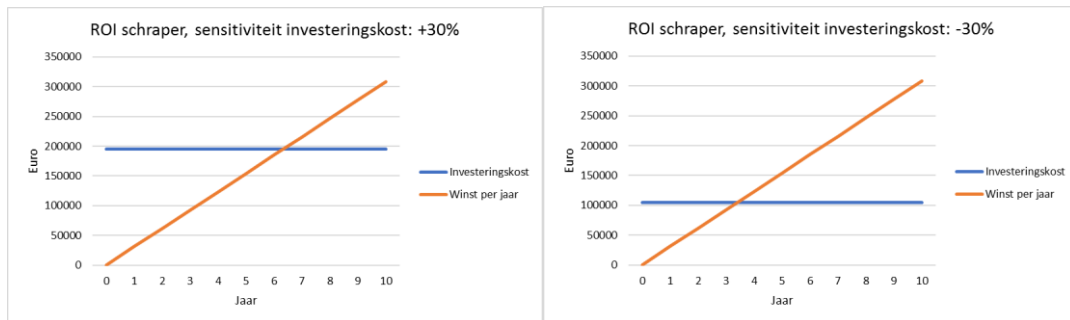
Vervolgens werd een sensitiviteitstudie gedaan op energiekost. Ook hier werd gekozen voor een fluctuatie van +30 % en -30 % op de energiekost. In Figuur 67 is de invloed van de variatie zichtbaar. Aan de linkerkant de invloed van een energiekoststijging van 30 % en aan de rechterkant een energiekostdaling van 30 %.



Figuur 67: sensitiviteit energiekost, ROI schraper

Er is geen invloed zichtbaar op de ROI door een fluctuatie van $\pm 30\%$ op de energiekost. De energiekost varieert tussen 298 en 553 euro per jaar. Tegenover deze kost staat een omzet van 31866 euro. Dit verklaart waarom de energiekost fluctuatie een verwaarloosbare invloed heeft op de ROI.

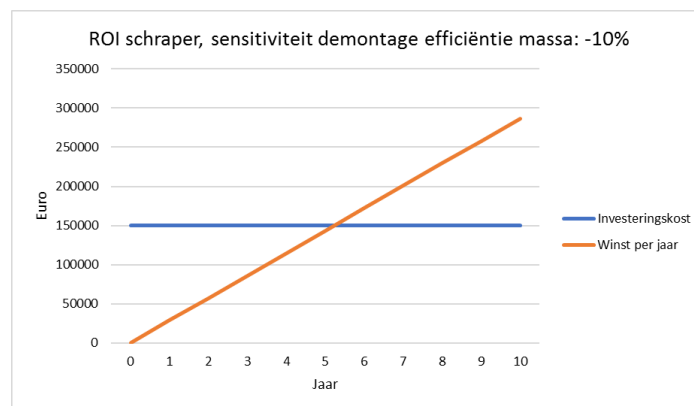
Daarna werd een sensitiviteit op de investeringskost gedaan, deze kan soms sterk afwijken van hetgeen op voorhand beraamd is. Ook hierop wordt een fluctuatie van $\pm 30\%$ toegepast, de invloed daarvan is zichtbaar in Figuur 68.



Figuur 68: sensitiviteit investeringskost, ROI schraper

Indien de investeringskost 30 % meer gaat bedragen dan voorspeld werd, wordt een ROI van iets meer dan zes jaar bekomen. Indien de investeringskost 30 % minder bedraagt wordt een ROI van ongeveer 3,5 jaar bekomen.

Tenslotte wordt een sensitiviteitsstudie gedaan op de demontage-efficiëntie. De kans dat de demontage-efficiëntie nog veel gaat verbeteren is eerder klein, aangezien deze hoog is. Daarom wordt enkel gekeken naar de invloed van een massademontage-efficiëntiedaling van 10 %. In Figuur 69 is de invloed daarvan zichtbaar gemaakt.



Figuur 69: sensitiviteit demontage-efficiëntie, ROI schraper

Bij een daling van 10% bedraagt de demontage-efficiëntie 82,4%. De ROI bedraagt dan ongeveer 5,5 jaar ten opzichte van 5 jaar bij een demontage-efficiëntie van 91,6%.

Uit de sensitiviteitstudie kan worden besloten dat de invloed van de energiekost en de demontage-efficiëntie op de ROI beperkt blijft. Maar de investeringskost en de tantaalprijs kunnen zorgen voor grote fluctuaties van de ROI.

5.5.2 ROI shredder

5.5.2.1 Veronderstellingen

De verwerkingstijd per printplaat is opgemeten bij de testopstelling van de shredder, deze bedraagt gemiddeld gezien 63,5 seconden per printplaat. Voor een industriële installatie wordt verondersteld dat de verwerkingstijd per printplaat met 70 % verlaagd kan worden ten opzichte van de huidige testopstelling. Dit kan verwezenlijkt worden door het plaatsen van meerdere shredderwielen onder elkaar, hierdoor dienen dan ook motoren met grotere vermogens te worden gebruikt. Als de huidige gemiddelde verwerkingstijd wordt verlaagd met 70 %, wordt een gemiddelde verwerkingstijd van 19,1 seconden per printplaat bekomen.

De totale investeringskost van de installatie wordt ook hier geraamd op 150000 euro. Deze vertegenwoordigd een vol automatische installatie met aanvoer, demontage met visie en sorteerinstallatie en afvoer.

Voor de werkingskost wordt enkel de elektriciteitskost in rekening gebracht. Er wordt verondersteld dat een mogelijke industriële installatie wordt voorzien van een motor met een nominaal vermogen van 10 kW. Op basis daarvan zal de elektriciteitskost van de demontagemodule worden bepaald. De elektriciteitskost van de aan- en afvoer wordt berekend op basis van een factor ten opzichte van het verbruik van de demontagemodule. Er wordt verondersteld dat het opgenomen voor de aan- en afvoer 20 % van het opgenomen motorvermogen van demontagemodule bedraagt.

De massademontage-efficiëntie van de shredder tijdens de testopstelling bedroeg 43,06 %. Voor een industriële installatie wordt verondersteld dat dit percentage nog met 50 % verbetert indien optimalisaties worden doorgevoerd. Dan bedraagt de totale massademontage-efficiëntie van deze demontagemodule naar schatting 65 %.

Op basis van deze gegevens kan nu een ruwe ROI-berekening naar een mogelijke industriële shreddermodule worden gedaan.

5.5.2.2 Verwerkingscapaciteit

Als eerste zal de verwerkingscapaciteit worden herrekend naar de capaciteit op jaarbasis, deze berekening is terug te vinden in Tabel 19.

Tabel 19: Verwerkingscapaciteit shredder

Verwerkingscapaciteit:	
Gem. verwerkingstijd per printplaat [s]:	19,05
Verwerkt aantal printplaten [1/uur]:	188,98
Verwerkte aantal printplaten [1/dag]:	1511,81
Verwerkings capaciteit printplaten [1/jaar]:	384000
Verwerkte printplaten laptop [1/jaar]:	75000
Verwerkte printplaten desktop[1/jaar]:	200000
Verwerkte printplaten flatscreen monitor [1/jaar]:	30000
Totaal aantal verwerkte printplaten [1/jaar]:	305000

De jaarlijkse verwerkingscapaciteit wordt geschat op ongeveer 384000 printplaten. Dit is een overcapaciteit, er is dus nog ruimte om meer printplaten te verwerken als dit systeem praktisch gerealiseerd kan worden.

5.5.2.3 Investeringskost en werkingskost

Zoals reeds vermeld wordt de investeringskost van het gehele shreddersysteem geschat op 150000 euro.

De gegevens en uitkomsten van de elektriciteitskost zijn zichtbaar in Tabel 20.

Tabel 20: Investeringskost en werkingskost, ROI shredder

Elektriciteitskost demontagemodule:	
Nominaal motorvermogen [W]:	10000
Aantal nodige motoren [/]	1
Gem. demontagetijd printplaat [s]:	19,05
Gem. demontagetijd printplaat [uur]:	0,00529167
Verbruikte elektriciteit per printplaat [kWh]:	0,05291667
Verbruikte elektriciteit per printplaat [euro]:	0,01164167
Verbruikte elektriciteit per jaar [euro]:	3550,70833
Elektriciteitskost aan- en afvoer:	
Percentage verbruik t.o.v. demontagemodule [%]	20
Verbruikte elektriciteit per jaar aan- en afvoer [euro]	710,141667
Totale werkingskost:	
Totale verbruikte elektriciteit per jaar [euro]:	4260,85

De elektriciteitskost van de demontagemodule bedraagt naar schatting jaarlijks 3550,8 euro. Als de factor van twintig procent in rekening wordt gebracht, wordt de elektriciteitskost daarvan geschat op 710,1 euro. De totale werkingskost wordt dan geschat op 4260,9 euro per jaar.

5.5.2.4 Omzet en winst

Voor het bepalen van de omzet zal eerst de omzet van de laptopprintplaten worden berekend, vervolgens de desktopprintplaten en tenslotte de flatscreen monitorprintplaten. De omzetberekeningen voor de laptopprintplaten zijn zichtbaar in Tabel 21.

Tabel 21: Omzet printplaten laptop, ROI shredder

Omzet printplaten laptop:	
Gem. massa tantaal per printplaat [g]:	2
Demontage efficiëntie [%]:	65
Gem. massa tantaal per printplaat [kg]:	0,0013
Omzet aan tantaal per kg [euro]:	180,25
Omzet aan tantaal per prinplaat [euro]:	0,234325
Omzet per jaar [euro]:	17574

Voor de laptopprintplaten bedraagt de omzet naar schatting 17574 euro per jaar.

Vervolgens werd op dezelfde berekeningswijze de omzet voor desktopprintplaten berekend. De resultaten daarvan zijn zichtbaar in Tabel 22.

Tabel 22: Omzet printplaten desktop, ROI shredder

Omzet printplaten desktop:	
Gem. massa tantaal per printplaat [g]:	0,2
Demontage efficiëntie [%]:	65
Gem. massa tantaal per printplaat [kg]:	0,00013
Omzet aan tantaal per kg [euro]:	180,3
Omzet aan tantaal per prinplaat [euro]:	0,02343
Omzet per jaar [euro]:	4686,5

De omzet van de desktopprintplaten bedraagt naar schatting dus 4686,5 euro per jaar.

In Tabel 23 zijn de resultaten voor de omzetberekeningen van flatscreenmonitorprintplaten zichtbaar.

Tabel 23: Omzet printplaten flatscreen monitors, ROI shredder

Omzet printplaten flatscreen montitors:	
Gem. massa tantaal per printplaat [g]:	0,1
Demontage efficiëntie [%]:	65
Gem. massa tantaal per printplaat [kg]:	0,000065
Omzet aan tantaal per kg [euro]:	180,3
Omzet aan tantaal per prinplaat [euro]:	0,0117
Omzet per jaar [euro]:	351,5

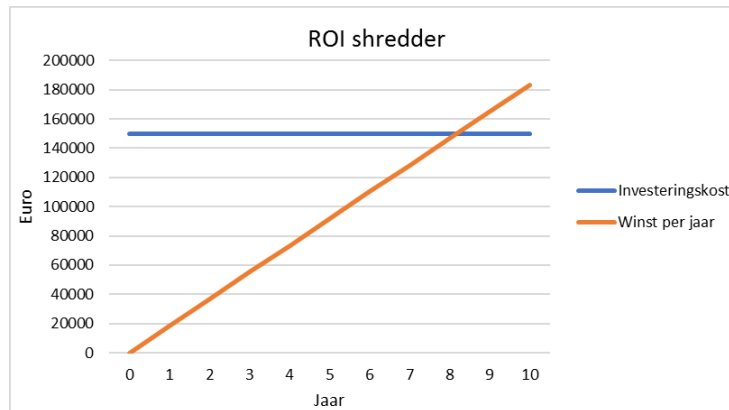
De omzet van de flatscreen monitor printplaten bedraagt naar schatting dus 351,5 euro per jaar.

De totale omzet, van de drie printplaattypes, bedraagt dan 22612 euro per jaar. Als deze omzet wordt verminderd met alle kosten wordt de winst bekomen, deze bedraagt naar schatting 18351 euro per jaar.

Er valt op te merken dat ook hier de omzet en de winst sterk verhoogd kan worden als er meer laptopprintplaten verwerkt zouden kunnen worden.

5.5.2.5 ROI

Een visuele weergave van de cumulatieve opbrengst is zichtbaar in Figuur 70.



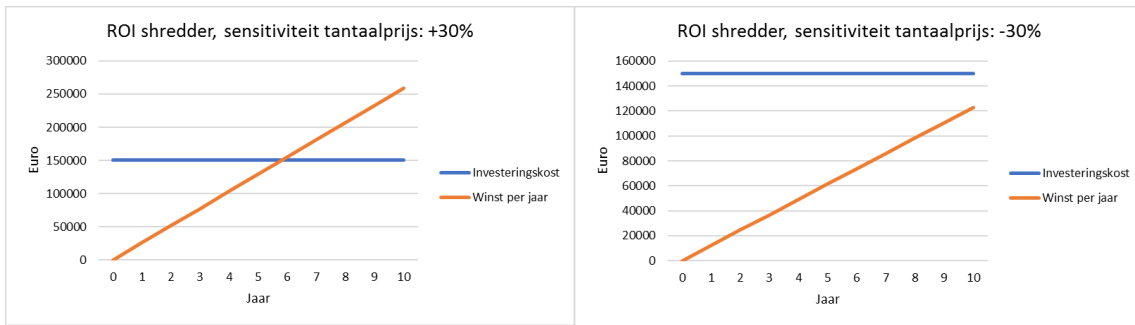
Figuur 70: ROI, ROI shredder

Op deze grafiek kan worden gezien dat de return on investment ongeveer acht jaar bedraagt. Dit betekent dat op basis van de veronderstelde parameters, de shredderinstallatie een minder rendabele demontagemethode is.

5.5.2.6 Sensitiviteit studie

De parameters waarop een sensitiviteit wordt toegepast zijn tantaalprijs, energiekost, investeringskost en massademontage-efficiëntie.

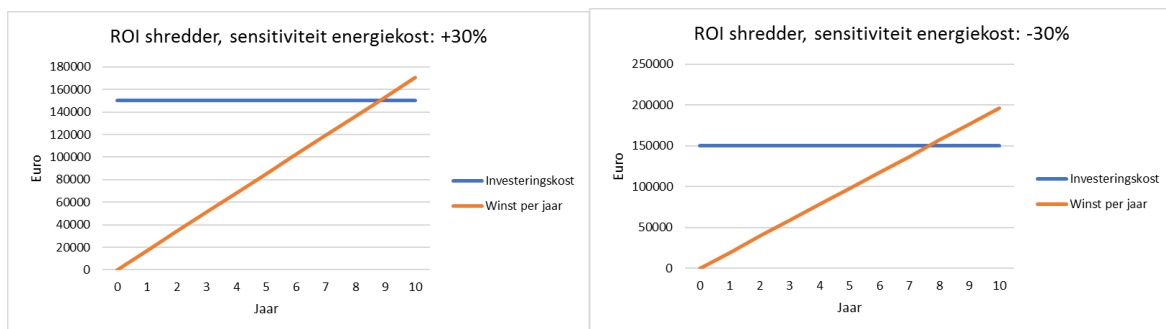
Als eerste zal een sensitiviteit studie op de variërende tantaalprijs worden gedaan, hierbij wordt een stijging en een daling van $\pm 30\%$ verondersteld. In Figuur 71 is de invloed van deze variaties zichtbaar. Aan de linkerkant is de invloed op een prijsstijging van 30% weergegeven, en aan de rechterkant een prijsdaling van 30%.



Figuur 71: sensitiviteit tantaalprijs, ROI shredder

Er kan worden vastgesteld dat een prijsstijging van 30% ervoor zorgt dat de ROI ongeveer 5,5 jaar bedraagt. Een prijsdaling van 30% zorgt voor een ROI van langer dan 10 jaar. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de fluctuatie in tantaalprijs een grote invloed heeft op de ROI.

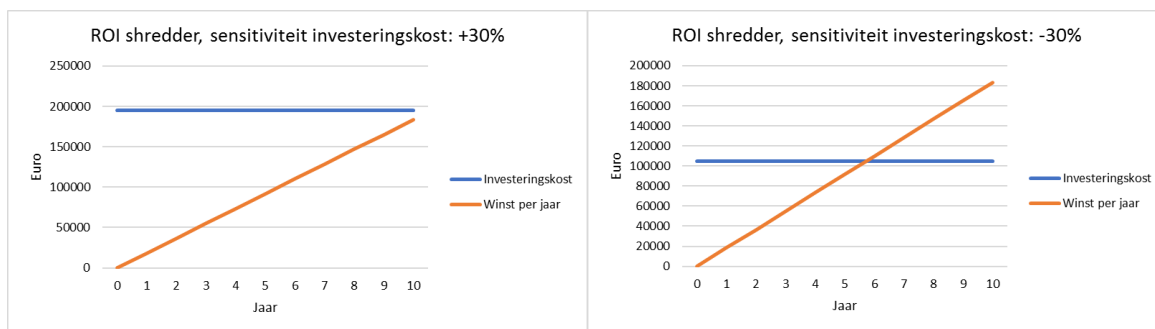
Vervolgens werd ook een sensitiviteitsstudie gedaan op een fluctuerende energiekost. Ook hier werd voor een fluctuatie van +30% en -30% gekozen op de huidige energiekost. In Figuur 72 is de invloed van deze variatie zichtbaar. Aan de linkerkant is de invloed van een energiekoststijging van 30% terug te vinden, aan de rechterkant de invloed van een energiekostdaling van 30%.



Figuur 72: sensitiviteit energiekost, ROI shredder

Er is een kleine invloed zichtbaar op de ROI door een fluctuatie van de energiekost. De energiekost varieert tussen 2982,6 euro en 5539,1 euro per jaar. Daardoor varieert de ROI met ongeveer een half jaar.

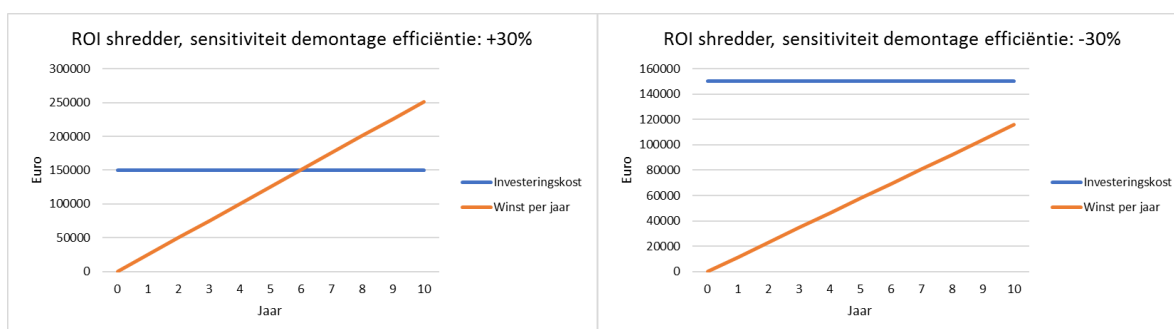
Daarna wordt de sensitiviteit op de investeringskost bestudeerd. Daarbij wordt een fluctuatie van $\pm 30\%$ toegepast op de ingeschatte investeringskost, de invloed daarvan is zichtbaar in Figuur 73.



Figuur 73: sensitiviteit investeringskost, ROI shredder

Indien de investeringskost 30 % meer bedraagt dan voorspelt, wordt een ROI van meer dan 10 jaar geschat. Als de investeringskost 30% minder zou bedragen, wordt een ROI van ongeveer 5,5 jaar geschat. Daaruit kan worden geconcludeerd dat investeringskost sterkt gereduceerd zal moeten worden om een realistische ROI te bekomen.

Tenslotte wordt nog een sensitiviteitsstudie gedaan naar de massademontage-efficiëntie. In Figuur 74 is de invloed daarvan zichtbaar, aan de linkerkant een demontage-efficiëntie stijging van 30% en aan de rechterkant een daling van 30%.



Figuur 74: sensitiviteit demontage-efficiëntie, ROI shredder

Indien de massademontage-efficiëntie nog met 30% kan stijgen bedraagt de ROI slechts 6 jaar tegenover een ROI van meer dan tien jaar als deze efficiëntie daalt met 30%.

Uit de sensitiviteitsstudie kan besloten worden dat er meerdere parameters verbeterd moeten worden om de shredder installatie rendabel te kunnen maken. Zo zal bijvoorbeeld het verder optimaliseren van de verwerkingstijd en massademontage-efficiëntie een grote impact hebben op de ROI.

5.5.3 Vergelijking ROI

Op basis van deze ROI-analyse kan worden besloten dat de demontagemethode 'selectief afschrapen componenten' het snelst wordt terugverdiend. Ook hebben alle sensitiviteitsanalyses het minste impact op de deze demontagemethode

Uit de sensitiviteitsanalyse op de tantaalprijs, kan van beide systemen worden afgeleid dat als de tantaalprijs 30 % stijgt of daalt, dit de grootste invloed heeft op de methode 'bulk afschrapen met shredder'. De sterkere verlenging van de ROI bij een tantaalcomponentprijsafname is te verklaren doordat deze demontagemethode een groter motorvermogen opneemt dan de demontagemethode 'selectief afschrapen componenten'. Daardoor zal het energieverbruik een groter deel van de omzet opsorpen waardoor de ROI bij deze methode sneller zal toenemen.

Als naar de sensitiviteit van $\pm 30\%$ op de energieprijs wordt toegepast, kan opnieuw worden vastgesteld dat dit de grootste invloed heeft op de demontagemethode 'bulk afschrapen met shredder'. Dit is opnieuw verklaren door het feit dat deze methode het grootste motorvermogen opneemt. Als naar de ROI wordt gekeken van de methode 'selectief afschrapen componenten' kan worden vastgesteld dat deze energieprijswaardeschommelingen zelfs verwaarloosbaar is ten opzichte van de omzet.

Indien met een sensitiviteit van $\pm 30\%$ wordt gerekend in de investeringskost, heeft dit ook weer de grootste impact op de demontagemethode 'bulk afschrapen componenten'. Dit komt omdat deze demontage-efficiëntie lager ligt en de energiekost hoger ligt in vergelijking met de demontagemethode 'selectief afschrapen componenten'. Daardoor zijn de energiekosten hoger en de omzet lager, waardoor er minder opbrengsten zijn en de ROI sneller zal toenemen als de investeringskost toeneemt.

Bij de sensitiviteit studie van de demontage rendementen werd verondersteld dat de demontage-efficiëntie van de demontagemethode 'selectief afschrapen componenten' enkel nog maar voor tien procent kan afnemen. Bij de demontagemethode 'bulk afschrapen componenten met shredder' werd berekend wat er gebeurt wanneer de demontage-efficiëntie $\pm 30\%$ varieert. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de ROI bij de demontagemethode 'selectief afschrapen componenten' slechts een half jaar opschuift, waardoor de ROI 5,5 jaar in beslag neemt. Bij demontagemethode 'bulk afschrapen componenten met shredder' daarentegen zal bij een demontage-efficiëntietoename van 30 % de return on investment nog steeds zes jaar in beslag nemen. Dit is te verklaren doordat demontage-efficiëntie van de demontagemethode 'bulk afschrapen componenten' al aan de lage kant lag, en daardoor de omzet al lager ligt. Als de efficiëntie nu nog verder afneemt, zal de omzet ook nog verder dalen. Dit in combinatie met het hogere motorvermogen zorgt voor een lagere opbrengst, zodat de ROI weer sneller zal toenemen.

De ROI van beide systemen kan verbeterd worden door een grotere hoeveelheid printplaten te verwerken, hiervoor zullen de installaties meer dan 8 uur per dag werkzaam moeten zijn. Van de te verwerken printplaten kunnen nog andere componenten of materiaalstromen gedemonteerd worden wat dan weer zorgt voor een grotere opbrengst.

6 Conclusie

Het hoofddoel van deze masterthesis was een studie doen naar mogelijke demontagetechnieken om tantaalcomponenten van printplaten te demonteren. Om dit hoofddoel te bereiken werden in totaal vier stappen doorlopen.

De eerste stap van dit onderzoek bestond uit een literatuurstudie. Daarbij werd gezocht naar demontagetechnieken die reeds onderzocht werden, zowel voor selectieve als bulkdemontagetechnieken. Bij selectieve demontagetechnieken worden enkel de gewenste componenten van de printplaat gedemonteerd, bij bulkdemontagetechnieken worden alle componenten ineens van de printplaat gedemonteerd en worden de tantaalcomponenten achteraf uit de massastroom componenten gefilterd. Op basis van deze studie werd inspiratie opgedaan en werden ideeën naar potentiële demontagetechnieken uitgewerkt.

Bij de tweede stap van dit onderzoek werden deze ideeën samengevat in een morfologisch overzicht. Vervolgens werden de meest belovende demontagemethoden geselecteerd. Selectie richtte zich op veiligheidsaspecten en mogelijke vooraf bekende problemen. Na deze selectie bleven de demontagemethoden ‘uitlokken tinpest’, ‘smelten soldeerverbinding’, ‘selectief afschrappen componenten’ en ‘bulk afschrappen componenten met shredder’ over. Van deze methodes is enkel ‘selectief afschrappen componenten’ een selectieve demontagetechniek, bij alle andere demontagetechnieken worden de componenten in bulk van de printplaten gedemonteerd.

De derde stap bestond uit het uitwerken van concepten het opzetten van proefopstellingen voor elk van de geselecteerde demontagemethoden. Vervolgens werden de demontagemethoden getest, daaruit konden dan conclusies worden getrokken of een demontagemethode al dan potentieel heeft.

Als eerste werd de demontagemethode ‘uitlokken tinpest’ getest. Tinpest is de allotrope transformatie van zilverkleurig β -tin naar grijs en bros α -tin. Als deze transformatie optreedt zal de soldeerverbinding afbreken waardoor de elektronische componenten los komen te zitten op de printplaat. Deze transformatie kan optreden bij een temperatuur van 13,2 °C, maar zal sneller verlopen als de temperatuur nog lager ligt. Bij deze proef werden een aantal printplaten gedurende 36 uur in droogijs geplaatst, wat een temperatuur van -79,5 °C heeft. Na deze 36 uur was er echter nog geen enkel spoor van tinpest. Hieruit werd besloten dat tinpest geen werkende demontagemethode is waardoor deze methode afvalt. Een mogelijke verklaring daarvoor is dat printplaatfabrikanten additieven toevoegen aan het tin, die het fenomeen tinpest tegenwerken.

Vervolgens werd de demontagemethode ‘smelten soldeerverbinding’ getest. Daarbij werd de printplaat verwarmd op verschillende temperaturen, waarbij de laagste temperatuur de smelttemperatuur van de soldeerverbinding bedraagt. Uit dit experiment bleek dat ‘smelten soldeerverbinding’ een zeer effectieve demontagemethode is. Tijdens deze proef kwamen echter veel rookgassen vrij die een enorme reukhinder veroorzaakte. Aangezien er nog andere technieken voorhanden waren, die geen rookgassen uitstoten, werd besloten deze demontagemethode niet verder te onderzoeken.

Daarna werd de methode ‘selectief afschrappen componenten’ getest. Daarvoor werd gebruik gemaakt van een XY-tafel die werd voorzien van een visiesysteem dat de tantaalcomponenten kan herkennen en lokaliseren. Na het uitvoeren van dit experiment kon worden geconcludeerd

dat 'selectief afschrapen componenten' een effectieve demontagetechniek is. De componenten, die door het visiesysteem werden geselecteerd, werden bijna allemaal gedemonteerd door de schraper. Dit schrapen verliep vervolgens ook nog eens aan een hoog tempo, waardoor korte verwerkingstijden mogelijk zijn.

Tenslotte werd de demontagemethode 'Bulk Afschrapen componenten met shredder' getest. Om deze methode te testen werd een testmodule uitgewerkt en opgebouwd. Bij deze shredder staan de twee shredderwielen op een bepaalde afstand van elkaar. De shredderwielen draaien in tegenovergestelde richting in elkaar, het speciale daarbij is dat beide wielen aan een verschillende rotatiefrequentie draaien. Daardoor zal het ene shredderwiel de printplaat, via de aanwezige componenten, naar onder willen duwen en zal het andere shredderwiel de printplaat, via de aanwezige componenten, proberen tegen te houden. Op deze manier wordt geprobeerd een voldoende grote drukkracht op de componenten te creëren waardoor de componenten van de printplaat worden geschoven. Uit resultaten, die volgen uit experimenten op deze testmodule, bleek dat demontage-efficiëntie van tantaalcomponenten aan de lage kant lag. Dit kwam omdat de shredderwielen te ver uit elkaar stonden en de ruimte tussen de schraaplatten te groot was. Verder werd ook een groot deel van de gedemonteerde tantaalcomponenten verbrijzeld omdat ze geplet raakte tussen de shredderwielen. Het verbrijzelen van de componenten dient geminimaliseerd te worden aangezien hierdoor massa tantaal verloren gaat, omdat de component in verschillende stukken worden gebroken. Verder beperkt het ook de keuze naar mogelijke sorteertechnieken, die nodig zijn om de tantaalcomponenten uit de massastroom componenten te filteren die door deze demontagemethode wordt veroorzaakt. Als wordt gekozen voor een sorteertechniek die zich baseert op computervisie, wordt het moeilijk voor dit visiesysteem om de verbrijzelde componenten te herkennen. Daardoor kunnen de sorteertechnieken, gebaseerd op computervisie al worden uitgesloten als een te groot percentage tantaalcomponenten wordt verbrijzeld. Om de demontage-efficiëntie te verhogen en het aantal verbrijzelde tantaalcomponenten te verlagen dienen nog een aantal optimalisaties te worden gedaan aan de testmodule. Verder ligt de verwerkingstijd per printplaat relatief laag bij deze demontagemethode en kan deze nog verder worden verlaagd door een aandrijfmotor met een groter vermogen te gebruiken. Samengevat kan bij deze demontagemethode worden geconcludeerd dat een interessante demontagemethode kan zijn indien verder onderzoek naar deze methode wordt gevoerd.

Nadat alle demontagetechnieken getest waren, werden de werkende demontagemethoden naast elkaar gelegd en vergeleken. Uit deze vergelijking kan dan een finale conclusie worden getrokken. Uit de experimenten volgde dat er in totaal drie werkende systemen zijn, deze zijn 'smelten soldeerverbinding', 'selectief afschrapen component' en 'bulk afschrapen componenten met shredder'. Aangezien bij de methode 'smelten soldeerverbinding' veel rookgassen vrijkwamen, werd besloten deze niet op te nemen in de vergelijking. Daardoor blijven de demontagemethode 'selectief afschrapen componenten' en 'bulk afschrapen componenten met shredder' over.

Op basis van de vergelijking tussen de twee overgebleven demontagemethoden kan geconcludeerd worden de demontagemethode 'selectief afschrapen van componenten' op dit moment de meest geschikte methode lijkt te zijn om tantaalcomponenten van de printplaten te verwijderen. Uit experimenten van de methode 'selectief afschrapen van componenten' kon worden afgeleid dat maar liefst 91,16 % van de aanwezige tantaalcomponentmassa van de printplaten werd gehaald, tegenover 40,96 % bij het experiment van de demontagemethode

‘bulk afschrapen componenten met shredder’. Er kan worden aangenomen dat indien er optimalisaties aan beide demontagemethoden worden aangebracht de massademontage-efficiënties nog kunnen toenemen, maar dat door deze optimalisaties de massademontage-efficiëntie van de methode ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ niet zo hoog zal worden als deze van de methode ‘selectief afschrapen componenten’. Verder werd bij het experiment van de methode ‘selectief afschrapen componenten’ ook vastgesteld dat geen componenten verbrijzeld werden. Bij het experiment van de demontagemethode ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ daarentegen werd ongeveer 20 % van de gedemonteerde componenten verbrijzeld. Daardoor kan geen gebruik worden gemaakt van een sorteermethode, gebaseerd op computervisie, en zal steeds een bepaalde hoeveelheid massa tantaal verloren gaan. Deze extra sorteerstep is ook een nadeel van de demontagemethode ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ aangezien deze een extra complexiteit in het totale systeem introduceert. Voor de parameters verwerkingstijd en energieverbruik is op basis van proefopstellingen moeilijk iets te concluderen. Daarom werd, op basis van de experimentele resultaten een schatting gemaakt naar mogelijke industriële installaties voor beide systemen. Op deze installaties werd dan een ruwe ROI-berekening gedaan. De resultaten van deze berekeningen tonen aan dat met de veronderstelde parameters de afschraper een ROI heeft van iets minder dan vijf jaar en de shredder een ROI van ongeveer acht jaar. Een fluctuatie in de tantaalprijs en de investeringskost hebben een grote impact op de ROI van beide installaties, terwijl de invloed van de energiekost eerder beperkt blijft.

Als in de toekomst, naast de tantaalcomponenten, ook andere componenten van printplaten moeten worden gerecupereerd, kan de demontage methode ‘bulk afschrapen componenten met shredder’ mogelijk een interessantere methode zijn. Als grotere motorvermogens worden gebruikt, wordt aangenomen dat de printplaten aan een hoger tempo worden verwerkt. Aangezien de huidige demontage-efficiënties van dit systeem nog aan de lage kant liggen moet eerst nog onderzoek worden gevoerd om de demontage-efficiënties te verhogen. Als meerdere componenten, aan een hoger tempo en efficiëntie gedemonteerd worden zal bijgevolg de ROI van de methode ‘bulk afschrapen met shredder’ ook nog verder afnemen.

Literatuur

- [1] M. Reuter, *Metal Recycling Acknowledgments*. 2013.
- [2] K. Mineta and T. H. Okabe, "Development of a recycling process for tantalum from capacitor scraps," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 66, no. 2–4, pp. 318–321, 2005.
- [3] M. Ueberschaar, D. Dariusch Jalalpoor, N. Korf, and V. S. Rotter, "Potentials and Barriers for Tantalum Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment," *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, no. 3, pp. 700–714, 2017.
- [4] CES edupack 2017, "Tantalum, commercial purity, R05200." .
- [5] K. Feldmann, "The printed circuit board - a challenge for automated disassembly and for the design of recyclable interconnect devices," *CONCEPT - Int. Conf. Clean Electron. Prod. Technol.*, vol. 1995, no. 415, pp. 186–190, 1995.
- [6] S. Yokoyama, Y. Ikuta, and M. Iji, "Recycling system for printed wiring boards with mounted parts," *Proc. - 1st Int. Symp. Environ. Conscious Des. Inverse Manuf. EcoDesign 1999*, pp. 814–817, 1999.
- [7] J. Wang, J. Guo, and Z. Xu, "An environmentally friendly technology of disassembling electronic components from waste printed circuit boards," *Waste Manag.*, vol. 53, pp. 218–224, 2016.
- [8] S. Takata and Y. Umeda, *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses: Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, June 11th-13th, 2007*, vol. 53, no. 9. 2007.
- [9] W. J. Plumbridge, "Recent Observations on Tin Pest Formation in Solder Alloys," *J. Electron. Mater.*, vol. 37, no. 2, pp. 218–223, 2008.
- [10] N. D. Burns, "A tin pest failure," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 9, no. 5, pp. 461–465, 2009.
- [11] Y. Kariya, C. Gagg, and W. J. Plumbridge, "Tin pest in lead-free solders," *Solder. Surf. Mt. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 39–40, 2001.
- [12] N. Böwering, "Induction of tin pest for cleaning tin-drop contaminated optics," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 198, pp. 236–242, 2017.
- [13] X. Zhang *et al.*, "Selective Desoldering Separation of Tin-Lead Alloy for Dismantling of Electronic Components from Printed Circuit Boards," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 8, pp. 1696–1700, 2015.
- [14] J. Lee, Y. Kim, and J. chun Lee, "Disassembly and physical separation of electric/electronic components layered in printed circuit boards (PCB)," *J. Hazard. Mater.*, vol. 241–242, pp. 387–394, 2012.
- [15] S. Park, S. Kim, Y. Han, and J. Park, "Apparatus for electronic component disassembly from printed circuit board assembly in e-wastes," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 144, pp. 11–15, 2015.
- [16] M. Verheyen, W. Beckers, E. Claesen, G. Moonen, and E. Demeester, "Vision-based sorting of medium density fibreboard and grade A wood waste," *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, vol. 2016–Novem, pp. 1–6, 2016.

- [17] H. Cheng, Z. Zhang, and W. Li, "Dynamic error modeling and compensation in high speed delta robot pick-and-place process," *2015 IEEE Int. Conf. Cyber Technol. Autom. Control Intell. Syst. IEEE-CYBER 2015*, pp. 36–41, 2015.

Bijlagen

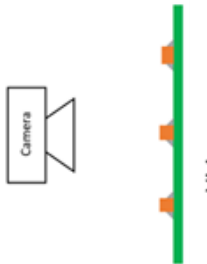
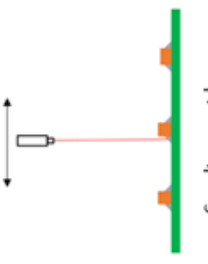
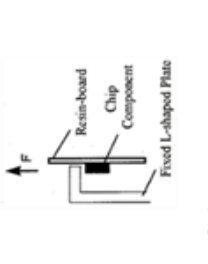
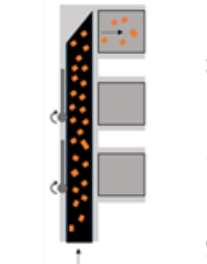
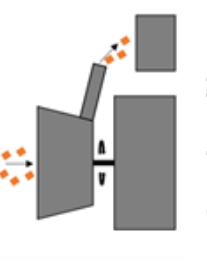


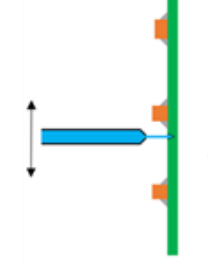

Bijlage A: Morfologische overzichten selectieve en bulkdemontage

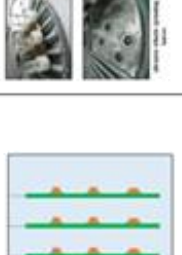
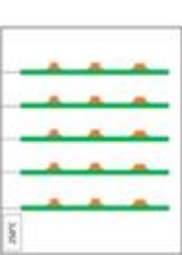


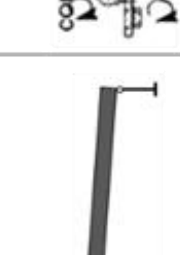

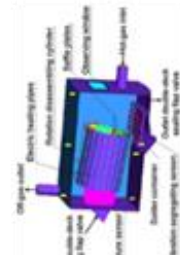




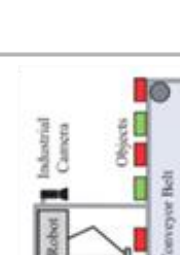

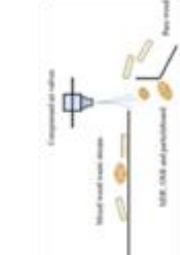
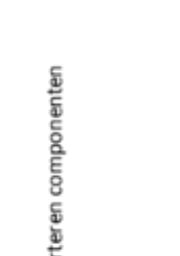
Bijlage B: 2D-tekeningen schrapers voor 'selectief afschrapen componenten' (externe kافت)

Bijlage C: 2D-tekeningen shredderproefopstelling voor 'bulk afschrapen met shredder'
(externe kافت)

Bijlage A: Morfologische overzichten selectieve en bulkdemontage

Selectieve demontagemethode

Functies	Werkwijzen	
Detecteren gewenste component	 <p>Visiesysteem</p>	
soldeerverbinding lokaal verwijderen	 <p>Smelten met laser</p>	 <p>Smelten met warme lucht</p>
Demonteren gewenste component	 <p>Afschrapen componenten</p>	 <p>Uitpakken component</p>
Opvangen gewenste component	 <p>Afvoeren via sorteerkleppen</p>	 <p>Roteerbare glijbaan</p>
	 <p>Uitsnijden component</p>	 <p>Uittrekken component</p>

Functies		Werkwijzen			
Verwijderen soldeerverbinding	 <p>200°C</p>	Smelten soldeerverbinding	Tin pest		 <p>Losfrez en soldeerverbinding</p>
Verwijderen componenten	 <p>Roterende trommel</p>	 <p>convection scrubber</p>	 <p>Trilplaat</p>	 <p>Shredder</p>	 <p>Afborstelen</p>
Detecteren componenten	 <p>Camera</p>	 <p>Visiesysteem</p>			
Sorteren componenten	 <p>Componenten sorteren</p>	 <p>Delta robot</p>	 <p>Delta robot</p>	 <p>Delta robot</p>	 <p>Delta robot</p>

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
**Studie naar systemen voor de automatische ontmanteling van
tantaalhoudende componenten op printplaten**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**
Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de
Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt
behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -,
vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten
verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de
rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat
de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt
door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de
Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de
eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen
wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze
overeenkomst.

Voor akkoord,

Coenen, Ward

Knoops, Pieter

Datum: **4/06/2018**