

# Recikliranje e-odpadkov - odpadkov, ki vsebujejo elektroniko

Danilo Majhenič, Bogdan Pogorelc, Aleksej Koležnik, Matjaž Babič, Jože Haladeja  
doc. dr. Boris Curk, izred. prof. dr. Peter Cafuta (mentorja)  
UM FERI, 2000 Maribor, Smetanova ul. 17  
danilo.majhenic@gmail.com, bogdan.pogorelc@gmail.com

## *Recycling of electronic scrap*

*This paper represents the results of our project work for the Manufacturing processes automation lectures on UM-FERI [1], from which we conclude our approach to automated e-waste recycling. We propose a recycling factory divided into 3 parts. The first part is the Production line for recycling of computers, small house-hold appliances and handheld devices (like mobile phones), which is fully automated. The second part is the Manual decomposition of monitors and printers. And the third part is the usage of Robotic cell for decomposition of cathode ray tubes from monitors and televisions. In this proposed recycling factory of e-waste, the material is recycled to clean material fractions, which are appropriate for further processing.*

## 1 Uvod

Potrošniška doba s sabo prinaša določene negativne posledice, ki na prvi pogled niso vidne, so pa ogromno breme za okolje. O tem bremenu je potrebno razmišljati že danes, tako da se zanamcem omogoči bivanje v čim prijetnejšem okolju. E-odpadki vsebujejo večino elementov periodnega sistema, zato jih je potrebno temu primerno razgraditi in ločevati. E-odpadke lahko tako recikliramo in s tem omogočimo ponovno rabo snovi in manj odpada.

Elektronski odpadki (e-waste, ang.) so odpadki, ki vsebujejo razne pokvarjene, neuporabne, zapuščene in nedelujoče elektronske naprave. Zavedati se je potrebno nevarnosti takšnih odpadkov, saj v naravi sami po sebi ne razpadejo - niso naravno razgradljivi. Mednje spadajo tudi računalniki, katerih uporabna življenjska doba oziroma doba uporabnosti je

vedno krajša. Materiali iz katerih so sestavljene elektronske komponente so dragoceni, nekateri tudi ponovno uporabljivi, zato je smotno razmisliti o avtomatizaciji recikliranja elektronskih naprav, kar predstavlja ta članek.

Iz literature [2] razberemo, da v današnjem času recikliranje računalnikov ni profitna dejavnost. Doba zamenjave računalnikov v podjetjih je po podatkih na internetu približno dve do tri leta, v Dravskih elektrarnah Maribor, je doba 4 leta, kar pomeni da na vsaka štiri leta zamenjajo računalnike delavcev. Po predvidevanjih je doba uporabnosti domačih računalnikov 3 do 5 let, medtem ko tisti, ki delamo na tem projektu, menjamo računalnik na vsaka 3 do 4 leta. Podatek za ameriško področje je, da se med 14 in 20 milijoni letno odvrgenih računalnikov 20-30% ponovno proda, medtem ko se ostali zavržejo med smeti.

O obsegu teh zavrženih/odpadnih računalnikov lahko sklepamo iz podatkov analitske hiše IDC [3], katere rezultati so pokazali da je bilo v letu 2003 prodanih približno 113.000 računalnikov, 93.000 tiskalnikov in 22.000 strežnikov. Predvidevamo, da ta trend vztrajno raste.

Pomembno je, da poznamo sestavo računalnikov in drugih elektronskih odpadkov. Ohišje vsebuje ABS plastiko in obarvano pločevino, ko ohišje odpremo znotraj najdemo zgoraj napajalnik v kovinskem ohišju, periferne enote, v ozadju osnovno ploščo s perifernimi karticami. Ostali materiali na in v tiskanih vezjih so barvne kovine (baker, aluminij, kositer, svinec, nikelj, zlato, srebro, paladij, bizmut, antimon ter tantal) [4]. Tako je najbolj optimalna rešitev drobljenje računalnikov in separiranje (ločevanje) posameznih frakcij do relativno čistih surovin, ki so primerne za

prodajo. Podobne materiale vsebuje večina izdelkov zabavne elektronike, ročnih naprav (npr. mobilni telefoni) in tudi nekaj gospodinjstskih aparatov.

Če del računalnika nima uporabne vrednosti zaradi njenega stanja ali pa zaradi marketinških razlogov, se takšen del ovrednoti za recikliranje. Za recikliranje se lahko ovrednoti tudi, če cena njegovih surovin upraviči strošek recikliranja.

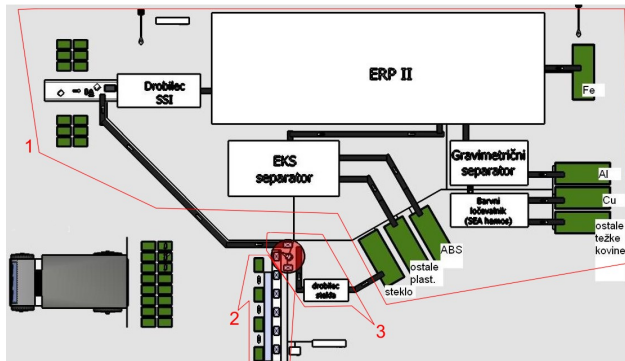
## 2 Okvirna zasnova reciklarne

Odločili smo se za reciklarno v treh sklopih, katere tloris prikazuje slika 1:

1 **Linija za recikliranje računalnikov in ostalih elektronskih komponent:** je popolnoma avtomatizirana

2 **Delno ročno razstavljanje monitorjev in tiskalnikov:** monitorji se razstavijo do katodnih cevi in iz tiskalnikov se odstrani kartuša ali toner

3 **Robotska celica za razstavljanje katodnih cevi**



Slika 1: Tloris postavitev

## 3 Linija za recikliranje računalnikov

Linija za recikliranje računalnikov je sestavljena iz drobilcev materialov in separatorjev (ločevalnikov), naloga katerih je pridobiti čiste snovi, ki so primerni za prodajo. Gre za naslednje stroje, ki so povezani med seboj s tekočimi trakovi:

- **grobi drobilec elektronskih odpadkov** ima štiri drobilne valje in je sposoben zdrobiti tudi cele računalnike. [5]
- **ERP II (drobilec in ločevalniki)**

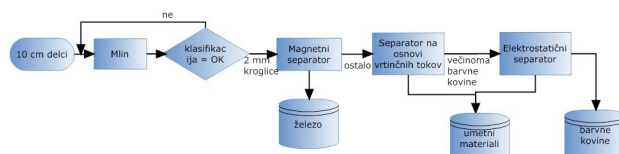
- **gravimetrični ločevalnik**
- **barvni ločevalnik**
- **elektrostatični ločevalnik za plastiko (EKS separator)**

### 3.1 ERP II

Gre za Electronic scrap Recycling Plant oz. skupek strojev za recikliranje elektronskih odpadkov. Napravo proizvaja nemško podjetje Hamos [6]. Po drobljenju delcev in več suhih separacijskih postopkih iz naprave dobimo naslednje frakcije:

- železni delci
- barvne kovine
- umetni materiali oz. nekovine

Shema naprave, prikazana na sliki 2, prikazuje delovanje naprave:

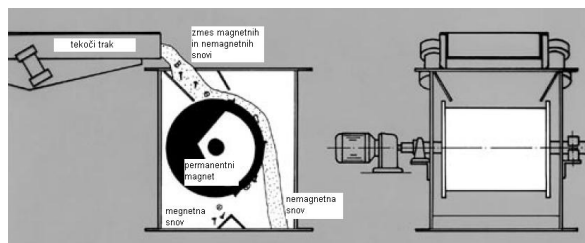


Slika 2: Shema ERP II

Prednosti sklopa integriranih strojev so suhi postopki ločevanja, ki nam omogočajo velik izkoristek in čistočo pridobivanja kovin. Postopek je pri tem avtomatiziran, zaradi česar ni potrebe po velikem številu osebja, hkrati nam pa omogoča nizke stroške vzdrževanja in posledično hitro amortizacijo.

**Principi vsebujočih naprav [7,8,9,10,11]:**

**Magnetni ločevalnik** deluje po principu magnetne sile, s katero magnet deluje na magnetni material.

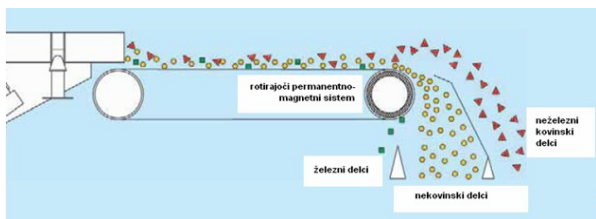


Slika 3: Shema delovanja magnetnega separatorja

Iz sheme delovanja (slika 3) vidimo, da se znotraj bobna nahaja permanentni magnet, ki povzroči, da se magnetni material zaradi magnetne sile prime na vrteči se boben. Ker je magnetna sila močnejša od gravitacijske, magnetni material ne pade v isto posodo kot nemagnetni saj ga magnetna sila privleče ob površje bobna in od bobna odpade šele tedaj, ko nanj ta sila neha delovati. Ta stroj nam torej izloči železne delce, ki so pripravljene za prodajo, od ostalih delcev.

### Ločevalnik na osnovi vrtničnih tokov:

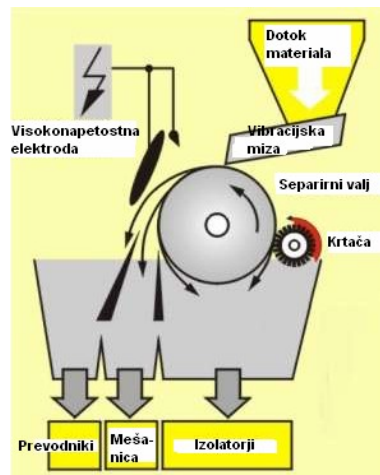
Zmes neželeznih kovinskih (barvne kovine), nekovinskih delcev (umetne mase) ter preostanek železnih delcev pripeljemo preko tekočega traku do rotirajočih permanentnih magnetov, ki ustvarjajo impulzno magnetno polje. Tukaj se v neželeznih kovinskih delcih zaradi tujega izmeničnega magnetnega polja inducirajo vrtnični tokovi, ki posledično ustvarijo lastno magnetno polje. To polje je po predznaku nasprotno tujemu magnetnemu polju in zaradi tega nastopi odbojna sila, ki neželezne kovinske delce izbije dalje iz zmesi kot pa nekovinske delce, kar je lepo razvidno tudi iz shematičnega prikaza na sliki 4.



Slika 4: Ločevalnik na osnovi vrtničnih tokov

**Elektrostatični ločevalnik** je stroj, ki je na osnovi elektrostatike sposoben ločevati delce prevodnikov in izolatorjev. Na njegov vhod torej pripeljemo večinoma barvne kovine (prevodnike) z majhno vsebnostjo umetnih materialov (izolatorjev). Ločevalnik (slika 5) deluje tako, da zmes delcev, ki jih želimo ločevati naprej preko vibracijske mize enakomerno razporedi na električno prevoden in ozemljen vrteči se valj. Ko se delci zavrtijo v območje visokonapetostne elektrode, dobijo zaradi močnega električnega polja statični naboj. Električno prevodni delci zaradi

ozemljenega valja zelo hitro izgubijo svoj naboj, zato hitro odletijo iz vrtečega se valja.

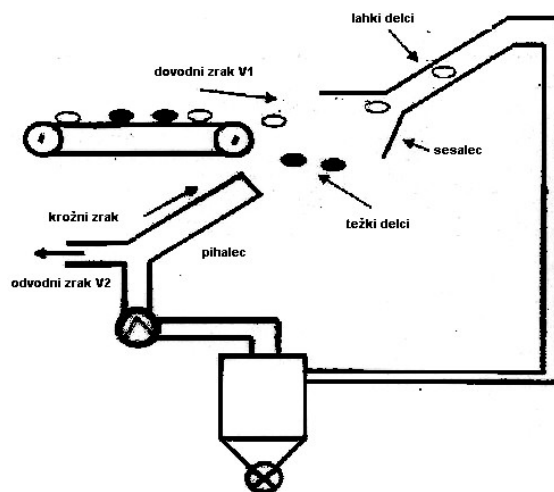


Slika 5: Princip elektrostatičnega ločevalnika za ločevanje prevodnih od neprevodnih snovi

V nasprotju z električno prevodnimi materiali pa izolatorji le počasi izgubijo svoj naboj in tako ostanejo zaradi električne sile »prilepljeni« na separirni valju ter jih je potrebno na drugi strani s krtčo odstraniti. Na tak način je mogoča suha separacija obeh frakcij. V srednji posodi je mešanica prevodnikov in izolatorjev, ki jo čaka ponovna separacija.

### 3.2 Gravimetrični ločevalnik [12]

Deluje tako, da iz zmesi z enakomerno granulacijo s pomočjo gravitacijske sile izloči najlažjo snov. Na njegov vhod pripeljemo zmes barvnih kovin, na izhodu pa dobimo aluminij (z najnižjo specifično težo) ločen od težkih kovin.

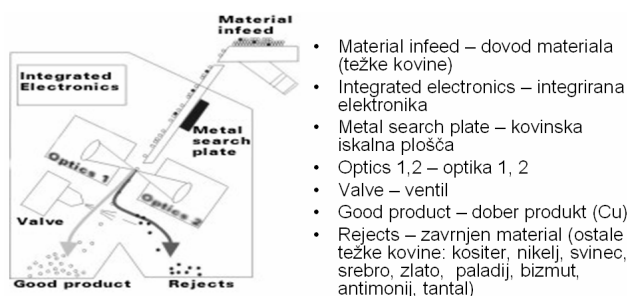


Slika 6: Princip gravimetričnega ločevalnika

Gravimetrični separator (slika 6) deluje tako, da zmes preko tekočega traku pripeljemo do odmetnega roba. Pod odmetnim robom imamo pihalec, ki piha proti sesalcu. Ko zmes sestavljena iz lahkih in težkih delcev pade preko odmetnega roba v njo prične pihati zrak iz pihalca. Lažjemu delcu zrak, ki piha iz pihalca ustvari toliko vzgona, da preleti pot proti sesalcu, kjer ga le ta poseša, težjemu delcu, pa zaradi večje gravitacijske sile zrak iz pihalca ne ustvari toliko vzgona, da bi le ta uspel preleteti pot do sesalca in zaradi tega pade iz zračnega toka pihalca ter nadalje na dno stroja.

### 3.3 Barvni ločevalnik

Izloči snov določene barve (v naše primeru rjavo za baker), za kar uporablja opto-elektronski princip detekcije. Za našo reciklarno smo predvideli barvni ločevalnik SEA podjetja Hamos, katerega delovanje je prikazano na sliki 7 [13].



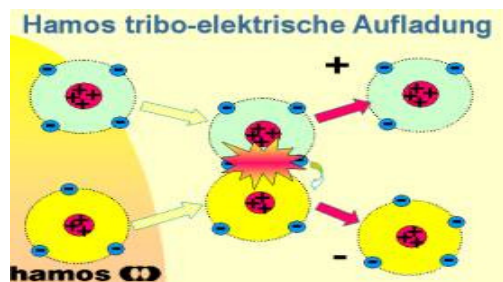
Slika 7: Princip barvnega ločevanja

### 3.4 Elektrostatični ločevalnik za ABS plastiko

**Elektrostatični ločevalnik** Hamos EKS za ABS plastiko (EKS separator) [14] sprejme umetne materialne velikosti 2 mm. Na izhodu dobimo dve frakciji, in sicer na eni strani čisto ABS plastiko in na drugi ostale umetne materiale. Za ločevanje izkoriščamo različno obnašanje različno nabitih posameznih delcev plastike. Ločevanje je suho, brez dodatnih tekočin.

Najprej mešanica umetnih mas (velikost delcev je 2 mm) potuje po tekočem traku do enote za triboelektrično nabijanje (t.i. triboelectric loading unit), kjer se delci različnih umetnih mas drgnejo in treskajo drug ob

drugega. Tako oddajajo in sprejemajo elektrone in postajajo različno elektrostatično nabiti, (slika 8); dobijo pozitivni ali negativni naboj, odvisno od vrste umetnega materiala. Nato potujejo do visokonapetostne ločilne komore, kjer prečkajo elektrodni sistem, ki posamezne delce loči glede na njihovo različno polariteto.



Slika 8: Triboelektrično nabijanje

## 4 Delno ročno razstavljanje monitorjev in tiskalnikov

Delovno mesto za demontažo monitorjev in tiskalnikov vsebuje demontažno mizo na katero postavimo monitor ali tiskalnik. Pri tem ima delavec na eni strani zaboj s celimi monitorji in na drugi zaboj za dele monitorja brez katodne cevi, ki gredo v linijo za recikliranje računalnikov. Drug delavec ima v enem zaboju cele tiskalnike, v drugega pa meče tonerje in kartuše, ki jih prodamo naprej ter ostali del tiskalnika, ki gre tudi v linijo za recikliranje računalnikov.

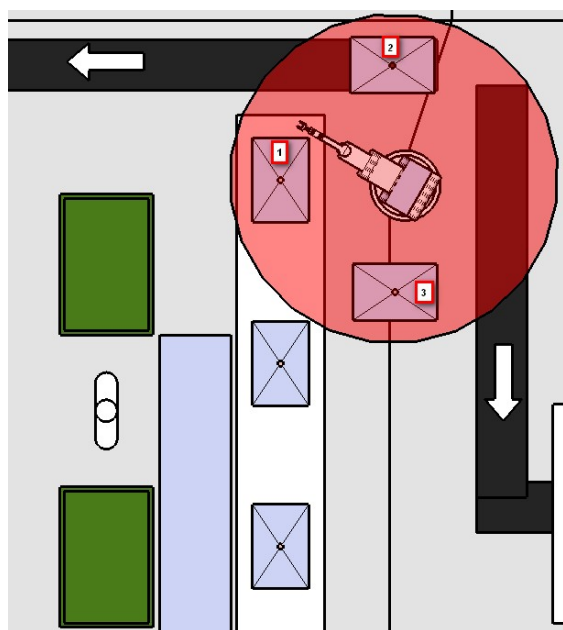
## 5 Robotska celica za razstavljanje katodne cevi

V članku [15] smo za avtomatsko recikliranje katodne cevi zasledili več postopkov, na osnovi katerih predlagamo našo rešitev.

Po ročni odstranitvi ohišij in prevodnih plošč od katodne cevi monitorja delavec le-to vstavi v odprtino v tekočem traku, tako da gleda zaslon navzgor. Avtomatsko razstavljanje nato poteka na naslednji način (slika 9):

Krmilnik poganja tekoči trak s katodnimi cevmi tako dolgo, da se ena od njih pripelje v robotski kontejner, kjer jo zazna infrardeči senzor in ustavi trak na mestu 1. Nato robot s pomočjo vakuumskega prijemala prime katodno cev za prednji (zaslonski) del in jo prestavi na

mizo 2 v odprtino. Žaga odreže spodnji nestekleni del katodne cevi, ki se po tekočem traku prenese v drobljenje in separacijo. Grelna žica na dviznem mehanizmu se dvigne do višine spoja katodne cevi, ki jo zazna IR senzor, in napenjalec jo napne v odvisnosti od velikosti katodne cevi ter segreje, da katodna cev počí po spoju na dva dela (sprednji in zadnji-konusni del). Sprednji del robot premakne na delovno mesto 3, kjer zaokroži po krtači industrijskega sesalca, da odsesa sevalni prah z notranje strani zaslona. Zaslonski del odloži na trak, ki ga pripelje v drobilec stekla. Drugi del zaslona dvizni mehanizem mize 2 premakne na tekoči trak, ki ga odpelje v drobilec za steklo. Krmilnik nato požene tekoči trak s celimi katodnimi cevmi, ki ga ustavi pri senzorju, in postopek se ponovi.



Slika 9: Shema robotske celice

## 6 Vodenje

Izbrani ločevalniki že vsebujejo programirljive logične krmilnike (PLC-je). Tako na nivoju krmiljenja predlagamo še robotski krmilnik, ki bo skrbel za vodenje robotske celice in tekočih trakov, ki jo obdajajo. Vseh pet krmilnikov je povezanih preko industrijskega ethernet omrežja (ethernet IP) z nadzornim računalnikom, na katerem teče SCADA. Ta omogoča nadzor celotnega proizvodnega procesa. Predlagamo tudi višja nivoja po CIM

(Computer Integrated Manufacturing) modelu vodenja, kot sta MES in MRP Omogočata avtomatsko planiranje zalog in stroškov, ki je pomembno za proizvodnjo po načelu JIT (Just In Time), kjer imamo minimalno skladišče in s tem minimalne stroške.

Za varnostne funkcije skrbijo hierarhično povezani varnostni tokokrogi sestavljeni iz vrat robotske kletke, ter sistema za izklop v sili. Sistem zaščite je zasnovan tako, da je na nadrejenem nivoju sistem za izklop v sili, ki izklopi tudi vse podrejene varnostne tokokroge, ki nadzirajo lokalne razmere na posameznih segmentih linije.

## 7 Analiza gospodarnosti

Smiselnost investicije lahko opravičujemo predvsem z navedbo dveh pglavitnih razlogov, in sicer ekonomskega ter ekološkega.

Iz **ekološkega** vidika je upravičenost investicije zelo velika, saj z reciklažo bistveno pripomoremo k manjšem onesnaženju okolja. Brez recikliranja bi ti odpadki pristali skupaj z ostalimi odpadki na odpadni deponiji Največja težava odpadkov te vrste je njihova razgradnja, saj se v njih nahajajo materiali, ki so ekološko zelo težko oz. počasi razgradljivi. To so razne plastike in umetne mase. Med drugim se med temi odpadki nahajajo tudi zdravju škodljive snovi. V monitorjih se tako v zaslonskem delu kot sevalne premaze uporablja različne fosforjeve spojine, ki so tako zdravju kot tudi okolju zelo škodljive. Na matičnih ploščah računalnikov se nahajajo različni elektrolitski kondenzatorji, ki vsebujejo kot elektrolite razne škodljive snovi. Prav tako spadajo v skupino nevarnih snovi tudi baterije iz matičnih plošč, ki so predvsem pri starejših osebnih računalnikih še tipa »nikelj-kadmij«, ki je prav tako zdravju zelo škodljiv.

Drugi vidik, ki opravičuje smiselnost investicije pa je seveda **ekonomski**. S tem, ko odpadni material recikliramo pridemo do sekundarnih surovin. Pri določenih materialih, npr. aluminiju, je sekundarno pridobivanje ekonomsko veliko bolj varčno kot pa primarno iz rude. Nadalje pri reciklaži pridobimo čisto

ABS plastiko za ponovno uporabo v večini elektronskih izdelkov ter mešanico umetnih mas, ki se lahko uporabi v gradbeništvu kot različne zvočno in toplotno izolacijske mase. Tudi vsi ostali produkti recikliranja kot so železo, baker, ostale težke kovine, steklo se nadalje uporabijo za proizvodnjo novih izdelkov.

Opisan sistem recikliranja je zasnovan tako, da ni usmerjen samo v recikliranje osebnih računalnikov ampak v splošnem v reciklažo vseh naprav s področja zabavne elektronike in delno tudi s področja gospodinjske tehnike. Vse naprave se namreč zmeljejo na ustrezno granulacijo, nato pa se z že opisanimi postopki postopoma izločajo določene frakcije.

Pomemben dejavnik je tudi **zmanjšanje obsega težkega fizičnega dela**, saj težka opravila namesto delavcev opravijo zato primerni delovni stroji. Robotizacija proizvodne linije pomeni dodatno **zmanjšanje potreb po delovni sili** in s tem občutno **pocenitev** recikliranja. **Zanesljivost** delovanja računalniško vodenih naprav je pri ustreznem načrtovanju večja, kar posledično pomeni manjše stroške vzdrževanja.

## 8 Zaključek

Pokazali smo, da lahko recikliranje e-odpadkov v veliki meri avtomatiziramo, ter s tem pripomoremo k čistejšemu okolju. Naše raziskave so pokazale, da je tak projekt tudi finančno vabljiv. Nenazadnje takšne projekte vzpodbuja in sofinancira tudi EU ([16], WEEE).

## 9 Literatura

- [1] B. Pogorelc, A. Koležnik, D. Majhenič, J. Haladeja, M. Babič, *Recikliranje elektronskih odpadkov (elaborat projekta za predmet*

- Avtomatizacija proizvodnih postopkov*), UM-FERI, Maribor 2007.
- [2] J. E. Boon, J. A. Isaacs, S. M. Gupta, *Economics of PC Recycling*, <http://www1.coe.neu.edu/~smgupta/4193-07-SPIE.PDF>
- [3] *Microsoft Slovenija, Rast števila prodanih računalnikov se nadaljuje*, <http://www.ife-bulk.com/startseite/index.html>
- [4] *Printed circuit board recycling: A state-of-the-art survey*, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/6104/29408/01331573.pdf?arnumber=1331573>
- [5] *SSI, Q100*, <http://www.ssiworld.com/products/q100.htm>
- [6] *Hamos, ERPII*, <http://hamos.com/en/products/plants/scrap.htm>
- [7] *IFE*, <http://www.ife-bulk.com/startseite/index.html>
- [8] *Metallrecycling*, <http://www.metallrecycling-online.de/>
- [9] *Electrocycling*, <http://www.electrocycling.de/>
- [10] *Goudsmit*, <http://www.goudsmit-magnetics.nl/>
- [11] *M. Hausmann: Potenzial thermischer Verfahren zur stofflichen Abfallverwertung (diplomska naloga)*
- [12] *Westeria, gravimetrični separator*, <http://www.westeria.de/de/p1.html>
- [13] *Hamos, barvni separator*: <http://hamos.com/en/products/colour.htm>
- [14] *Hamos, EKS*, [http://hamos.com/de/products/electrostatic\\_separation/eks.htm](http://hamos.com/de/products/electrostatic_separation/eks.htm)
- [15] *M. Hanke, Ch. Ihrig, D.F. Ihrig: Stoffbelastung beim Elektronenschrott-Recycling*, [www.forum.europa.eu.int/Public/irc/env/weee\\_2008/library?l=/further\\_studies/e-schrott-recycling/\\_DE\\_1.0\\_&a=d](http://www.forum.europa.eu.int/Public/irc/env/weee_2008/library?l=/further_studies/e-schrott-recycling/_DE_1.0_&a=d)
- [16] *Waste Electrical and Electronic Equipment Directive. (2007, March 8). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 23:07, March 8, 2007, from* [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Waste\\_Electrical\\_and\\_Electronic\\_Equipment\\_Directive&oldid=113689936](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Waste_Electrical_and_Electronic_Equipment_Directive&oldid=113689936)