



**Miljø- og Fødevareministeriet**  
Miljøstyrelsen

# RareRecovery

Intelligent opkoncentrering af sjældne  
jordarter og metaller fra kasserede  
harddiske

Miljøprojekt nr. 1798, 2015

**Titel:**

RareRecovery

**Redaktion:**

Peter Torben Tang (IPU), Mikkel Østergaard Hansen (IPU) & Io Mizushima (IPU)

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
www.mst.dk

**Foto:**

Io Mizushima (IPU) & Niels Gauter (IPU)

**Illustration:**

Peter Torben Tang (IPU)

**År:**

2015

**ISBN nr.**

978-87-93352-91-9

**Ansvarsfraskrivelse:**

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

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>Konklusion og sammenfatning</b> .....	<b>7</b>
<b>Summary and Conclusion</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Kortlægning af indholdet og opbygningen af kasserede harddiske</b> .....	<b>13</b>
1.1 Opbygning af harddiske.....	13
1.1.1 Låg .....	14
1.1.2 Printplade .....	15
1.1.3 Voice coil actuator (VCA).....	15
1.1.4 Pladelager .....	16
1.1.5 Ramme .....	16
1.1.6 Diverse.....	17
1.2 Kortlægning af mængder og materialer .....	17
1.2.1 Overordnede informationer .....	18
1.2.2 Materialetyper.....	18
1.2.3 Resultater .....	19
1.2.3.1 Analyse af låg.....	21
1.2.3.2 Analyse af printplader.....	21
1.2.3.3 Analyse af Voice Coil Actuator (VCA) .....	23
1.2.3.4 Analyse af pladelager .....	24
1.2.3.5 Analyse af ramme.....	25
<b>2. Vurdering af økonomisk potentiale samt litteraturstudie</b> .....	<b>26</b>
2.1 Inddeling i fraktioner.....	26
2.1.1 Låg .....	26
2.1.2 Printplade.....	27
2.1.3 Voice coil actuator (VCA) .....	28
2.1.4 Pladelager.....	30
2.1.5 Ramme (inkl. motor) og diverse .....	31
2.2 Litteraturstudie .....	32
2.2.1 Overordnet information .....	32
2.2.2 Mekanisk adskillelse .....	33
2.2.3 Udvinning af metaller .....	33
<b>3. Genvinding af metaller fra kasserede harddiske</b> .....	<b>35</b>
3.1 Neodym fra magneter .....	35
3.1.1 Krystaller af neodymsulfat .....	36
3.1.2 Dobbelsalte .....	36
3.1.3 Bundfældning ved opvarmning.....	38
3.1.4 Konvertering til neodymoxid.....	38
3.2 Optimering af neodym genvinding .....	39
3.2.1 Magnet mængde opløst i svovlsyre.....	40
3.2.2 Nikkelaget på magneten .....	40
3.2.3 Fældningstiden for dobbeltsaltet .....	41
3.2.4 Skylning af filtret.....	41

3.2.5	Opløsningstid .....	42
3.2.6	Svovlsyre koncentration .....	42
3.2.7	Oversigt .....	42
3.3	Guld fra stik på printpladen .....	43
3.4	Metaller fra pladelageret .....	44
<b>4.</b>	<b>Opstilling til mekanisk adskillelse .....</b>	<b>46</b>
4.1	Procedure for mekanisk adskillelse.....	46
4.2	Opbygning af demonstrator system.....	47
4.3	Performance af demonstratorsystem.....	48
4.4	Konklusion for mekanisk adskillelse.....	49
<b>Referencer</b>	<b>.....</b>	<b>50</b>
<b>Bilag 1:</b>	<b>Periodisk system med danske navne og priser (april 2013).....</b>	<b>52</b>
<b>Bilag 2:</b>	<b>Oversigt over materialestrømme og fraktioner.....</b>	<b>53</b>
<b>Bilag 3:</b>	<b>Procedure for mekanisk adskillelse af harddiske.....</b>	<b>54</b>

# Forord

Dette er den afsluttende rapport udsendt i forbindelse med projektet RareRecovery, med undertitlen "Intelligent opkoncentrering af sjældne jordarter og metaller fra kasserede harddiske". Projektet er støttet af MUDP.

Den nedsatte styregruppe for projektet, har holdt møde tre gange i løbet af projektet og diskuteret projektet resultater. Styregruppen bestod af:

- Anne Nielsen (Miljøstyrelsen, formand)
- Peter Torben Tang (IPU, sekretær)
- Karsten Kronborg (DCR Miljø A/S)
- Allan Søegaard (Sintex)
- Louise Bisgaard (Grundfos)
- Bjørn Malmgren-Hansen (Teknologisk Institut, Aarhus)

RareRecovery startede den første januar 2014 og har haft til formål at undersøge mulighederne for at opkoncentrere sjældne jordarter (specielt neodym) og andre metaller fra de harddiske der modtages på danske genbrugspladser. Som det er i dag, bliver harddiskene typisk knust – og derefter forsøger man i store anlæg at frasortere f.eks. aluminium og kobber. Men de sjældne jordarter, og en række andre metaller, går tabt i denne proces og havner i bunken "blandet metal".

Der er i projektet valgt at fokusere på såkaldt interne harddiske (dvs. harddisk som sidder inde i kabinettet på stationære computere) i 3,5 tommer formatet. Harddiske i bærbare computere er typisk i formatet 2,5 tommer, men opbygningen er omtrent den samme – blot er dimensionerne skaleret ned, og mængden af materialer er derfor også mindre.

Som en vigtig del af RareRecovery er mere end 100 kasserede harddiske taget fra hos DCR Miljø A/S. Disse harddiske er udtaget på fire forskellige dage med ca. 25 stk. hver gang. Harddiskene er udtaget tilfældigt - op af en stor kasse med harddiske fra de computere der er blevet adskilt i løbet af den pågældende dag.

Rapporten er inddelt i følgende fire kapitler;

- **Kapitel 1. Kortlægning af indholdet og opbygningen af kasserede harddiske**
  - Dette kapitel omhandler opbygningen af harddiske samt analysen af de forskellige materialer som harddiske består af.
- **Kapitel 2. Vurdering af økonomisk potentiale samt litteraturstudie**
  - I dette kapitel ridser et system op, hvor materialerne fra harddiske fordeles i en række fraktioner og hvor mængderne gøres op baseret på data fra det første kapitel (se også Bilag 2:). På baggrund af informationer fra DCR Miljø A/S, samt estimater bl.a. baseret på oplysninger fra internationale metalbørser og smelteværker er der fastlagt en pris pr. kilo for de enkelte fraktioner. Kapitlet indeholder også et kort litteraturstudie for at vise hvad der foregår på området rundt omkring i verden.

- **Kapitel 3. Genvinding af metaller fra kasserede harddiske**
  - I dette kapitel gennemgås både resultaterne fra de indledende laboratorieundersøgelser samt forsøg på større skala (for neodym). De sjældne jordarter og andre metaller der er brugt mest tid på at genvinde i laboratoriet er:
    - neodym fra magneter
    - guld fra stik på printpladen
    - platin, nikkel og krom fra pladelageret
- **Kapitel 4. Automatiseret adskillelse af harddiske.**
  - I dette kapitel gennemgås et system til automatisk adskillelse af harddiske. Der er inden for projektet primært fokuseret på at konstruerer en demonstratoropstilling, der ved hjælp af en skruerobot med maskin-vision, automatisk kan lokalisere skruer på harddiskenes låg og printkort og afmontere disse.

# Konklusion og sammenfatning

En grundig analyse af 100 tilfældigt udvalgte kasserede harddiske fra DCR Miljø A/S er gennemført. Den umiddelbare konklusion er, at harddiskene på mange måder er relativt ens i deres opbygning – dog er der en tendens til at de nyere harddiske har mindre magneter, mindre guld på kontakterne, samt væsentlig mindre printplader. Omvendt er der, hvis man går ned i detaljen, et overraskende stort antal producenter, modeller og varianter blandt de indsamlede harddiske – så meget at der kun er ganske få ud af 100 der er helt ens.

Harddiskene er, som forventet, standardiseret i de ydre fysiske mål og i de stik der bruges til at forbinde dem til resten af computeren. De fleste harddiske kan adskilles næsten fuldstændigt med en skruetrækker og ganske lidt andet værktøj.

De mange varianter gør det naturligvis vanskeligt at opbygge en fuldautomatisk maskine der kan adskille harddiskene automatisk, idet der er for mange varianter til at systemet kan lære opbygningen af alle typer og selv identificere dem.

Indholdet af harddiskene er beskrevet i detaljer i kapitel 1. Der er, som forventet, endog rigtig mange interessante materialer i harddiskene, både ædelmetaller som guld og platin samt sjældne jordarter som neodym.

Hvis man laver et gennemsnit af de harddiske der er analyseret, vejer en typisk harddisk 547 gram. Hvis man derefter antager at det er muligt for en automatisk maskine at adskille materialerne som indikeret bilag 2 - når man frem til følgende syv materialefraktioner:

Aluminium:	<b>250 gram</b> , heraf 222 gram fra rammen
Rustfrit stål (Fe+Cr+Ni):	<b>136 gram</b> , heraf 93 gram fra låget
Neodym:	<b>3,6 gram</b> fra magneter i den såkaldte voice coil actuator (VCA)
Guld:	<b>1,8 milligram</b> fra stikket på printpladen
Printplade:	<b>30,3 gram</b> vejer den resterende del af printpladen
Kobber (Cu+Zn+Ni+Fe):	omkring <b>10 gram</b> fra spole, motor og flexprint
Rest:	omkring <b>117 gram</b> plastdele og metaller der ikke kan sorteres

Den såkaldte rest består f.eks. af sammenlignede låg af aluminium og rustfrit stål, af forskellige plastdele og luftfiltre, blandede skruer og stifter samt af delelementer fra motoren der roterer pladelageret og fra selve læsearmen. Fælles for disse dele er, at de samlet på en måde der ikke er let at adskille, og at de derfor ikke umiddelbart kan sorteres af en automatisk maskine. De vil dog kunne gå ind i det normale affaldsbehandlingssystem og der blive delt i de kendte fraktioner.

## Økonomisk værdi

Med en fornuftig mekanisk adskillelse af gamle harddisk fra elektronikskrot, og en række relativt enkle udvindingsprocesser, vil en gennemsnitlig harddisk kunne indbringe næsten 7 kroner. Dette tal afhænger dog meget af priserne på verdensmarkedet, samt naturligvis af den renhed der kan opnås af de enkelte fraktioner. Specielt prisen på neodym (fra magneterne) svinger meget, men også prisen på printpladerne kan variere – både fordi guldprisen går op og ned, men også afhængigt af hvem man sælger printpladerne til.

**TABEL 1**

DEN SAMLEDE MÆNGDE AF MATERIALE FORDELT PÅ DE 11 FRAKTIONER (SE KAPITEL 2) FOR EN GENNEMSNITLIG HARDDISK.

Samlet værdi pr. harddisk	kr./kg	nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Aluminium	6,0	1	242,6	1,46	21%
Rustfrit stål	6,5	2	138,2	0,90	13%
Printplade	56,7	3	31,2	1,77	26%
Kobber	30,0	4	3,6	0,11	2%
Neodym	579,4	5	3,9	2,26	33%
Guld	250.000,0	6	-	-	0%
Platin	260.000,0	7	0,00025	0,07	1%
Nikkel	80,0	8	2,7	0,22	3%
Kobalt	160,0	9	0,00200	0,00	0%
Blandet metal og plast	1,0	10	82,5	0,08	1%
Opløsninger	-	11	39,0	-	0%
i alt			543,7	<b>6,85</b>	100%

Det ses af Tabel 1, at en række fraktioner har en meget lav økonomisk betydning, og at det derfor er tvivlsomt hvorvidt det kan betale sig at forsøge at udvinde disse metaller – eller forsøge at sortere dem fra.

I tabellen er mængden af guld sat til nul. Dette skyldes at guld stort set kun er fundet på printpladen, og hvis guldet fjernes herfra vil værdien af printpladen blot falde tilsvarende. Metoder til at udvinde guld fra printpladerne er beskrevet i kapitel 3, men idéen er opgivet.

Hvis hele harddisken blev betragtet som "blandet metal og plast" ville den indbringe én krone pr. kilo, dvs. omkring 50 øre i alt. Der er dermed et klart økonomisk potentiale i at opkoncentrere nogle af materialerne, for på den måde at øge værdien henimod de 7 kroner (bemærk at der er en vis usikkerhed forbundet med denne værdiansættelse).

Omvendt er det også klart, at de processer der bruges til at adskille, sortere og udvinde metallerne skal være enkle og billige – ellers vil det simpelthen ikke kunne betale sig at gennemføre dem. Forsøg med kemisk udvinding af neodym fra magneterne, har derfor fokuseret på processer såsom opløsning i simple (og billige) syrer og baser samt efterfølgende filtrering og tørring. Det er processer der kan udføres på store mængder materiale på én gang (f.eks. i en batch med magneter fra 1000 harddiske samtidig) og som ikke kræver avanceret udstyr eller dyre kemikalier.

### Neodym fra magneter

En simpel metode til at opløse magneter er udviklet. Metoden kræver en grov mekanisk knusning, efterfulgt af opløsning i fortyndet svovlsyre samt filtrering. Ved filtreringen fjernes nikkelbelægning (der ikke opløses i svovlsyre) samt uopløst bor.



Den resulterende opløsning af neodym og jern kan derefter behandles på flere måder, og det er muligt at fremstille en række forskellige neodymforbindelser i en god kvalitet (se kapitel 3). Neodymoxid for eksempel kan sælges på verdensmarkedet til de virksomheder (f.eks. i Japan, Tyskland og U.S.A.) der fremstiller jern-neodym-bor pulver til fremstilling af nye magneter.

### **Platin, nikkel og krom fra pladelageret**

Der er flere metaller fra gruppen af platinmetaller (ruthenium, rhodium, palladium, osmium, iridium og platin) i de øverste lag af pladelageret. Under de magnetiske lag er der desuden et tykkere lag af kemisk nikkel (nikkel med omkring 12 % fosfor).

Forsøg har vist at det er muligt at klippe pladelageret i stykker og derefter opløse den aluminiumskive der udgør substratet. Dernæst er det muligt at fjerne det kemiske nikkellag med salpetersyre, således at de magnetiske lag der bl.a. indeholder platinmetaller står tilbage. Problemet er dog, at de magnetiske lag kun udgør en meget beskedne mængde (omkring to milligram pr. skive) fordi lagene er så tynde (ca. 80 nanometer).

Der er formodentlig mere fornuftigt at sælge kemisk nikkel inkl. de magnetiske lag (dvs. kun at opløse aluminiumsskiven), som også foreslået i kapitel 3. Materialeverdien af pladelageret er, ifølge tabel 1 herover, da også mindre end 5 % af hele harddisken.

### **Mekanisk adskillelse**

En procedure til at adskille harddiske mekanisk, og dermed frasortere de dele der har højest værdi, er udviklet og gennemprøvet.

Der er opbygget en testopstillingen til automatisk identifikation og fjernelse af skruer på låg og printplader, og det er herigennem sandsynliggjort at en fuldautomatisk maskine til adskillelse af harddiske kan bygges.

### **Mest lovende resultat**

Det mest interessante, og kommercielt lovende, resultat fra RareRecovery projektet er den proces der er udviklet til genvinding af neodym fra magneter.

Metoden vil givetvis fungere uanset hvor magneterne stammer fra, og de kraftige neodym-magneter anvendes flere steder (f.eks. vindmøller, motorer i el- og hybridbiler, pumper, etc.) i dag. Som nævnt ovenfor, og beskrevet i kapitel 3, kræver processen kun nogle få simple trin som f.eks. opvarmning i en ovn eller filtrering. Forbruget af kemikalier er også begrænset til simple og billige stoffer som svovlsyre, natriumhydroxid og (måske) oxalsyre.

Det vurderes at et anlæg til genanvendelse af gamle magneter vil kunne omdanne 1000 kg magneter til omkring 280 kg neodym (regnet som rent metal) i døgnet, og at investeringerne i anlægget vil være relativt begrænset - da det udstyr der kræves (kar, filterpresse, pumper, etc.) er standard i kemibranchen.



**FIGUR 1**  
KRYSTALLER AF NEODYMSULFAT DANNET FRA EN OPLØSNING AF HARDDISK MAGNETER.

# Summary and Conclusion

A thorough analysis of 100 discarded hard disc drives, selected randomly at DCR Miljø A/S, has been conducted. The immediate conclusion is, that the drives are relatively identical in the way they are constructed – but there is a clear tendency that the newer models have smaller magnet, less gold on the contacts and smaller printed circuit boards. On the other hand, it is also clear – when the drives are studied in detail – that there is a surprisingly high number of models and variants. In fact only a few of the 100 hard disc drives are complete identical.

As expected are the drives built according to international standards and outside measures, as well as connectors, are the same. Most of the drives can be completely dismantled using a screw driver and very few other tools.

The many different models naturally make it quite difficult to build a fully automatic machine that can recognise and dismantle the drives.

The content of the investigated hard disc drives is presented in chapter 1. There are, as expected, a lot of interesting and valuable materials in the drives – both noble metals such as gold and platinum as well as rare earth metals particularly neodymium.

Looking at the 100 hard disc drives mentioned above, an average drive weighs approximately 547 gram. Assuming that an automatic machine can dismantle and sort the drives as indicated in bilag 2 – the average hard drive can be divided into the following 7 fractions

Aluminium:	<b>250 gram</b> , of which 222 gram is from the frame
Stainless steel (Fe+Cr+Ni):	<b>136 gram</b> , of which 93 gram is from the lid
Neodymium:	<b>3,6 gram</b> from magnets in the voice coil actuator (VCA)
Gold:	<b>1,8 milligram</b> from connectors on the printed circuit board (PCB)
PCB:	<b>30,3 gram</b>
Copper (Cu+Zn+Ni+Fe):	around <b>10 gram</b> from coils, motor and flexprint
Rest:	around <b>117 gram</b> , polymer parts and unsortable metals

The so-called “Rest” fraction contains lids made of stainless steel and aluminium sheets that are glued together, mixed screws and pins, components from the motor that rotates the platter (the disc where the magnetic information is stored), the reading arm as well as various plastic parts. These different components are all very difficult to disassemble and are not suitable for automatic sorting. They will be collected as one fraction that can pass through the existing sorting plant at DCR Miljø A/S.

## Value of the materials

Using a mechanical separation system to dismantle the old hard drives, as well as a series of relatively simple chemical processes, an average hard drive from WEEE has a value of almost 7 DKK (approx. 1 EURO). This number however, depends very much on the ever changing world market prices as well as on the purity that can be obtained for the various fractions. The world market price, particularly for neodymium, is very unstable – but also the price of the printed circuit boards

moves up and down, and will furthermore depend on to whom and where in world you sell the boards.

From table 1 (see above) it can be seen that several of the fractions has a very low value, and it is doubtful whether it will be economically sound to try and recover those metals. In the table the amount of gold has been set to zero. This is because the gold is almost exclusively found on the PCB, and removing the gold from here will just lead to a one-to-one reduction in the price obtained for the PCB. Methods to remove and recover gold from the connectors on the PCB's are described in chapter 3, but the idea has been abandoned for the reason mentioned above.

If the entire hard drive was considered belonging to the "Rest" fraction, the value would be around 0,50 DKK in total. Consequently there is a clear potential in recovering some of the most valuable fraction, in an attempt to get closer to the total value of 6,85 DKK indicated in table 1 (please note that there is some uncertainty connected with this value).

On the other hand, it is also clear that the processes used to disassemble, sort and recover the metals must be relatively simple and inexpensive – otherwise it will not be economically feasible to use these processes. Experiments with chemical recovery of neodymium from hard disc magnets, has for this reason been focused on dissolution using simple and inexpensive chemicals followed by filtering and drying. Using these procedures large quantities of used magnets can be processed at the same time (f.ex. in a batch of 1000 hard drive magnets), without any demand for advanced equipment or expensive chemicals.

#### **Neodymium from magnets**

A simple method to dissolve magnets has been developed. The method involves crude mechanical crushing, followed by dissolution in sulphuric acid and filtering. The nickel coating on the magnets is held back by the filter (nickel does not dissolve in sulphuric acid) together with undissolved boron.

The remaining solution will then contain neodymium and iron and from this is possible, using one of several different routes, to produce neodymium compounds in high purity (see chapter 3).

Neodymium oxide for example is a compound that can be sold to companies producing iron-neodymium-boron powder (in Japan, Germany or U.S.A.), which is used to make new magnets.

An example of another neodymium compound (neodymium sulphate) can be seen in figure 1 above.

#### **Platinum, nickel and chromium from the platter**

Several metal from the group of platinum metals (ruthenium, rhodium, palladium, osmium, iridium and platinum) are found in the thin top layers of the platter. Under the magnetic layers is a much thicker layer of electroless nickel (nickel with 12 % of phosphorous).

Experiments have shown that it is possible to cut the platter into smaller pieces and then dissolve the aluminium disc which is the base material. After that the electroless nickel can be dissolved in nitric acid, leaving only the magnetic layers containing the platinum group metals. The problem is however, that the magnetic layers are extremely thin (typically 80 nm), which means that one platter only contains a few milligrams of platinum.

It is probably more viable to just dissolve the aluminium substrate and then sell the remaining electroless nickel (with the magnetic layers on top) for the nickel value. According to table 1 the total value of the platter is less than 5 % of the entire hard drive.

#### **Mechanical separation**

A procedure to separate hard drives mechanically, and thus sort the materials into the material fractions with the highest value, has been developed and tested.

A set-up for automatic identification and removal of screws in the lid and the PCB has been built, and through this the most important process required for automatic disassembly of the hard drives has been demonstrated.

**Most promising result**

The most interesting, and commercially promising, result from the RareRecovery project is the process for recovery of neodymium that has been established.

This method will most likely work regardless of the origin of the discarded magnets involved, and the powerful iron-neodymium-boron magnet are used more and more (windmill turbines, motors in electric and hybrid cars, pumps, air-conditioning, etc.) because they save energy.

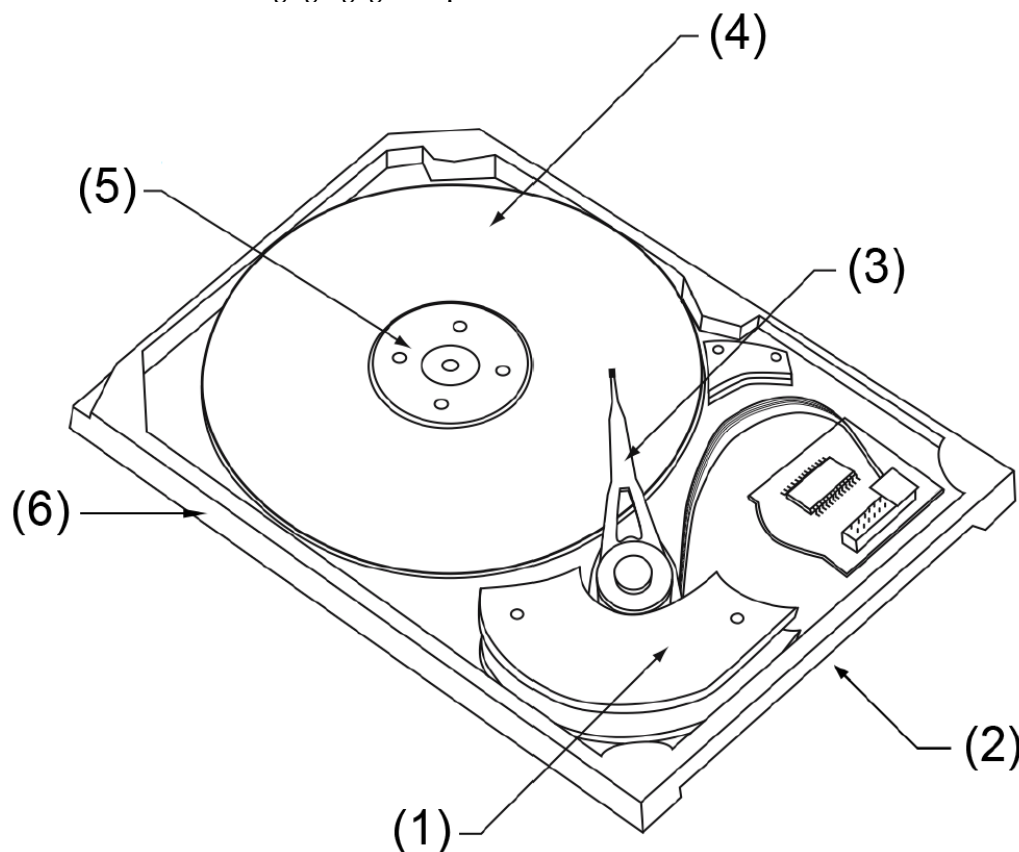
As mentioned above, and described in detail in chapter 3, the process to recover neodymium only involves a few simple steps such as heating in an oven or filtering. The consumption of chemicals is also limited to few and inexpensive compounds such as sulphuric acid, sodium hydroxide or (perhaps) oxalic acid.

It is estimated that a minor facility could convert 1000 kg of old magnets into 280 kg of pure neodymium (or the equivalent amount of a neodymium compound) every day. The investments required to build such a facility are expected to be relatively modest, since the equipment such as tanks, filters, pumps, etc. are standard for the chemical processing industries and not expensive.

# 1. Kortlægning af indholdet og opbygningen af kasserede harddiske

## 1.1 Opbygning af harddiske

Den måde den enkelte harddisk er opbygget på, afhænger naturligvis af producenten - og ikke mindst hvornår den er produceret. Området har, som alle andre områder indenfor elektronik, været gennem en rivende udvikling og vigtige komponenter er løbende blevet forbedret.



**FIGUR 2**

ET KIG NED I EN TYPISK HARDDISK HVOR LÅGET ER FJERNET. (1) ER DET ØVERSTE BESLAG MED EN NEODYMMAGNET PÅLIMET NEDENUNDER, DER ER NORMALT ET TILSVARENDE BESLAG I BUNDEN OGSÅ. (2) ER DEN PRINTPLADE SOM SIDDER PÅ BAGSIDEN AF HARDDISKEN OG SOM BEHANDLER OG SENDER DATA VIDERE TIL RESTEN AF COMPUTEREN. (3) ER LÆSEARMEN DER KAN ROTERE OM ET LEJE, SPOLEN SIDDER FOR ENDEL AF LÆSEARMEN IMELLEM DE TO BESLAG BESKREVET UNDER PUNKT 1. (4) ER PLADELAGERET OG (5) ER EN "PLADETOP" SOM BRUGES TIL AT PRESSE PLADELAGET NED MOD DEN MOTOR DER FÅR PLADEN TIL AT ROTERE (KAN IKKE SES PÅ TEGNINGEN). (6) ER RAMMEN SOM DET HELE ER MONTERET I OG SOM GIVER DEN FØRNØDNE MEKANISKE ROBUSTHED OG – SAMMEN MED LÅGET – SIKRET EN HERMETISK LUKNING [OMTEGNET FRA REF. 2].

Sommetider er der også sket mere grundlæggende udviklinger, hvor man f.eks. er gået fra at lagre informationen i magnetisk domæner, der ligger i samme plan som harddisken til at have domæner, der ligger vinkelret på disken. Det sidste giver en kraftig øgning af lagringstætheden, men har krævet udvikling af en ny type læse- og skrivehoved.

Langt de fleste af de undersøgte harddiske er samlet med skruer, dog skal nogle få komponenter fjernes på anden vis, fordi de f.eks. er limet, loddet er presset fast.

Fælles for alle de analyserede harddiske er, at de består af en række grundelementer, som end ikke den teknologiske udvikling har ændret på. Disse grundelementer fremgår af Tabel 2 herunder.

**TABEL 2**  
 OVERSIGT OVER OPBYGNINGEN AF HARDDISKE I FEM GRUNDELEMENTER (PLUS DIVERSE), SAMT DERES UNDERELEMENTER. FOR HVERT ELEMENT ER DE TYPISKE MATERIALER ANGIVET SAMT DEN GENNEMSITLIGE VÆGT BASERET PÅ ALLE DE UNDERSØGTE HARDDISKE. DEN SAMLEDE GENNEMSITLIGE VÆGT ER 547 GRAM.

Grundelement	Underelementer	Typiske materialer	Vægt (gennemsnit)
Låg	-	Aluminium, rustfrit stål	118 g
Printplade	-	Glasfiber, guld, kobber, tin, polymer	30 g
Voice coil actuator (VCA)	Magneter med beslag	Forniklet jern, neodym/jern/bor	55 g
	Læsearm	Aluminium, kobber, stål, polymer	18 g
Pladelager	Plader	Aluminium, kemisk nikkel, platin, krom, kobolt, tantal, mv.	33 g
	Pladetop	Forniklet aluminium, aluminium	3,3 g
	Afstandsring	Aluminium, forniklet aluminium	2,5 g
Ramme	-	Aluminium	222 g
	Motor	Kobber, jern, aluminium, magnet	44 g
Diverse	Skruer, filtre, label, etc.	Polymer, papir, jern, zink, nikkel, rustfrit stål, messing	21,2 g

I det følgende gennemgås de fem grundelementer og de materialer som de typisk består af. Denne analyse er baseret på litteraturen og referencer fra internettet (f.eks. Wikipedia). Så vidt muligt er informationer fra internettet kontrolleret gennem andre kilder. Se i øvrigt referencelisten.

### 1.1.1 Låg

Låget har flere formål, udover den indlysende funktion nemlig at forhindre at støv og snavs kommer ind i harddisken. Låget bidrager til stivheden af konstruktionen, pga. de ekstreme præcisionskrav er det meget vigtigt, at selve konstruktionen ikke vrider sig eller på anden måde ændrer afstanden mellem f.eks. læsearmen og pladelageret.

De fleste låg består af flere lag, formodentlig for at øge styrken af låget, da det er kendt at to sammenlignede lag er stærkere end ét massivt lag (samme princip som i komposit sandwichpaneler).

Nogle låg har tilsyneladende også en magnetisk funktion, idet områder af disse låg - eller hele lag - består af magnetisk (ferritisk) rustfrit stål og andre af umagnetisk (austenitisk) rustfrit stål. Men der er også låg, der består af ét lag aluminium.

Med hensyn til at sortere og udnytte materialerne, er det problematisk hvis f.eks. aluminium og rustfrit stål er kombineret i et lagdelt låg. Det er ret vanskeligt at adskille de forskellige lag og en fraktion der indeholder en blanding af aluminium og rustfrit stål er meget svær at bruge til noget fornuftigt.

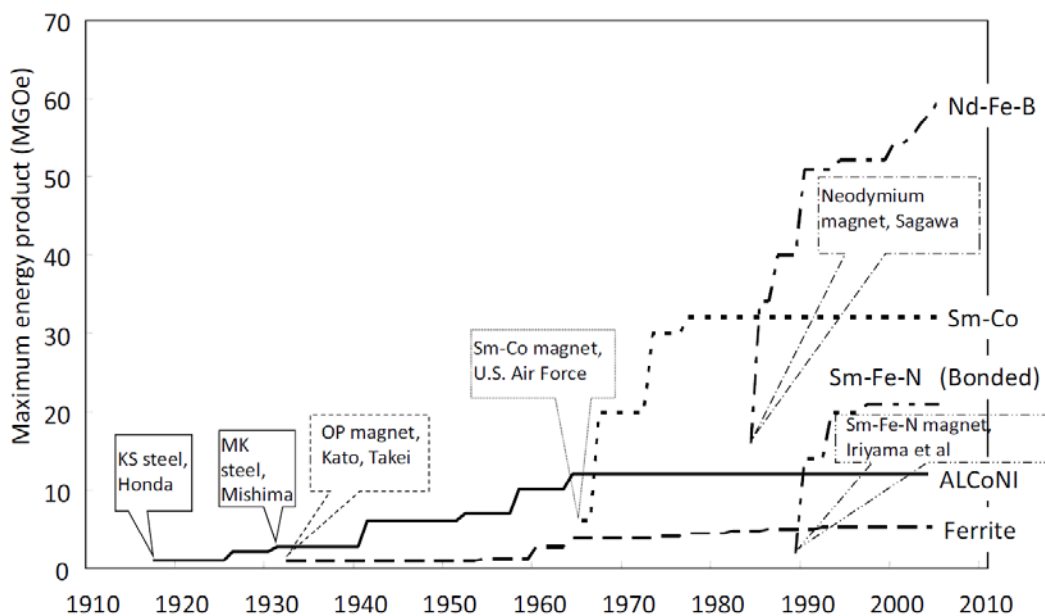
### 1.1.2 Printplade

Alle harddiske inkluderer mindst én printplade. Printpladen er typisk placeret på undersiden af harddisken, normalt monteret med 4-6 skruer direkte i gevindhuller i rammen. Printpladen indeholder en række elektriske komponenter (modstande, integrerede kredse, kondensatorer, etc.), der bruges til at kontrollere de forskellige mekaniske dele i harddisken samt til at kommunikere med omgivelserne (resten af computeren). Kommunikationen foregår via nogle stik forenden på printpladen. Disse stik følger internationale standarder for branchen, og har i øvrigt ændret sig en del i løbet af de sidste tyve år.

### 1.1.3 Voice coil actuator (VCA)

Begrebet Voice Coil Actuator (herefter kaldet VCA) kommer fra engelsk og er opstået fordi dette princip også anvendes til højttalere [1]. Der findes en række forskellige konstruktioner, men fælles for dem er at de består af en spole (coil) der kan sendes strøm igennem og en eller flere permanente magneter. Når der sendes strøm igennem spolen skabes et magnetfelt, og den del som spolen sidder på vil flytte sig i forhold til de fastplacerede permanente magneter. Princippet er ret fleksibelt og udmærker sig ved en meget hurtige og reproducérbare bevægelser.

Hvis de permanente magneter er meget kraftige, kan de gøres tyndere og mindre – og stadig have den samme effekt. Af disse årsager har de kraftige neodym magneter altid været anvendt i harddiske, fordi det er nødvendigt – mekanisk – at bevæge læse/skrivehovedet til den korrekte position over pladelageret, inden der skrives eller læses magnetisk information fra pladen.



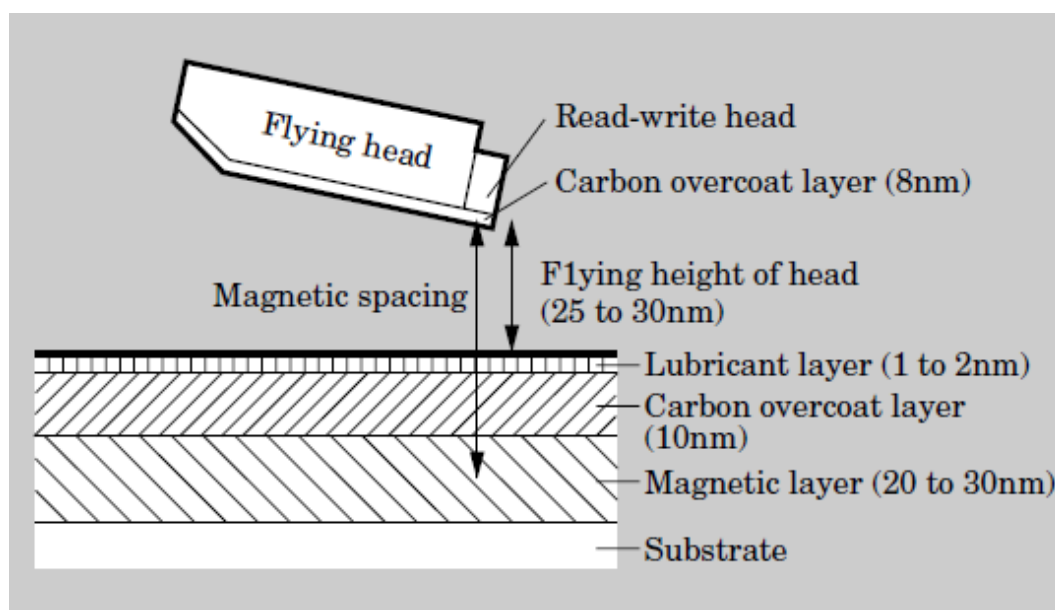
**FIGUR 4**  
HISTORISK GENNEMGANG AF MAGNETERNES UDVIKLING [3]. ENHEDEN PÅ Y-AKSEN ER ET UDTRYK FOR MAGNETENS STYRKE, DVS. HVILKEN KRAFT MED KAN FORVENTE PR. GRAM MAGNET. DE SIDSTE TYVE ÅR HAR DE NEODYM BASEREDE MAGNETER VÆRET DE KRAFTIGSTE MAN KENDER.

Selve VCA-elementet i harddiske består således af flere delkomponenter, nemlig en læsearm der kan dreje om et leje, et læsehoved der sidder på armen og svæver lige over pladelageret, samt en spole der sidder i den modsatte ende af læsehovedet og endelig to magneter, der tilsammen danner

et permanent magnetfelt, som spolen kan bevæges i ved at sende strøm igennem den. Nogle nyere konstruktioner klarer sig med én magnet og bruger som modpart et forniklet jernbeslag af samme type, som dem magneterne altid limes på (se også Figur 13).

#### 1.1.4 Pladelager

Pladelageret er det egentlige hjerte i harddisken. Det er her informationerne skrives til eller læses fra. Nogle harddiske har kun en enkelt plade, andre har to, tre eller endnu flere. De fleste plader anvendes på begge sider. Pladerne i de harddiske der er undersøgt er alle lavet af aluminium, men historisk set har også andre materialer (f.eks. glas) været brugt. Da pladerne roterer med relativ høj hastighed (typisk 5400 eller 7200 omgange pr. minut), er det vigtigt at de ikke vejer for meget da det vil betyde at der skal mere energi til at rotere dem. Ovenpå grundmaterialet (aluminium) er der et lag såkaldt kemisk nikkel (nikkel deponeret med en kemisk proces uden strøm). Dette lag er amorft (uden krystalorientering) og egner sig fortrinligt til polering. Efter poleringen belægges pladerne med PVD (physical vapour deposition), og det er disse lag der udgør det magnetiske medie. Igennem tiderne har den magnetiske belægning ændret sig voldsomt [4], og samtlige varianter vil ikke blive gennemgået her.



**FIGUR 5**  
LÆSEHOVEDET OG OVERFLADEN AF PLADELAGERET SET FRA SIDEN PÅ EN TYPISK HARDDISK [4]. PÅ FIGUREN SES OGSÅ AT PLADELAGERET HAR EN RÆKKE FORSKELLIGE MEGET TYNDE LAG PÅ OVERFLADEN, DER ALLE HAR DERES SÆRLIGE FUNKTION. GRUNDMATERIALET ER ALUMINIUM.

Det er interessant at bemærke, at de magnetiske lag ofte består af kobolt med små tilsætninger af meget kostbare metaller som platin og tantal. Som det fremgår af figuren ovenfor er disse lag dog meget tynde (omkring 20-80 nanometer eller ca. en tusindedel af et menneskehår). Det er derfor tvivlsomt, om det vil kunne betale sig at opkoncentrere og udvinde disse metaller fra pladelageret.

#### 1.1.5 Ramme

Samtlige harddiske der er undersøgt og analyseret anvender en eller anden form for plade eller ramme som grundlag for konstruktionen. Som nævnt tidligere er det ekstremt vigtigt at have en stiv og vridningsstabil konstruktion, for at sikre hurtig og problemfri læsning og skrivning af data. De fleste producenter bruger en ramme af trykstøbt aluminium – dvs. en bund og fire sider inkl. gevindhuller, huller til gennemføring af signalkabler og lignende. Enkelte producenter anvender en flad bund af aluminium (den vil også blive kaldt en "ramme"), og bruger så et hvælvet låg i stedet for et fladt for at skabe det nødvendige rum til komponenterne.



Med hensyn til genanvendelse af aluminium, er det vigtigt at alle stifter, skruer og lignende af jern og stål fjernes. Hvis aluminium er forurenset med jern er det vanskeligt at bruge igen til andre produkter.

### 1.1.6 Diverse

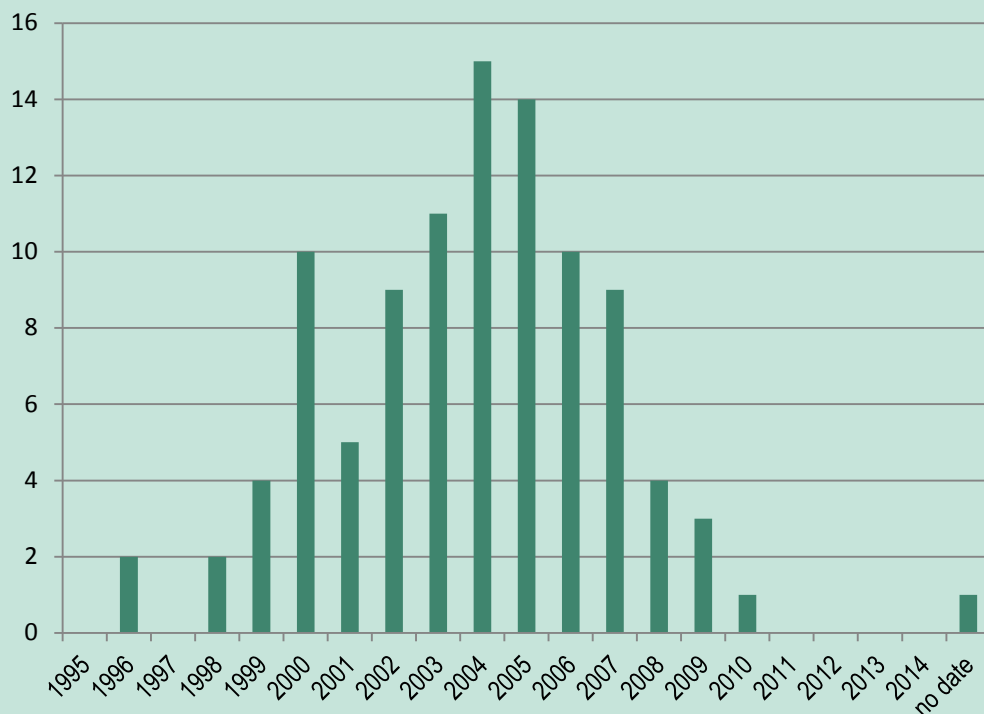
Denne gruppe består af en række meget forskellige dele og af mange forskellige materialer. "Diverse" er blandt andet de skruer, som harddisken er samlet med samt andre dele i både metal og plast som ikke findes i alle harddiske. Der er f.eks. altid et lille hul i låget eller i rammen, der tillader luft at komme ind og ud af harddisken for at kunne udligne trykforskelle. I forbindelse med dette lille hul sidder forskellige luftfiltre (typisk en lille plastkasse med aktivt kul), der har til formål at rense luften for støv, dampe og andre ting som kunne ødelægge de sarte dele inde i harddisken.

## 1.2 Kortlægning af mængder og materialer

Selvom harddiske umiddelbart fremstår ret ens, med deres standardiserede ydermål og ensartede opbygning (se ovenstående opdeling i grundelementer og delelementer), så er det ret klart at der alligevel er stor forskel når man går ned i detaljen.

I det følgende vil de forskellige materialer, som er fundet i harddiske, blive gennemgået og materialerne vil blive opdelt i fraktioner – og her tænkes helt konkret på kasser eller spande som materialerne under sortering vil blive inddelt i – og som senere vil kunne omsættes på markedet.

Baggrunden for denne inddeling er de 100 kasserede harddiske som er blevet undersøgt i løbet af projektets første fire måneder. Nogle af harddiskene (omkring 60) er fuldstændig adskilte og alle delelementer er målt, analyseret og vejat. De resterende harddiske (omkring 40) er delvist adskilt og udvalgte delelementer er målt og analyseret. Enkelte relativt kostbare analyser (f.eks. GD-OES, se afsnit 1.2.3.4 herunder) er kun udført på ca. 10 plader fra udvalgte harddiske. I disse tilfælde er harddiskene tilfældigt udvalgt, men fra forskellige år (dvs. både gamle og nyere).



FIGUR 6

FORDELINGEN AF DE 100 UNDERSØGTE HARDDISKE PÅ PRODUKTIONSÅR. DE FLESTE HARDDISKE ER OMKRING 10 ÅR GAMLE, MEN DER ER EKSEMPLER PÅ BÅDE NÆSTEN 20 ÅR GAMLE HARDDISKE OG ENKELTE DER KUN ER 4-5 ÅR GAMLE.

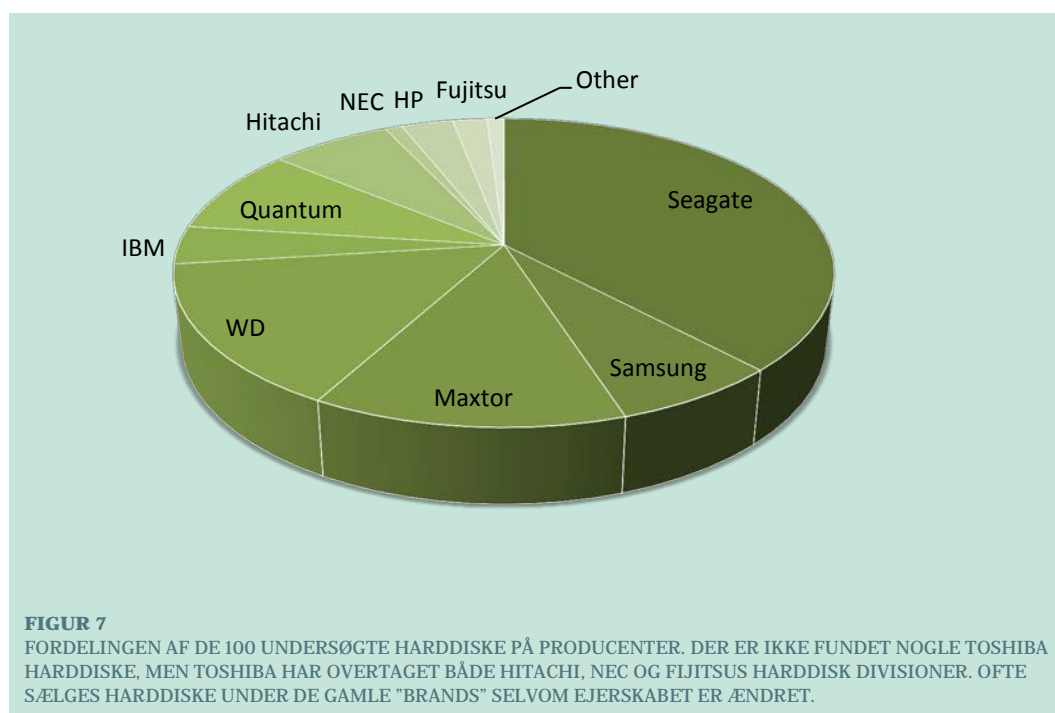
### 1.2.1 Overordnede informationer

De 100 harddiske der er undersøgt er tilfældigt udvalgt af fire omgange (fire forskellige datoer). Hver gang er omkring 25 harddiske taget op af en kasse hvor de harddiske, som er manuelt udtaget af DCR Miljø's medarbejdere den pågældende dag, opbevares.

Det er således ikke på nogen måde forsøgt at styre hvilke typer eller modeller der er udtaget, ligesom de datoer harddiskene er udtaget på er valgt helt tilfældigt.

Fordelingen af de udtagne harddiske kan ses i Figur 6. Det er tydeligt at der er rigtig mange fra år 2000 og frem til 2007 – kurven toppe omkring 2004, hvad der indikerer at de fleste computere der afleveres på genbrugspladserne er omkring 10 år gamle. Præcis halvdelen af harddiskene er produceret i årene 2003 til 2006.

Der har i tidens løb været en lang række virksomheder rundt omkring i verden der har produceret harddiske. Selvom man udelukkende fokuserer på 3,5 tommers harddiske til forbrugerelektronik, er der stadig over ti producenter. I de seneste år har flere af disse virksomheder opkøbt hinanden (enkelte er gået konkurs), og tilbage på markedet i dag er kun Western Digital (WD, U.S.A.), Seagate (Irland) samt Toshiba (Japan). Harddiskene er de senere år produceret og samlet i lavtlønslande i Fjernøsten, men udviklet og designet i virksomhedernes hjemlande.



Hver af producenterne har typisk en håndfuld forskellige serier på markedet på samme tid, hvoraf der er flere varianter (ofte blot forskellig kapacitet). Dette udvalgt ændres løbende, i nogle tilfælde endda flere gange om året. Konklusionen er da også at ganske få af harddiskene er helt ens, og der er da også kun tale om 2-3 stykker ud af 100, der er ens.

Den gennemsnitlige vægt af de 100 undersøgte harddiske er 543 g. Den gennemsnitlige vægt for de 60 harddiske der er fuldstændigt adskilt er 547 g.

### 1.2.2 Materialetyper

For at gøre kortlægningen af materialer og mængder mindre kompleks, er materialerne inddelt i en række materialetyper. Disse typer skal forstås bredt, dvs. f.eks. typen FeCr18Ni8 er en type af rustfrit stål (ikke magnetisk) som indeholder 18 % krom (Cr) og 8 % nikkel (Ni) og resten jern (Fe). Ret bredt betyder at legeringer der også indeholder små mængder af andre elementer (f.eks. molybdæn, kul, titan, etc.) regnes med i denne type – så længe indholdet er normalt for typen. Hvis

indholdet er meget anderledes vil det typisk passe ind i en anden type (det kunne f.eks. være FeCr15 der er en anden type – magnetisk – rustfrit stål).

Flere dele i harddiske er fremstillet ved at deponere et metal oven på et grundmetal. Dette gør man ofte af økonomiske eller tekniske årsager, f.eks. er alle neodym-magneterne belagt med nikkel (for at de ikke skal korrodere) og de beslag de sidder fast på er af jern – og er også belagt med nikkel. I disse tilfælde hvor et metal er deponeret ovenpå et grundmetal kaldes materialetypen f.eks. "Ni on Fe" (nikkel på jern).

**TABEL 3**

LISTE OVER DE MATERIALETYPER SOM ER IDENTIFICERET I DE UNDERSØGTE HARDDISKE. LEGERINGER SKRIVES MED GRUNDSTOFFERNE EFTERFULGT AF DET PROCENTVISE INDHOLD (BASERET PÅ VÆGT). FOR EKSEMPEL ER CuZn35 MESSING DER BESTÅR AF 35 % ZINK OG RESTEN KOBBER.

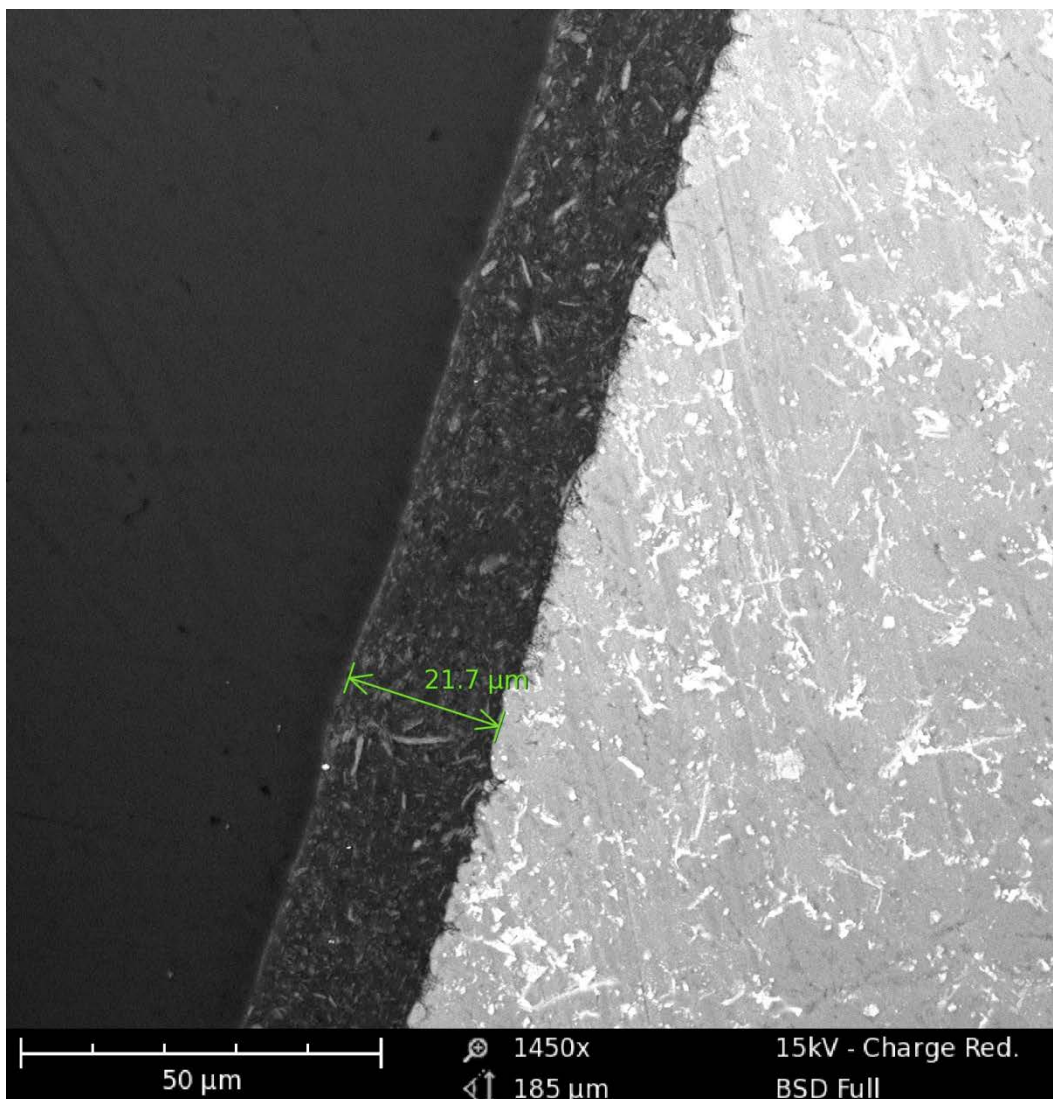
Materialetype	Forklaring	Typisk placering
Al	Aluminium. Flere forskellige legeringer er identificeret	Ramme, nogle låg, grundmateriale i pladelager
CuZn35	Messing. Nogle legeringer har mere eller mindre zink	Ikke særlig anvendt, findes i skruer og enkelte låg
Fe	Stål eller jern	Enkelte låg har en plade af jern
FeCr15	Ferritisk rustfrit stål (magnetisk)	Låg og nogle skruer
FeCr18Ni8	Austenitisk rustfrit stål (umagnetisk)	Låg og nogle skruer
Ni on Fe	Nikkelbelagt jern eller stål	Beslag til magneter
Ni on Al	Nikkelbelagt aluminium	Afstandsringe, pladetop og pladelager
Ni on CuZn35	Nikkelbelagt messing	Meget få skruer
Zn on Fe	Zinkbelagt jern eller stål	Ganske få beslag til magneter (3 %)
polymer	Plastikdele	Stik på printplade, luftfiltre samt smådele til at holde eller styre læsearmen i nogle harddiske

### 1.2.3 Resultater

For at finde ud af hvilke materialer de enkelte dele består af, er en række forskellige metoder anvendt. Den mest anvendte metode er en ikke destruktiv røntgen fluorescens måling (XRF), der kan måle sammensætningen af de fleste metaller og legeringer. Metoden kan også bruges til at måle lagtykkelser, men kun hvis man på forhånd kender grundmateriale og belægning (f.eks. zink på jern eller guld på nikkel). Desværre kan udstyret ikke registrere de lettere grundstoffer (se periodisk system i bilag 1), hvad der reelt betyder at alle metaller, der er lettere end titan ikke kan måles.

Dette er problematisk i forhold til harddiskene da de indeholder en del aluminium – som ikke kan måles.

Skal aluminium analyseres er det derfor nødvendigt med andre metoder. Der er derfor fremstillet en del tværsnit, f.eks. ved at save en magnet over på midten. Dernæst bliver den udskårne del indstøbt i et plastikmateriale og slebet og poleret således at området omkring savsporet fjernes. Dernæst kan man studere emnet "set fra siden" og med et kalibreret mikroskop f.eks. måle lagtykkelser. De polerede tværsnit (herefter kaldet slib) kan også studeres i et elektronmikroskop hvor også sammensætningen i udvalgte området kan detekteres, hvis mikroskopet er udstyret med Energy Dispersive X-ray spektroskopi (EDX). Også her er de lettere grundstoffer svære at bestemme, men EDX-systemet kan dog måle aluminium.



**FIGUR 8**

BILLEDE FRA SCANNING ELEKTRON MIKROSKOPET (SEM) AF ET POLERET TVÆRSNIT AF ET STYKKE AF EN RAMME. INDSTØBNINGSMASSEN ER SORT PÅ BILLEDET OG ALUMINIUMRAMMEN ER LYSEGRÅ MED HVIDE OMRÅDER (LEGERINGEN BESTÅR AF FLERE FASER). DEN LYSEGRÅ ALUMINIUM ER BELAGT MED EN MALING (MØRKEGRÅT LAG PÅ BILLEDET) DER ER LIDT OVER 20 MIKROMETER I TYKKELSE.

I forbindelse med de meget tynde magnetiske lag på pladelageret er Glow Discharge Optical Emmision Spectroscopy (GD-OES) anvendt. Denne metode fjerner lag på lag af materialet, der undersøges indenfor et område på f.eks. 4 mm i diameter. De lag der fjernes analyseret løbende og resultatet er en sammensætningsprofil ned igennem materialet. Se eksempel i afsnit 1.2.3.4.

### 1.2.3.1 Analyse af låg

Lågets funktion er at beskytte de indre dele af harddisken mod støv og snavs, men også at give yderligere mekanisk styrke til konstruktionen. Nogle låg, men ikke alle, er fremstillet – helt eller delvist – af magnetiske materialer, formodentlig for at beskytte harddisken mod magnetfelter udefra. Det virker dog som om producenterne ikke er helt enige om vigtigheden af dette, da der er fundet flere eksempler på låg der f.eks. udelukkende er lavet af aluminium.

Omkring 65 % af alle lågene består af to eller flere lag der er limet sammen. Det er ganske besværligt at adskille disse lag (men dog ikke umuligt), og det virker ikke realistisk at foretage denne adskillelse automatisk i en maskine. Heldigvis er lagene ofte fremstillet af det samme materiale, og derfor er der ingen grund til at adskille dem.

Halvdelen af de undersøgte låg består af et lag umagnetisk rustfrit stål (FeCr18Ni8) og et lag magnetisk rustfrit stål (FeCr15). Dertil kommer 26 % af lågene der består af FeCr18Ni8 samt 3 % der er FeCr18Ni8 plus et lag der er nikkelbelagt jern. Disse tre typer, omkring 79 % af alle låg, kan samles i én fraktion og sælges som rustfrit stål. Den gennemsnitlige sammensætning vil være ca. 17 % krom, ca. 6 % nikkel og resten jern.

Næsten 10 % af lågene er rent aluminium, disse låg vejer gennemsnitlig 53 g, mens lågene af rustfrit stål vejer op imod 120 g. Begge disse grupper kan med fordel genanvendes. Desværre er der også en lille gruppe låg der består af et lag aluminium og et lag rustfrit (magnetisk) stål. Disse er meget svære at genanvende. Denne gruppe udgør ca. 12 %, men lågene i denne gruppe vejen gennemsnitlig 155 g.

Overordnet set vejer et harddisk låg således 118 gram, hvoraf 79 % er jern/krom/nikkel, 9 % er aluminium og 12 % er en kombination af aluminium og jern/krom som ikke kan genanvendes.

### 1.2.3.2 Analyse af printplader

Det er velkendt at printplader indeholder en del forskellige materialer, herunder også både ædelmetaller som guld, sølv og palladium – samt selvfølgelig kobber som selve lederbanerne består af. Printpladerne på harddiskene indeholder desuden en eller flere integrerede kredse (IC), som består af et halvledermateriale (silicium) der er forbundet

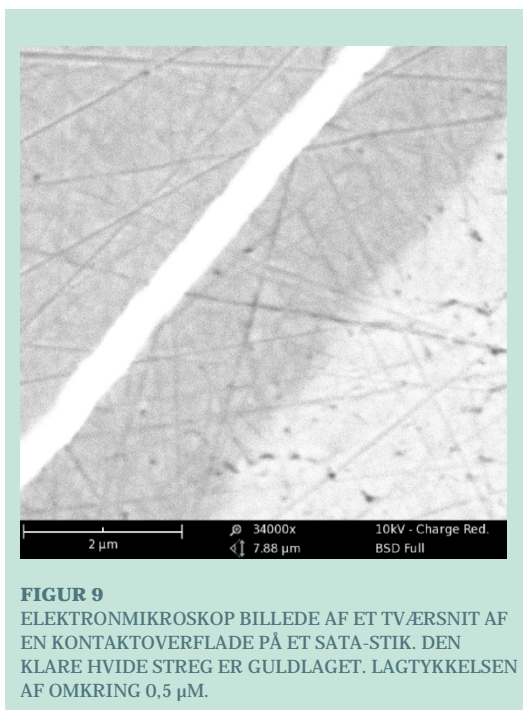
til printpladen via små tråde af guld eller aluminium. Disse tråde er meget tynde og er – bl.a. derfor – indstøbt i sort plastik som beskyttelse.

Selve printpladen består af et glasfiber-armeret epoxy laminat (kaldet FR-4), der er en standard der benyttes til stort set alle nyere printplader, med undtagelse af de såkaldte flexprint der bruger en bøjelig polyimid folie som basismateriale. I begge tilfælde er lederbanerne af kobber.

Der findes en række firmaer i Europa der har specialiseret sig i at udvinde metallerne fra gamle printplader, og det har fra starten af RareRecovery ikke været hensigten at opfinde alternative processer der kan konkurrere med disse firmaer.

Det har dog vist sig, at de kontakter - for enden af printpladerne (se figuren herunder) – der bruges til at forbinde strøm og datakommunikation med resten af computeren, indeholder en hel del guld som det ovenikøbet er ret let at komme til.

Det er en standardproces i elektronikindustrien at belægge kontakter, og andre komponenter der skal overføre en strøm, med henholdsvis nikkel og guld. Typisk er grundmaterialet kobber, men det oxiderer ret let i almindelig luft, og vil over tid give dårlig kontakt. Guld er et ædelmetal, og vil ikke

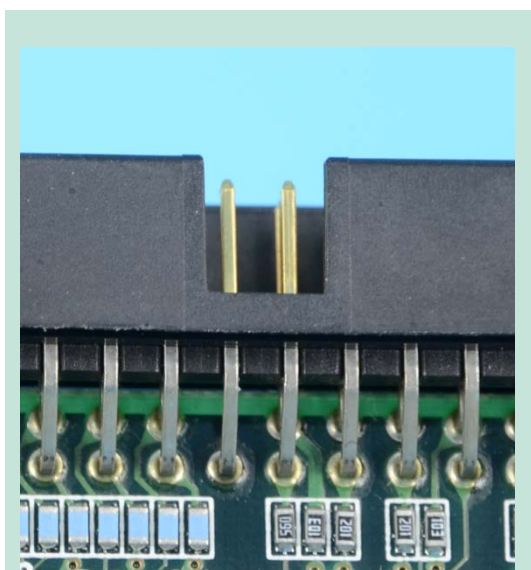


oxidere, og derfor er guld meget udbredt som kontakmateriale. Imellem kobber og guld har man et nikkellag, dels fordi nikkel er hårdt og slidstærk (i modsætning til guld) men mest for at forhindre at guld og kobber reagerer med hinanden.

Da guld er et af de dyreste materialer overhovedet, prøver industrien naturligvis at reducere brugen af guld så meget som muligt. Derfor er lagtykkelsen typisk under en mikrometer, ligesom der kun er lagt guld på de flader der fungerer som kontakter og ingen andre steder (heller ikke på bagsiden af kontakterne, se Figur 10).



**FIGUR 10**  
NÆRBILLEDE AF DET STIK DER BRUGES TIL AT FORBINDE HARDDISKEN TIL STRØM (VENSTRE DEL) OG DATAKOMMUNIKATION (HØJRE DEL). DE GULE OMRÅDER PÅ STIKKET ER BELAGT MED NIKKEL OG GULD. DENNE VERSION AF STIKKET ER DEN NYERE SERIELLE TYPE DER KALDES SATA.



**FIGUR 11**  
NÆRBILLEDER AF 4 PINDE FRA ET IDE STIK. BEMÆRK AT KUN ENDERNE AF HVER PIND ER FORGYLDT.

Igennem tiderne har der været flere standarder på området for harddisk stik. På markedet for computere til almindelige forbrugere var der først en parallel forbindelse kaldet IDE (Integrated Drive Electronics) der var opfundet af Western Digital, dernæst kom SCSI (Small Computer Standard Interface) og endelig de nyere serielle forbindelser kaldet SATA (Serial ATA eller Serial AT Attachment). Sidstnævnte er udviklet af flere harddisk- og computerproducenter i fællesskab, og har siden introduktionen i 2003 nærmest fuldstændigt overtaget markedet.

Af de 100 undersøgte harddiske er 60 % IDE, 2 % SCSI og 38 % SATA.

Alle stiktyperne har forgyldte kontakter, men der er stor forskel på formen af stikket og på det samlede overflade areal. Hvis vi ser bort fra de 2 % SCSI harddiske, så består de fleste

harddiske af den ældre IDE type. I modsætning til billedet på Figur 10, består IDE stikket af 39+8 koniske pinde. Pindene er firkantede og ender i en pyramideformet spids.

Alle pinde i stikket er omsluttet af en plastikkappe, undtagen i ét område (hvor billedet i Figur 11 er taget). Det samlede areal for overfladen af én pind er beregnet til ca. 15 mm<sup>2</sup> og arealet for alle 47 pinde er da 705 mm<sup>2</sup>. Der er lavet slib af en række tilfældigt udvalgte stik, og gennemsnitslagtykkelsen for guld belægning er 140 nm eller 0,14 µm.

På samme måde er der lavet slib af en række SATA stik (se Figur 9), og her er overfladearealet noget mindre da der kun er 11 lange og 11 korte flader (se Figur 10) – i alt sammenlagt omkring 155 mm<sup>2</sup>. Til gengæld er guldlagets tykkelse blevet større, nemlig omkring 0,5 µm. Det skyldes nok at SATA stikket kun har én flade hvor der kan skabes kontakt til modparten af stikket (IDE stikker har fire sider), det sætter større krav til at guldlaget ikke slides af for hurtigt. Desuden er datatransmissionshastigheden væsentligt højere for SATA interfacet sammenlignet med de gamle IDE forbindelser, og også dette kræver en særdeles god elektrisk kontakt. Det er muligt at opløse guldlaget på kontakterne – uanset type – elektrokemisk, uden at opløse de øvrige metaller og materialer. Dernæst kan guldet udvindes fra opløsningen når koncentrationen af guld er passende høj. Densiteten af guld er 19,3 g/cm<sup>3</sup>. Hvis densiteten multipliceres med overfladearealet og gennemsnitslagtykkelsen, fås at IDE stikket indeholder omkring 1,91 mg rent guld og SATA stikket omkring 1,50 mg rent guld. Afhængig af guldprisen vil denne mængde indbringe mellem 50 og 60 øre pr. harddisk. Det er dog tvivlsomt om det kan svare sig økonomisk at udvinde guldet på stikkene, idet værdien af guldet da vil blive fratrukket prisen der kan opnås for printkortene hos smelteværkerne.

### 1.2.3.3 Analyse af Voice Coil Actuator (VCA)

Som beskrevet i afsnit 1.1.3, består den såkaldte VCA af en læsearm der kan dreje og nogle beslag med påsatte magneter der danner et kraftigt magnetfelt.

Læsearmen, der bl.a. kan ses i Figur 5 og Figur 13, vejer i gennemsnit 18 g (af 60 målte harddiske). Der er dog meget store udsving på vægten, idet de tungeste vejer op imod 50 g og de letteste kun 5 g. Dette skyldes at nogle læsearme skal læse informationer fra 3 eller 4 pladelagre (på begge sider af pladerne) og andre kun læser på én side af én plade. Desuden vil det leje som armen kan dreje omkring nogle gange følge med når armer fjernes (og vejes) og andre gange sidde tilbage i rammen. Lejet er typisk lavet af stål, og selve armen er altid af aluminium (det gælder om at have en lav vægt på de dele som skal accelereres hurtigt op og ned). Bagerst sidder en kobberspole, ofte indstøbt i plastik, og endelig anvendes et tyndt flexprint til transportere data fra læsehovedet til printpladen på undersiden af harddisken.

Flexprintet er fastgjort på printpladen via en såkaldt "plug", der gennem i hul i rammen skrues direkte fast på nogle kontakter på printpladen. Der er små mængder af guld og kobber på læsehovedet og flexprintet.

Anderledes forholder det sig med magneterne og de beslag de sidder på. Alle magneterne er belagt med nikkel for at forhindre oxidering og korrosion – hvad der ville føre til reducerede egenskaber af magneterne. Beslagene er fremstillet af almindeligt stål (magnetisk, billigt og stærkt) og også beslagene er forniklet for at undgå korrosion. På både magneter og beslag er lagtykkelsen af nikkellaget mellem 20 og 25 mikrometer.

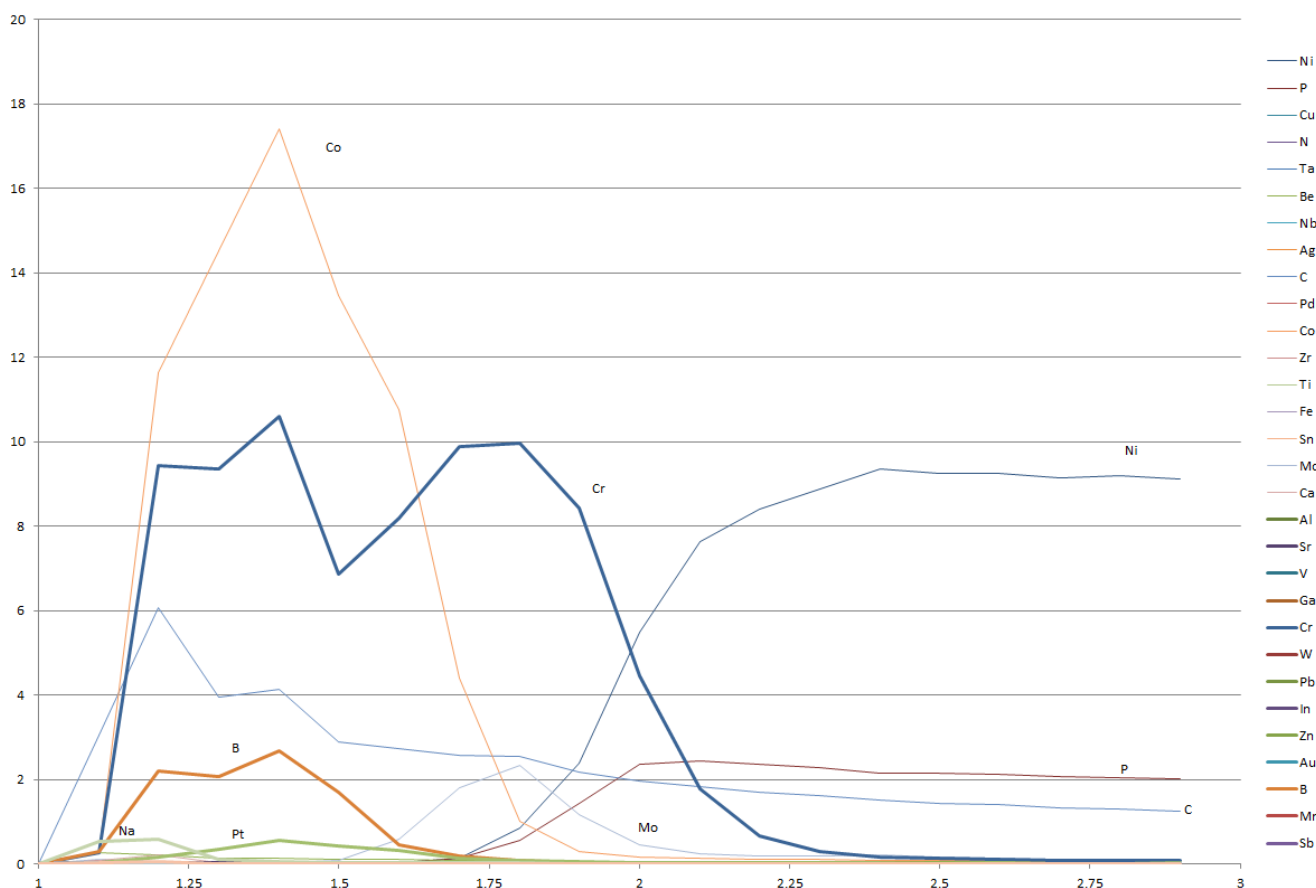
For en gennemsnitlig harddisk (ud af 60 undersøgte) vejer magneter og beslag i alt 55 gram. Heraf vejer en gennemsnits magnet 6,35 g. Dette tal dækker dog over relativt store udsving, nogle (nyere) magneter vejer kun omkring 3 gram mens andre vejer op til 11 gram for én magnet. Endelig har 17 % af harddiskene kun én magnet, mens 83 % har to magneter. Overordnet kan man sige at en gennemsnitlig harddisk har 12,1 gram magneter og 42,9 gram forniklede jernbeslag.

Udvalgte magneter er også blevet undersøgt med SEM/EDX. Der er en vist usikkerhed på målingerne, specielt på analysen af bor der jo også tilhører de lettere grundstoffer. Ser man bort fra bor indeholder en typisk magnet 26 % neodym, 2 % dysprosium og resten jern (og bor). Disse tal stemmer nogenlunde overens med oplysninger fra litteraturen [3] og fra internettet [1], der siger at magneterne indeholder omkring 31 % neodym – hvoraf op til 6 % kan erstattes af dysprosium (Dy). Dysprosium er dog meget dyrere end neodym og tilsættes for at forbedre egenskaberne ved høje temperaturer. Disse temperaturer findes ikke i harddiske, så indholdet af dysprosium er derfor lavt i harddisk magneter.

Enkelte analyser viste også spor af praseodymium (Pr) - der ligesom dysprosium også tilhører de sjældne jordarter - det vides dog ikke om det er noget der er tilsat med vilje eller om det er en urenhed der blot tolereres (eller om det skyldes en målesikkerhed). Det lader dog til at indholdet af sjældne jordarter ligger generelt på omkring 30 % baseret på vægt.

#### 1.2.3.4 Analyse af pladelager

Som beskrevet ovenfor, er pladelageret en skive af aluminium der er belagt med kemisk nikkel (en legering af nikkel og fosfor), og som ovenpå dette substrat har en række meget tynde magnetiske lag hvori informationen gemmes. Selvom området har set en voldsom udvikling gennem tiderne, består det magnetiske lag oftest af kobolt (der er ikke fundet nogen harddiske hvor dette ikke er tilfældet) med legeringselementer af platin (Pt), bor (B), krom (Cr), tantal (Ta) eller andre. Under det magnetiske lag er der typisk et andet lag (krom baseret), formodentlig for at sikre en god vedhæftning mellem det magnetiske lag og substratet. Øverst er der et organisk lag der fungerer som smøremiddel og skal undgå at læsehovedet beskadiges hvis det rammer pladen.



**FIGUR 12**

EKSEMPEL PÅ EN GD-OES ANALYSE AF OVERFLADEN PÅ ET PLADELAGER. ENHEDEN PÅ X-AKSEN ER TID (I SEKUNDER) OG PÅ Y-AKSEN TÆLLETAL (COUNTS PER SECOND). KURVERNE VISER SÅLEDES EN SAMMENSÆTNINGSPROFIL NED IGENNEM OVERFLADEN. EFTER OMKRING 2,5 SEKUNDER ER ANALYSEN NEDE I DET KEMISKE NIKKELLAG, DER BESTÅR AF NIKKEL OG FOSFOR. DE FOREGÅENDE LAG ER MEGET TYNDE, MEN INDEHOLDER EN RÆKKE INTERESSANTE OG DYRE METALLER. MED DENNE TYPE ANALYSE VIL OVERGANGEN MELLEM TO LAG OFTE SE MINDRE SKARP UD END DEN ER I VIRKELIGHEDEN.

En gennemsnitlig plade vejer 22 g. Der findes godt nok en række forskellige standardstørrelser, men langt de fleste er på 95 mm i diameter og har en forbavsende ensartet vægt.

I GD-OES analysen (se Figur 12) ætser maskinen sig ned igennem materialet ved hjælp af sputtering (ioner der accelereres op og skydes mod overfladen af det der analyseres). Den tid det tager at fjerne et givet lag har selvfølgelig en vis sammenhæng med lagets tykkelse, men man kan ikke umiddelbart sætte lighedstegn mellem tid og lagtykkelse.



Ved at sammenholde lagtykkelsesmålinger af nikkel-fosfor-laget fra slib (polerede tværsnit) med GD-OES målingerne, er der fundet en kalibreringsfaktor der gør at GD-OES målingerne kan bruges som lagtykkelsesmåling for denne type belægning.

Af de pladelagre der er undersøgt, ligger nikkel-fosfor lagtykkelsen på ca. 20 µm i gennemsnit. Alle de undersøgte plader havde en diameter på 95 mm. Beregnes pladernes overflade (fraregnes hullet i midten) fås at nikkellaget vejer omkring 2,5 gram. De tynde magnetiske lag og diverse hjælpelag er til sammenligning 20 til 80 nanometer (altså næsten tusind gange tyndere), og det antages derfor at deres vægt vil være 2-3 milligram. Af denne vægt er i størrelsesorden 10 % platin eller omkring 0,25 mg. Platinindholdet på en enkelt plade er således 6-8 gange mindre end guld mængden på printpladernes stik.

#### **1.2.3.5 Analyse af ramme**

Som tidligere nævnt består rammen i samtlige undersøgte harddiske at trykstøbt aluminium.

Enkelte af disse er blevet analyseret grundigt og de har alle haft et meget lavt indhold af jern.

Nogle rammer fremstår som den rå aluminium mens andre er malet (normalt sort). Som det fremgår af Figur 8, er malingslaget typisk omkring 20 mikrometer i tykkelse. Det endnu er uvist om malingen vil forringe den pris som aluminium kan indbringe når det sælges som skrot. Men det er klart at prisen vil afhænge af hvor meget jern der "falder" ned i aluminiumsfraktionen.

Jernforureninger i aluminium er et af de store problemer ved at genanvende aluminium til f.eks. produktion af dåser til drikkevarer. Ved for stort jernindhold vil der opstå overfladefejl på dåserne (eller andre produkter), der vil give anledning til korrosion og tydelige visuelle fejl.

Mange rammer indeholder også en eller flere stifter af jern eller rustfrit stål. Stifterne bruges f.eks. til styre placeringen af mindre plastikdele, eller i nogen tilfælde de beslag som magneterne i VCA'en indeholder. For at nedbringe indholdet af jern i aluminiumsfraktionen, vil det være bedst om disse stifter kunne fjernes mekanisk.

# 2. Vurdering af økonomisk potentiale samt litteraturstudie

## 2.1 Inddeling i fraktioner

Aluminium udgør vægtmæssigt langt den største del af en harddisk, bl.a. fordi den ramme som alle komponenter er monteret i, er fremstillet af trykstøbt aluminium. Derefter kommer rustfrit stål, der i de fleste tilfælde er det materiale som låget er fremstillet af, og længere nede på listen kommer materialefraktioner som neodym (på engelsk "neodymium") kobber, nikkel, printplader, guld og endelig fraktionen "blandet metal og plast".

DCR Miljø har i dag et anlæg der automatisk kan findele og sortere elektronikskrot i fraktioner, f.eks. jern, aluminium, kobber og plast. De dele af harddisken, som en automatisk maskine ikke kan sortere (kaldet "blandet metal og plast") vil derfor blive sendt gennem dette anlæg – for på den måde at skabe værdi. I samarbejde med DCR Miljø er værdien en denne fraktion sat til én krone pr. kilo materiale.

Den fastsatte værdi af de øvrige fraktioner fremgår af Tabel 4 herunder.

**TABEL 4**

MATERIALER INDDELT I FRAKTIONER SÅLEDES AT FRAKTION NR. 1-9 ER METALLER, FRAKTION 10 ER "BLANDET METAL OG PLAST" OG FRAKTION 11 ER "OPLØSNINGER". OPLØSNINGERNE ER ET BIPRODUKT VED METALUDVINDINGEN OG HAR FORMODENTLIG INGEN VÆRDI.

Priser:	kr./kg	nr.	Elementer	Kilde
Aluminium	6,0	1	Al+Mg	DCR Miljø
Rustfrit stål	6,5	2	Fe+Cr+Ni	Ref. Metalprices.com og scrapmonster.com
Printplader	56,7	3		Gennemsnit Aurubis, DCR Miljø Sept. 2015
Kobber	30,0	4	Cu	Estimeret pris, forår 2013
Neodym	579,4	5	Nd	Officiel pris, maj 2015
Guld	250.000,0	6	Au	Officiel pris, juni 2014
Platin	260.000,0	7	Pt	Estimeret pris, forår 2013
Nikkel	80,0	8	Ni+B	Estimeret pris, forår 2013
Kobalt	160,0	9	Co	Estimeret pris, forår 2013
Blandet metal og plast	1,0	10		DCR Miljø
Opløsninger	-	11	Fe/Al	Estimeret pris

Med udgangspunkt i diagrammet i Bilag 2:, vil de forskellige delelementer fra harddiskene blive gennemgået herunder – bl.a. for at identificere de mest værdifulde materialer.

### 2.1.1 Låg

Af de 100 harddiske som er blevet undersøgt, er lågene undersøgt i detaljer for 57 stk. Gennemsnitsvægten for disse låg er 117,3 gram. Lågene inddeles derefter i tre grupper:

1. "Alle låg består af aluminium": Dette gælder i 4 tilfælde ud af 57 og disse vejer tilsammen 219,5 gram. Dermed udgør rene aluminium låg 3,9 gram i gennemsnit (219,5/57).

2. "Alle lag består af jern, krom eller nikkel": Denne gruppe er den største og dækker lag af FeCr15, FeCr18Ni8 og forniklet jern i forskellige kombinationer. Der er 46 tilfælde ud af 57 og den samlede vægt for disse lag er 5394,3 gram – det giver et gennemsnit på 94,6 gram.
3. "Blandede lag": Denne gruppe har en væsentlig ringere værdi (fraktion nr. 10 i Tabel 4), og består af lag sammensat af blandede metaller som aluminium, rustfrit stål og forniklet messing. Der er 7 tilfælde ud af 57 der tilhører denne gruppe og disse lag vejer tilsammen 1072,5 gram. Det giver et gennemsnit på 18,8 gram.

Hvis man antager af en automatisk maskinen kan fjerne låget på en harddisk og sortere låget – efter sammensætning – i den rigtige af de tre overstående grupper, så kan lagene værdisættes som i Tabel 5.

**TABEL 5**  
ET LÅG VEJER I GENNEMSNIET 117,3 GRAM FORDELT PÅ TRE SAMMENSÆTNINGSGRUPPER. MED UDGANGSPUNKT I MATERIALEPRISERNE I TABEL 4, KAN VÆRDIEN AF DE ENKELTE GRUPPER OPGØRES.

Låg		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Lag af rustfrit stål	Fe+Cr+Ni	2	94,6	0,615	94%
Lag af aluminium	Al	1	3,9	0,023	4%
Blandet metal	Fe+Cr+Ni+Al	10	18,8	0,019	3%
i alt			117,3	0,657	100%

Skrotværdien af harddiskenes lag er baseret på gennemsnits markedspriser hentet fra internetressourcerne [www.scrapmonster.com](http://www.scrapmonster.com) og [www.metalprices.com](http://www.metalprices.com). Det er antaget at harddisklag bestående af flere lag, hvoraf et af lagene ikke er rustfrit stål, sorteres fra. På baggrund af opslag på ovennævnte internetressourcer er en ca. pris for rustfri lag fundet til kr. 6,5/kg, med forbehold for markedsudsving.

### 2.1.2 Printplade

Alle harddiske, uanset alder, indeholder et printkort (eller printplade) hvorpå alt elektronikken er samlet. Udviklingen af printplader har været i en rivende udvikling gennem de sidste tyve år, og indholdet af materialer afhænger derfor meget af hvornår harddisken er fremstillet. Da harddisk printplader er relativt kompakte, og altid indeholder en række forgyldte stik (til kommunikation med resten af computeren), er prisen for gamle printkort relativt god.

**TABEL 6**  
PRINTPLADERNE KAN INDBRINGE EN PRIS SOM DE ER, MEN I DENNE OVERSIGT ER GULDMÆNGDEN PÅ KONTAKTERNE REGISTRERET FOR SIG SELV. DET ER DOG MEGET SANDSYNLIGT AT PRISEN PÅ PRINTPLADERNE FALDER TILSVARENDE HVIS GULDET PÅ KONTAKTERNE ER FJERNET.

Printplade		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Printplade		3	30,1	1,707	80%
Kontakter	Au	6	0,00175	0,438	20%
i alt			30,1	2,144	100%

Det er tydeligt at printpladen udgør en væsentlig del af den samlede materialeværdi for de brugte harddiske. Den pris man kan opnå for printpladerne vil naturligvis være genstand for en forhandling med køberen, og prisen vil bl.a. afhænge af guldprisen, hvor store mængder der sælges, harddiskenes alder (printpladernes sammensætning) samt kapaciteten hos de udenlandske smelterier der typisk køber printplader.

Værdien for harddiskenes printplader anvendt vurdering af økonomisk potentiale er baseret på markedspris indhentet ved dialog med Director Thorsten Steenbock fra Aurubis AG i Tyskland. Aurubis AG er en af verdens førende genanvendelsesfirmaer mht. kobber og opererer blandt andet et smelteværk til genanvendelse af e-skrot i Hamborg. Aurubis køber e-skrot til markedspris baseret på analyse af det leverede skrot. Aurubis har oplyst at en typisk gennemsnitspris for sammenligneligt HDD printpladeskrot fra computere typisk ligger på € 5,- /kg, med forbehold for

markedsudsving. Denne pris er dog relativt lav og ifølge DCS Miljø kan der opnås priser der er ca. 2 gange højere.

### 2.1.3 Voice coil actuator (VCA)

Som beskrevet i kapitel 1, er VCA delen - sammen med pladelageret - de to vigtigste elementer i en harddisk. VCA'en består fysisk af to logiske dele nemlig læsearmen (med læsehoved, flexprint og stik) og magneterne (inkl. deres beslag).



**FIGUR 13**  
NÆRBILLEDE AF EN LÆSEARM MED SPOLEN DER POSITIONERER LÆSEHOVED ET STED PÅ PLADELAGERET, VED AT DREJE ARMEN OMKRING LEJET. FLEXPRINTET LEDER INFORMATIONERNE DER LÆSES AF LÆSEHOVEDET, VIA ET STIK OG ET HUL I RAMMEN, OM TIL PRINTPLADEN PÅ BAGSIDEN.

Det vurderes at kobberspolen – sammen med flexprintet – vil kunne fjernes fra læsearmen mekanisk, men at de øvrige dele ikke vil kunne frasorteres effektivt og derfor vil ende i fraktion 10 ("Blandes metal og plast"). Det er dog også tydeligt, at pga. læsearmens lave vægt og fordelingen af materialer i den generelt, er værdien relativt ringe og det er derfor tvivlsomt om denne sortering er rentabel se tabel 7.

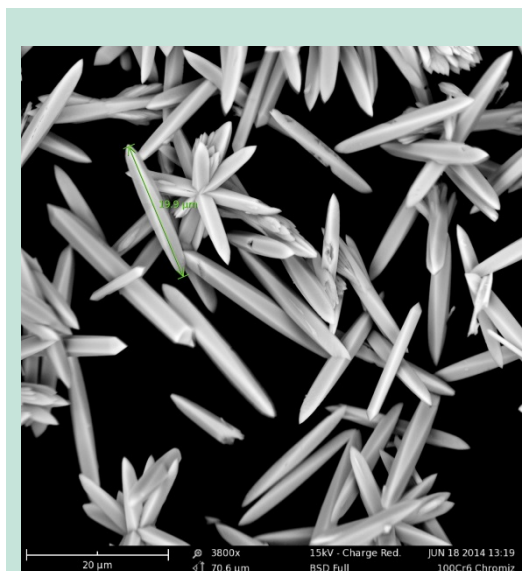
**TABEL 7**  
OPGØRELSE AF MATERIALERNE I DEN SÅKALDTE LÆSEARM. DET ER FORUDSAT AT KUN SPOLEN OG FLEXPRINTET FJERNES MEKANISK, MENS RESTEN GÅR TIL FRAKTION 10 ("BLANDET METAL OG PLAST").

Læsearm med læsehoved		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Spole	Cu	4	1,4	0,042	35%
Flexprint med stik	Printplade	3	1,1	0,062	52%
Leje	Fe+Cr+Ni	10	6,1	0,006	5%
Arm og læsehoved	Al	10	6,0	0,006	5%
Indkapsling, etc.	Plast	10	3,3	0,003	3%
i alt			17,9	0,120	100%

Noget anderledes forholder det sig med magneter og de beslag de sidder på. Samtlige magneter består af jern-neodym-bor legeringer, enkelte indeholder også andre sjældne jordarter som dysprosium og praseodym (se Bilag 1: for et periodisk system med priser og danske navne).

Alle magneter er forniklede for at beskytte dem mod korrosion. Af samme grund er de beslag magneterne er monteret på også forniklet. Ved at opvarme magneter og beslag til 400 grader i 30-60 minutter, mister magneterne deres magnetisering og limen de er påsat med bliver ødelagt. Derefter falder magneten af beslaget stort set "af sig selv", og magneterne vil kunne sorteres fra.

Det er muligt at knuse magneter i nogle grove stykker og derefter opløse dem i svovlsyre. Nikkel og bor går ikke i opløsning og kan filteres fra. Arbejdet med at udvikle en proces til at genvinde neodym fra disse opløsninger er beskrevet i kapitel 3, og udbyttet er ganske højt. Efter filtrering for at fjerne udfældet neodymoxid, indeholder svovlsyren kun opløst jern og da dette ikke har nogen særlig anvendelse (opløst jernsulfat kaldes også jernvitriol og bruges til at fjerne mos i græsplæner) eller udgør en miljærisiko, er værdien af denne opløsning sat til nul.



**FIGUR 14**  
ELEKTRONMIKROSKOPBILLEDE AF KRYSTALLER AF NEODYMSULFAT UDVUNDET AF GAMLE HARDDISK MAGNETER.

**TABEL 8**

MAGNETER OG BESLAG VEJER TILSAMMEN 55,1 GRAM I EN GENNEMSNITLIG HARDDISK. DISSE ER FORDELT PÅ 11,5 GRAM MAGNET OG 43,6 GRAM FORNIKLET BESLAG. NIKKELBELÆGNINGEN PÅ MAGNETERNE KAN, SAMMEN MED BORINDHOLDET I MAGNETERNE, I PRINCIPPET GENBRUGES - MEN VÆRDIEN ER MEGET LAV.

Magneter med beslag		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Beslag	Ni på Fe	2	43,6	0,283	11%
Nikkelbelægning	Ni	8	0,3	0,024	1%
Neodym	Nd	5	3,9	2,260	88%
Jern fra magnet	Fe	11	7,2	-	0%
Bor fra magnet	B	8	0,1	0,008	0%
i alt			55,1	2,575	100%

Enkelte beslag til magneter (omkring 3 %) er IKKE forniklet jern, men forzinket og kromateret jern. Det vil være meget svært at frasortere dem automatisk, men det vurderes at den lille mængde zink ikke vil reducere værdien af rustfrit stål fraktionen (fraktion nr. 2) nævneværdigt.

47 magneter er adskilt fra deres beslag (for at kunne blive vejte) og disse 47 harddiske kan opdeles i tre grupper:

1. 30 tilfælde som indeholdt to magneter som begge er blevet vejte. Den samlede vægt at disse 60 magneter var 385,74 gram eller 12,86 i gennemsnit pr. harddisk.
2. 6 tilfælde som kun indeholdt én magnet. De 6 magneter vejede 41,6 gram i alt og det giver en gennemsnitsvægt på 6,93 gram.
3. 11 tilfælde som indeholdt to magneter men hvor kun den ene er blevet vejte. I disse tilfælde er det antaget at begge magneter vejer det samme (det vides fra gruppe 1 at dette er en rimelig antagelse), og den samlede vægt at disse 22 magneter er da 112,2 gram. Dette svarer til en gennemsnitsvægt på 10,2 gram (112,2 gram/11 tilfælde).

Samlet vejer magneterne i de 47 harddiske 536,54 gram, svarende til 11,5 gram i gennemsnit.

### 2.1.4 Pladelager

Igennem tiderne har de magnetiske belægnings ændret sig voldsomt (beskrevet i kapitel 1), men ofte består lagene af kobolt med tilsætning af platin, krom, tantal og mange flere.



**FIGUR 15**  
FOLIEFLAGER AF KEMISK NIKKEL MED DE TYNDE MAGNETISKE LAG ØVERST (LYSESTE SIDE). FOLIEFLAGERNE ER FREMSTILLET VED AT KLIPPE PLADELAGERET I STRIMLER OG OPLØSE ALUMINIUMSUBSTRATET I NATRIUMHYDROXID. DEREFTER KAN FLAGERNE, DER BESTÅR AF NIKKEL, KOBOLT OG PLATIN, FILTRERES FRA.

Hvis nikkel og aluminium ikke adskilles, vil der ikke kunne opnås en særlig god pris for de gamle pladelagre. Der er derfor to muligheder; enten kan de magnetiske lag fjernes selektivt eller også kan substratet (aluminium) opløses selektivt. Begge dele har været afprøvet som en del af arbejdsopgave 3, og begge dele er mulige. Der skal dog temmelig kraftige syreblandinger (herunder kongevand) til at opløse f.eks. kobolt-platin laget, og derfor fremstår den anden mulighed (selektiv opløsning af aluminium med natriumhydroxid) mest attraktiv.

Vægten for én aluminiumskive med kemisk nikkel og magnetiske lag (et pladelager) er omkring 22 gram, og heraf udgør aluminium ca. 20,5 gram. Værdien af aluminiumskiven er således 12,3 øre, mens værdien af kemisk nikkel og de øvrige lag (regnet som nikkel) også er omkring 12 øre. Hvis platin og kobolt kan udvindes fra folieflagerne stiger værdien lidt, men det er klart at de relativt lave værdier gør at proceduren skal være simpel og billig – og her er opløsning af aluminium i natriumhydroxid langt at foretrække.

Af Tabel 9 ses det at værdien af platin og især kobolt er forsvindende lav. Det vil derfor næppe kunne betale sig at forsøge at udvinde disse metaller særskilt, men en løsning kunne være at sælge hele denne fraktion (nr. 7+8+9) til de firmaer der forarbejder nikkelmalm (f.eks. i Norge eller Canada). Disse selskaber er vant til at håndtere blandinger af nikkel, kobolt og platin da det også forekommer i malmen fra nikkelforminerne. Det har indtil videre ikke været muligt at undersøge hvilken pris der vil kunne opnås for fraktion 7+8+9 på denne måde.

**TABEL 9**

FORDELINGEN AF MATERIALER I DE FORSKELLIGE DELE FRA PLADELAGERET. PLADETOP OG AFSTANDSRING KAN NÆPPE SORTERES EFFEKTIVT EFTER SAMMENSÆTNING OG VIL DERFOR GÅ TIL FRAKTION 10 ("BLANDET METAL OG PLAST"). GRUNDMATERIALET OPLØSES OG HAR DERMED INGEN VÆRDI.

Pladelager og tilhørende dele		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Pladegrundmateriale	Al	11	31,8	-	0%
Pladetop	Fe+Cr+Ni	10	0,5	0,003	1%
Pladetop	Al	10	0,8	0,005	2%
Pladetop	Ni på Al	10	2,0	0,002	1%
Afstandsring	Al	10	0,6	0,004	1%
Afstandsring	Ni på Al	10	1,3	0,001	0%
Overfladelag	Ni+B	8	2,3	0,184	70%
Overfladelag	Co	9	0,00200	0,000	0%
Overfladelag	Pt	7	0,00025	0,065	25%
i alt			39,3	0,264	100%

### 2.1.5 Ramme (inkl. motor) og diverse

På mange harddisk modeller, men langt fra alle, er motoren til at rotere pladelageret monteret direkte på rammen (se Figur 16). Motoren er i princippet en klassisk elektromotor, dog fremstillet med en ret høj præcision. Desværre er motorerne altid limet eller presset sammen, og det er derfor ikke let at adskille dem mekanisk (og slet ikke med en skruetrækker). Magneten i motorerne har typisk form som en ring, og i nogle tilfælde er denne magnet også af jern-neodym-bor typen, men i andre er det en almindelig "køleskabsmagnet".

På grund af at det er så svært at adskille motorerne, og fordi dem samlede værdi ikke retfærdiggør en masse dyre processer, er de fleste af materialerne anbragt i fraktionen "Blandet metal og plast" i nedenstående tabel.

**TABEL 10**

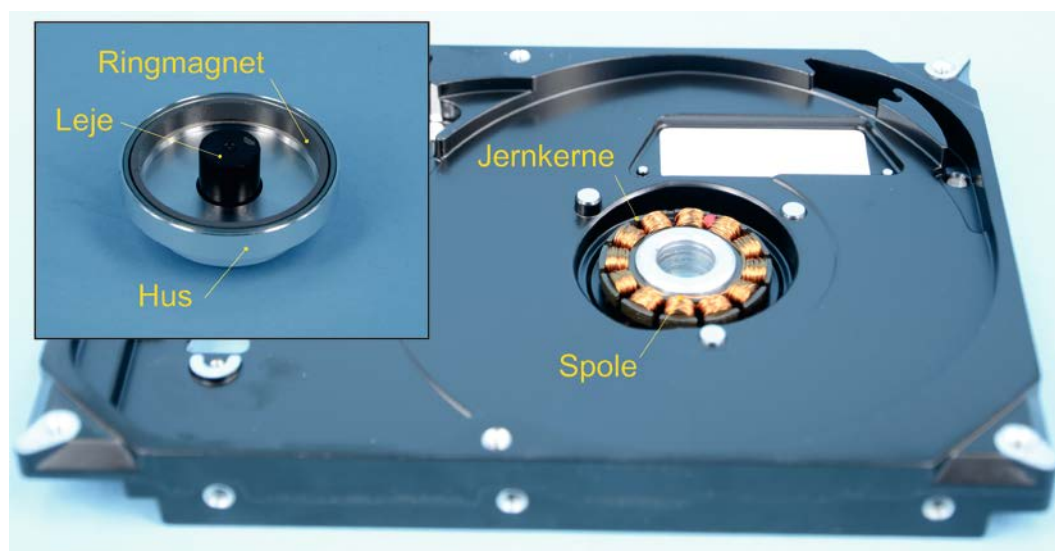
INDHOLDET OG VÆRDIEN AF DE FORSKELLIGE DELE SOM MOTORERNE ER OPBYGGET AF.

Motor		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Hus	Al	1	16,5	0,099	52%
Jernkerne + magnet	Fe	10	13,2	0,013	7%
Leje	FeCr15	10	12,4	0,012	7%
Spole	Cu	4	2,2	0,066	35%
i alt			44,3	0,191	100%

Som nævnt i indledningen er aluminiumrammen uden sammenligning den tungeste del af en harddisk. Den er lavet af trykstøbt aluminium (en legering af aluminium og magnesium) og har et relativt lavt indhold af fremmedelementer. Der er dog en del stifter (stål), pakninger, klistermærker etc. som vil føre til en vis forurening af aluminiumfraktionen (med mindre de fjernes mekanisk), ligesom de fleste rammer er malet og malingen også vil være en slags fremmedelement. Den sidste tabel viser værdien af materialerne i rammen, samt i diverse andre smådele såsom skruerne som harddisken er samlet med.

**TABEL 11**  
MATERIALER OG VÆRDIER FOR RAMMEN SAMT DIVERSE SMÅDELE.

Ramme og diverse		nr.	vægt (g)	værdi (kr.)	værdi (%)
Ramme	Al	1	222,2	1,333	99%
Skruer	Fe+Zn+Ni+Cr	10	7,3	0,007	1%
Andre metaldele	Fe+Al+Cr+Ni	10	6,8	0,007	1%
Filtre og smådele	Polymer	10	3,4	0,003	0%
i alt			239,7	1,351	100%



**FIGUR 16**  
NÆRBILLEDE AF EN ÅBNET HARDDISK HVOR Huset OG LEJET ER TAGET AF (LILLE BILLEDE). KOBBERSPOLEN MED JERNKERNE SIDDER STADIG FAST I RAMMEN. I ANDRE TYPER MOTORER ER DEN STATISKE DEL OGSÅ MOTORET I ET HUS OG ER SÅLEDES IKKE EN DEL AF RAMMEN.

Det er tydeligt fra Tabel 11, at værdien af skruer og andre smådele er så lille at det næppe kan betale sig at udvikle særskilte processer til sortering og opkoncentrering af disse.

Målet må derfor være at, så vidt muligt, at rense rammen for alt hvad der ikke er aluminium – for at få så ren en fraktion som muligt.

## 2.2 Litteraturstudie

Forud for og i løbet af projektet er der blevet indsamlet en del litteratur omkring RareRecovery projektet. Enkelte referencer er blot en hjemmeside på internettet, men langt de fleste er artikler i videnskabelige eller tekniske tidsskrifter, rapporter udarbejdet af EU eller andre internationale organisationer samt bøger.

Referencerne (se referencelisten) er opdelt i tre grupper efter deres emne:

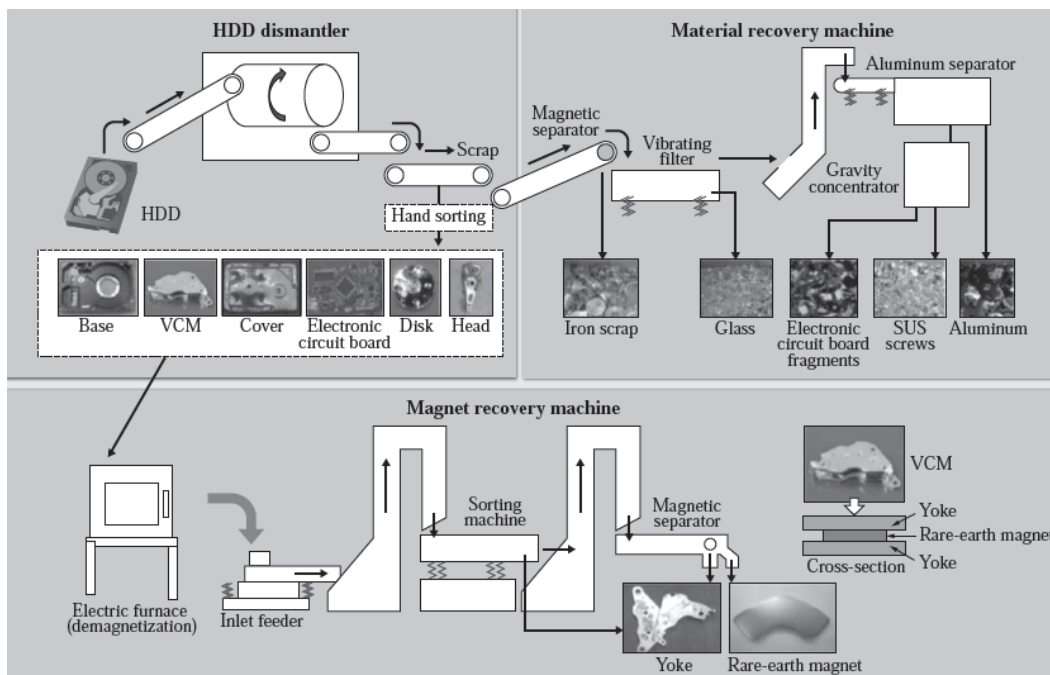
### 2.2.1 Overordnet information

Denne gruppe af referencer beskriver trends indenfor anvendelsen af sjældne jordarter [15], strategier vedrørende kritiske metaller [6+7] og endelig nogle generelle overvejelser omkring fordele og ulemper ved hhv. pyro- og hydrometallurgiske udvindingsmetoder [9]. I dette projekt er det valgt at fokusere på de vandige kemiske metoder (hydrometallurgi), hvorimod det stadig er pyrometallurgi der praktiseres ved omsmeltnng og udvinding af metaller fra f.eks. printplader i lande som Belgien (Umicore), Tyskland (Aurubis) og Sverige (Boliden).



### 2.2.2 Mekanisk adskillelse

Denne gruppe indeholder artikler om mekanisk behandling af elektronikskrot [20], dvs. om sorteringsmetoder (magnetiske, hvirvelstrøm, etc.) samt om fordele og ulemper ved mekaniske adskillelse og sortering inden shredding. Der er også en enkelt artikel omkring adskillelse med robotter [14], der bl.a. understreger at udbyttet stiger betragteligt ved at adskille WEEE produkter fremfor at finde dem og sortere stumperne. Dette synspunkt findes også i [10], der sammenligner genanvendelse af gamle fladskærme i Japan (manuel adskillelse) og EU (shredding). Artikel [11] og [17] handler mere eller mindre specifikt om harddiske og neodym-magneter. Den første er en simpel gennemgang af de materialer der er fundet i en enkelt harddisk (resultatet er dog nogenlunde på linje med vores).



FIGUR 17  
ANLÆG HOS HITACHI I JAPAN TIL ADSKILLELSE OG OPARBEJDSNING AF HARDDISKE FRA ELEKTRONIKSKROT [17].  
HDD=HARDDISK, VCM=VCA="VOICE COIL ACTUATOR", SUS=RUSTFRIT STÅL, YOKE=BESLAG.

Reference [17] gennemgår hvordan man hos Hitachi i Japan har en maskine der (ikke mange detaljer) åbner harddiske, således at komponenterne kan sorteres manuelt fra et transportbånd i f.eks. motorer, magneter, låg, ramme og lignende. I dette anlæg bliver magneterne fra VCA-enheden derefter afmagnetiseret (opvarmning), beslagene sorteres fra og magneterne sendes til oparbejdning (heller ikke mange detaljer om metoden).

Det er naturligvis interessant at man i Japan har etableret et anlæg til behandling af harddiske, da det jo må betyde at det er muligt at køre et sådant anlæg på en rentabel måde. Arbejdslønnen i Japan er dog næsten lige så høj som i Danmark, og man kan derfor undre sig over at der stadig er et væsentligt trin i processen der hedder "hand sorting".

### 2.2.3 Udvinning af metaller

Den sidste gruppe artikler handler om udvinding af metaller, enten mere generelt som f.eks. [21] der handler om udvinding metaller fra elektronikskrot (både pyro- og hydrometallurgiske metoder gennemgås). Der er mest fokus på hydrometallurgi i artiklen, men ikke meget om sjældne jordarter. Reference [19] gennemgår specifikt genanvendelse af sjældne jordarter, og har bl.a. et par udmærkede eksempler på udvinding af neodym fra magneter – f.eks. med opløsning i svovlsyre og fældning med oxalat.

Sidstnævnte er også emnet for referencerne [12],[ 13] og [14], der alle handler om at få sjældne jordarter til at danne bundfald med oxalat (et salt af oxalsyre) der så kan filteres fra. De fleste af de

procedurer der gennemgås er dog relativt komplicerede, og derfor virker de ikke så realistiske som kandidater i dette projekt.

Mere realistisk er til gengæld den procedure der rapporteres om i [16], hvor man fra en opløsning af jern og sjældne jordarter kan få f.eks. neodymoxid til at fælde ud ved en simpel pH-justering.

Derefter kan bundfaldet filtreres fra og tørres. Det er til dels denne artikel der har været inspiration for den proces til udvinding af neodym der beskrevet i afsnit 2.1.3

Endelig er der en artikel om pyrometallurgisk udvinding af neodym fra forskellige typer af skrot (bl.a. skrot fra magnetproduktion). Artiklen er måske ikke så relevant for dette projekt, men repræsenterer den mest anvendte metode der bruges i dag.

# 3. Genvinding af metaller fra kasserede harddiske

## 3.1 Neodym fra magneter

Neodym som rent metal er meget reaktivt og reagerer spontant med luftens ilt. Derfor sælges neodym ofte på verdensmarkedet som neodymoxid ( $Nd_2O_3$ ).

Som tidligere beskrevet, indeholder de fleste harddiske to magneter (enkelte nyere modeller har dog kun én magnet), der er limet fast på et forniklet jernbeslag. Det er ikke ønskeligt at behandle beslaget og magneterne sammen, så en metode til at adskille dem og udsortere magneterne skal udvikles.

Det største problem er ikke den lim der holder magneten, men selve den magnetiske kraft – der er langt større. Desuden er det næsten umuligt at håndtere eller f.eks. knuse magneterne så længe de er magnetiseret. Fra Hitachi [17] og andre kilder er det kendt at en simpel opvarmning af beslag og magnet demagnetiserer neodym-magneten og ødelægger enhver lim der kunne holde beslag og magnet sammen. Demagnetiseringen sker hvis magnet opvarmes til over det såkaldte curie-punkt (opkaldt efter Pierre Curie), som er omkring 320 °C for neodymmagneter.



**FIGUR 18**

FIRE EKSEMPLER PÅ KNUSNING OG KLIPNING AF MAGNETER. DET ER MULIGT MED EN Roterende KLINGE AT SAVNE MAGNETERNE I FINE STYKKER (ØVERSTE VENSTRE HJØRNE), MEN DET ER LANGT HURTIGERE BLOT AT KLIPPE DEM I GROVE STYKKER MED EN PLADESAKS (NEDERSTE VENSTRE HJØRNE). UANSET HVORDAN MAGNETERNE ER BLEVET KNUST, LADER DE SIG LET OPLØSE I SVOVLVSYRE.

Alle magneterne der er undersøgt har været belagt med nikkel. Formålet med nikkelaget er at beskytte magneten mod korrosion, men formodentlig også at give lidt mekanisk beskyttelse (selve magneten er ret skør og knækker let). Det er muligt at fjerne nikkelaget mekanisk (med en pincet eller lignende) da vedhæftningen til magneten ikke er særlig god, men det er besværligt og dermed dyrt. Den nemmeste løsning er at knuse magneten eller at klippe den i store stykker f.eks. med en pladesaks. Ved at knuse eller klippe magneten i stykker, blottlægges det rene magnetmateriale og det bliver muligt at opløse det – også selvom der stadig sidder flager af nikkelbelægningen rundt omkring.

Når magneterne således er knust i passende stykker kan de opløses i fortyndet svovlsyre. Der er eksperimenteret med forskellige koncentrationer af svovlsyre, og en balanceret afvejning mellem hurtig opløsning og godt arbejdsmiljø (koncentreret svovlsyre er ikke behageligt at arbejde med) fører frem til en koncentration på omkring 10-25 % svovlsyre.

#### Eksempel:

Magneter fra to forskellige harddiske afmagnetiseres (400 °C i en time), knuses på forskellig måde (de fire billeder i Figur 19) og opløses i 200 ml fortyndet svovlsyre (25 % v/v). Der tilsættes i alt 6,38 g knust materiale. Efter to timer er hydrogenudviklingen standset, hvad der indikerer at der ikke længere er noget der går i opløsning.

Opløsningen filtreres gennem filterpapir og fortyndes med vand til i alt 250 ml. Det er nikkelbelægning samt bor der tilbageholdes i filteret, da ingen af disse opløses i svovlsyre (i alt tilbageholdes ca. 0,3 gram materiale). Tilbage er en svagt lyserød og klar opløsning (se Figur 19) med omkring 1,8 g neodym og 4,2 g jern.

#### **3.1.1 Krystaller af neodymsulfat**

Opløses en større mængde magnetmateriale i samme volumen svovlsyre, kan koncentrationen af neodym blive så høj at en del af det langsomt bundfældes som store lyserøde krystaller af neodymsulfat. Disse krystaller filtreres let fra gennem et papirfilter og vejer 3,47 gram (se Figur 1). Bundfaldet er senere identificeret med røntgendiffraktion (XRD) til at være neodymsulfat med 8 krystalvand  $[\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ .

Filtratet (dvs. den væske der løb igennem filteret) kan ses i Figur 19. Koncentrationen af neodym i denne opløsning er dermed den højeste der er stabil (alt over denne grænse er blevet til krystaller).

Det er altså muligt at få neodymsulfat til at bundfælde sig selv, blot ved at opløse mere magnetmateriale i svovlsyren end hvad der er stabilt over tid. Denne metode er naturligvis interessant - idet den er meget billig og ikke kræver andre kemikalier end svovlsyre. Omvendt bliver den sidste (og største) del af det opløste neodym i opløsningen, og metoden kræver også flere dage før krystallerne dannes og kan filtreres fra.

#### **3.1.2 Dobbeltsalte**

For at fremtvinge dannelsen af tungtopløselige neodymforbindelser, der dannes hurtigt og som ikke efterlader ret meget neodym i opløsningen, er der lavet en række forsøg. På baggrund af litteraturen [22] er bl.a. opløsningen af neodym og jern fra eksemplet ovenfor blevet undersøgt. De mest lovende forbindelser er de



**FIGUR 19**  
FOTO AF EN MÅLEKOLBE MED OPLØSTE MAGNETER  
EFTER BORTFILTRERING AF NIKKELBELÆGNING OG  
BOR.

såkaldte dobbeltsalte, der består af sulfat, neodym på ionform ( $Nd^{3+}$ ) samt en anden positiv ion som f.eks. natrium, kalium eller ammonium efter formlen  $XNd(SO_4)_2$  hvor  $X$  er enten  $Na^+$ ,  $K^+$  eller  $NH_4^+$ .

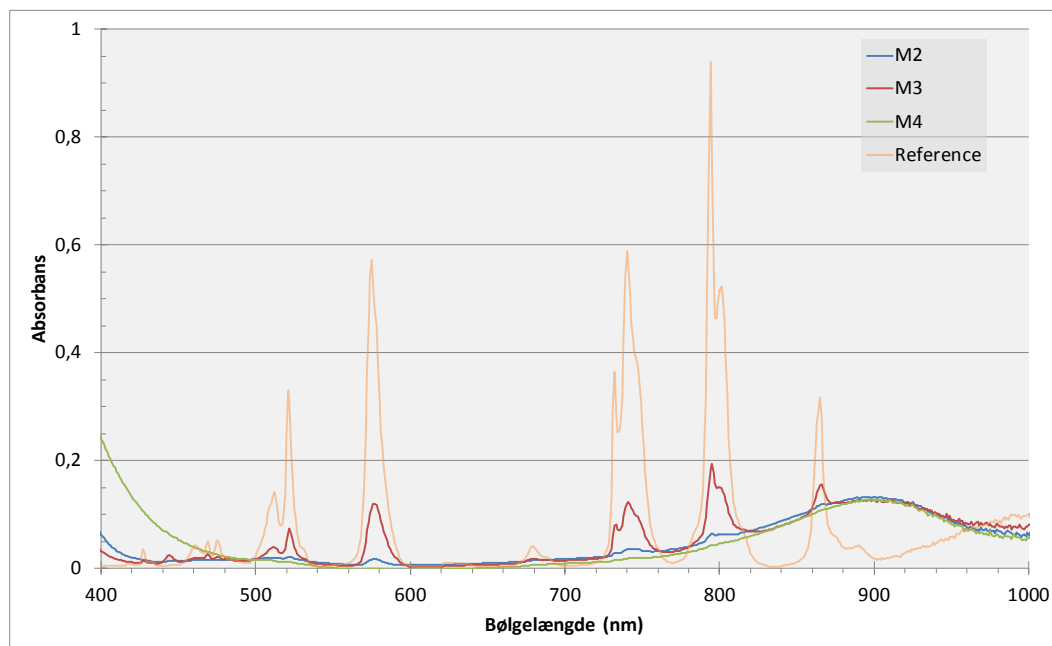
Alle disse forbindelser er relativt tungtopløselige og dannes let ved tilsætning af f.eks. natrium eller kalium hydroxid til den svovlsure magnetopløsning.

**TABEL 12**

VED TILSÆTNING AF NATRIUMHYDROXID (M2), AMMONIAK (M3) ELLER OXALSYRE (M4), DANNES TUNGTUPLØSELIGE NEODYMFORBINDELSER DER KAN FILTRERES FRA. I TABELLEN VISES ABSORBANSEN VED 575 NM FOR DE TRE PRØVER SAMMEN MED EN PRØVE MED KENDT NEODYMKONCENTRATION (REFERENCE). PÅ DENNE MÅDE KAN DET MÅLES HVOR MEGET NEODYM DER ER BLEVET TILBAGE I FILTRATET, OG SOM DERMED ER TABT. DET SES AT M2 OG M4 HAR DET LAVESTE TAB AF NEODYM. REFERENCEN BESTÅR AF EN KENDT MÆNGDE NEODYMSULFAT OPLØST I FORTYNDET SALTSYRE TIL KONCENTRATIONEN 0,0373 MOL PR. LITER.

Absorbans					
Prøve	575 nm	605 nm	korrigeret	konc. (M)	tab (%)
M2	0,0160	0,0060	0,0100	0,0007	1,31 %
M3	0,1130	0,0030	0,1100	0,0072	14,42 %
M4		-0,0030	0,0030	0,0002	0,39 %
Reference	0,5730	0,0040	0,5690	<b>0,0373</b>	

Efter dannelsen af dobbeltsalte, eller neodymoxalat der også er tungtopløseligt, skal neodymsaltene filtreres fra. Den væske der løber igennem filteret (filtratet) indeholder næsten altid lidt neodym. Koncentrationen af neodym i filtratet skal være så lav som muligt, idet denne mængde neodym må betragtes som tabt. Omvendt er det vigtigt, at de store mængder jern som også findes i opløsningen, ikke danner bundfald. Gør de det, vil bundfaldet bestå af både neodym- og jernsalte og vil have en væsentlig lavere værdi.



**FIGUR 20**

MÅLING AF ABSORBANSEN VED FORSKELLIGE BØLGELÆNGDER (SPEKTROFOTOMETER) FOR OPLØSNINGER HVOR NEODYM ER BORTFILTRERET SOM ENTEN ET DOBBELTSALT (M2 OG M3) ELLER SOM NEODYMOXALAT (M4). DEN MÆNGDE NEODYM DER FINDES I FILTRATET ER TABT, OG SKAL DERFOR VÆRE SÅ LILLE SOM MULIGT. REFERENCEN INDEHOLDER 0,0373 M NEODYMSULFAT OG ABSORBERER DERFOR KRAFTIGST. DET SES AT DER ER EN TYDELIG NEODYM TOP VED 575 NM SAMT AT INGEN FORBINDELSER ABSORBERER VED 605 NM (DENNE BRUGES DERFOR TIL NULPUNKTSKORREKTION). ENDELIG ABSORBERER JERN MED EN MEGET BRED TOP PÅ BEGGE SIDER AF 900 NM (OG UNDER 500 NM), HVORFOR DISSE OMRÅDER UNDGÅS.

For at måle hvilken metode der er bedst, er der lavet en række målinger med spektrofotometri. Neodym-ionen har en karakteristisk lyserød farve i vandige opløsninger, der i et spektrum genkendes på fem tydelige toppe (f.eks. lidt før 800 og ved 575 nm, se Figur 20). Jernsalte, som f.eks. jernsulfat, der også findes i samme opløsning, absorberer kraftigt ved lave bølgelængder (fra 450 nm og nedad) samt med en meget bred top omkring 900 nm. I Figur 20 ses tydeligt at prøverne (M2, M3, og M4) der både indeholder jern og neodym absorberer omkring 900 nm, hvorimod referencen (der kun indeholder neodym) ikke absorberer ved 900 nm. Med hensyn til at måle neodymkoncentrationen i filtratet, er toppen omkring 575 nm bedst – fordi jern ikke absorberer her, og man derfor kan få en uforstyrret direkte måling af neodym. Det antages at der er en lineær sammenhæng mellem absorbansen ved 575 nm og koncentrationen af neodym i prøverne. Denne antagelse er normalt korrekt ved absorbanser under 1. Både Tabel 12 og Figur 20 viser således, at neodymkoncentrationen er mindst når oxalsyre eller natriumhydroxid anvendes. Forsøget med tilsætning af ammoniak (M3) førte til dannelse af et dobbeltsalt, men der var over 14 % af neodymmængden der ikke blev filtreret fra.

### 3.1.3 Bundfældning ved opvarmning

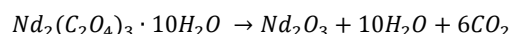
Neodymsulfat har den usædvanlige egenskab, at opløseligheden i vand (og fortyndet svovlsyre) falder med stigende temperatur. De fleste kemiske forbindelser, og dermed også jernsulfat, har det omvendt. Hvis man opvarmer en opløsning af neodym og jern i svovlsyre, vil neodymsulfat blive mindre opløseligt og jernsulfat mere opløseligt.

Forsøg med opvarmning af magnetopløsningerne fra eksempel 1 og 2 har vist, at det er muligt at fremprovokere dannelsen af neodymsulfat krystaller – og at disse kan filtreres fra. Opvarmning til både 60, 70, 80 og 90 grader er forsøgt, men fælles for disse forsøg er at det tager tid før bundfaldet dannes. Typisk går der 20-30 minutter før tydelige krystaller er dannet, og selv ved 90 grader vil der stadig være en del neodym som ikke udkrystalliserer.

Metoden kan derfor sammenlignes med afsnit 3.1.1, hvor neodymsulfat dannes over tid fra opløsninger med meget høje koncentrationer. Hvis disse metoder skal anvendes til genindvinding af neodym, skal der udvikles et lukket system hvor magnetopløsningerne kører rundt. Det vil sige at man tilsætter knuste magneter og svovlsyre, og fjerner ved filtrering først nikkelflager og bor og dernæst neodymsulfat når det er dannet (enten spontant eller ved opvarmning). Hvis dette skal fungere i praksis – og i længere tid – skal der også udvikles en metode til at fjerne jern fra opløsningen, ellers vil jernkoncentrationen stige løbende.

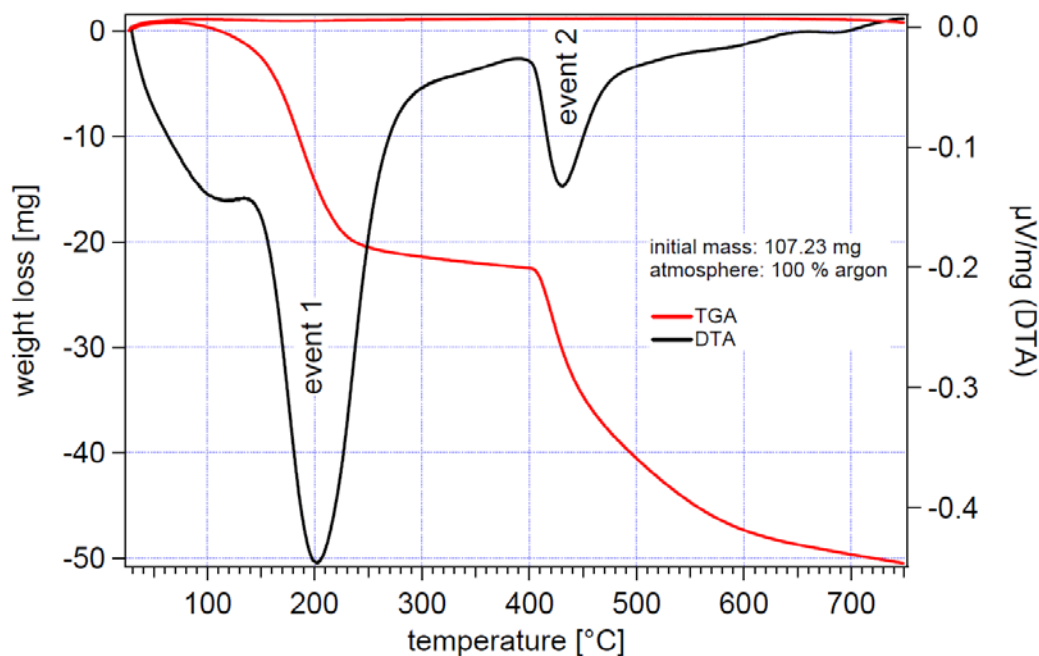
### 3.1.4 Konvertering til neodymoxid

Alt tyder på at det er neodymoxid der omsættes i store mængder på verdensmarkedet. Dette stof optræder bl.a. på den kinesiske børs for sjældne jordarter. Det er således neodymoxid de virksomheder der producerer magnetpulver bruger som råvare. Magnetpulveret købes derefter af andre virksomheder, der sintrer pulveret til den endelige form på magneten og som ofte også foretager overfladebehandling (nikkelbelægning) og magnetisering. I Danmark producerer virksomheden Sintex A/S magneter baseret på magnetpulver af typen jern-neodym-bor. For at konvertere neodymsulfat, eller et af de dobbeltsalte som er nævnt ovenfor, til neodymoxid, skal disse forbindelser først omdannes til noget andet. Det mest egnede stof er neodymoxalat (dvs. saltet af neodym og oxalsyre) der ved opvarmning afgasser vand og kuldioxid og bliver til neodymoxid efter den overordnede formel:



Neodymoxalat dannes let ved at opløse enten neodymsulfat eller et af dobbeltsaltene i oxalsyre. Oxalsyre er en simpel, og relativt billig, organisk syre der f.eks. findes naturligt i rabarber. Da neodymoxalat er mere stabilt end sulfaterne, sker omdannelsen af sig selv på få minutter (dvs. et nyt også mere stabilt bundfald af neodymoxalat dannes spontant) - og derefter kan neodymoxalat fjernes ved filtrering og omdannes til neodymoxid ved opvarmning i en ovn. Den sidste proces kaldes pyrolyse (eller forbrænding) og er nævnt flere steder i litteraturen [18-19].

Det svagt lyserøde neodymoxalat bliver ved opvarmningen omdannet til et meget finkornet sort neodymoxid pulver. To termogravimetriske (TGA) analyser er lavet med neodymoxalat (se Figur 21). Under analyserne opvarmes prøverne langsomt, og vægttabet af prøverne måles løbende for at detektere afgasning af vand og kuldioxid. Det der blev tilbage efter analyserne er sendt til røntgenanalyse og består af meget rent neodymoxid – der kan omsættes på verdensmarkedet, hvis der kan oparbejdes rimelig mængder.



**FIGUR 21**  
THERMAL GRAVIMETRIC ANALYSIS (TGA) OG DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC), UDFØRT PÅ EN PRØVE AF NEODYMOXALAT I EN ILTFRI ATMOSFÆRE. OPVARMNINGSHASTIGHEDEN VAR 10 GRADER PR. MINUT. DER ER OGSÅ LAVET ANALYSER PÅ SAMME PRØVE I EN ILTHOLDIG ATMOSFÆRE, MED NÆSTEN SAMME RESULTAT. DEN RØDE KURVE VISER VÆGTTABET SOM FUNKTION AF TEMPERATUREN OG DEN SORTE OM PROCESSERNE UDVIKLER ELLER PRODUCERER VARME. DET SES AT DER ER TO TYDELIGE "EVENTS" SVARENDE TIL AT KRYSTALVAND FORDAMPER VED CA. 200 GRADER OG AT KULDIOXID AFGASSES VED OMKRING 420 GRADER. DEREFTER SKER DER IKKE RET MEGET MERE OG TILBAGE ER KUN NEODYMOXID.

### 3.2 Optimering af neodym genvinding

Hidtil er flere metoder til genvinding af neodym fra magneter blevet undersøgt. Metoderne adskiller sig kun på den måde opløst neodym adskilles fra opløst jern. Overordnet kan man enten fælde neodym som et dobbeltsalt eller opløse så mange magneter at neodym (efter noget tid og evt. med en svag opvarmning) fælder ud som neodymsulfat. Ulempen ved den sidste metoder er, at det kun er under halvdelen af det opløste neodym der kan filtreres fra. Godt nok kan man opløse flere magneter i den samme væske, således at der ikke er noget der går tabt, men på et tidspunkt vil væsken indeholde så meget jern at processen holder op med at fungere.

Det er derfor besluttet at fokusere på metoden med at fælde neodym som et dobbeltsalt, ved at tilsætte natriumhydroxid til magnetopløsningen. Dette afsnit beskriver de forsøg der er foretaget for at optimere denne proces.

Processen består af følgende trin:

1. Afmagnetisering af magneterne ved en varmebehandling (400 °C i 30 minutter)
2. Knusning eller klipning af magneterne
3. Opløsning af magneterne i fortyndet svovlsyre

4. Fjernelse af bor og nikkelbelægning ved filtrering
5. Dannelse af neodym-dobbeltsalt ved tilsætning af natriumhydroxid
6. Fjernelse af dobbeltsalt ved filtrering

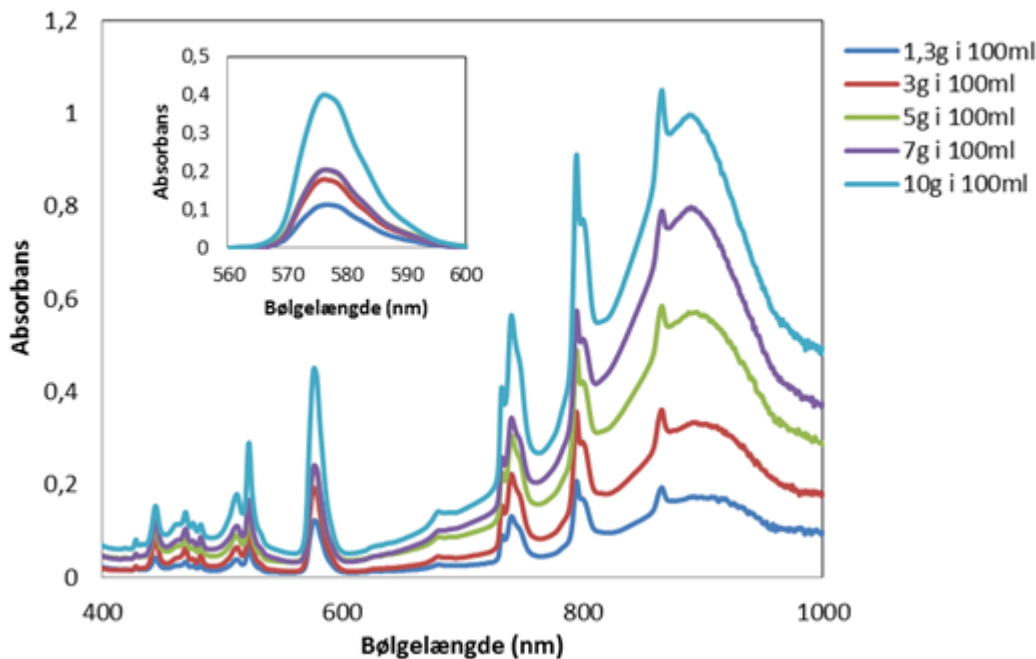
Følgende faktorer indflydelse på processen og genvindingsgraden er blevet undersøgt:

- Koncentration af svovlsyren
- Forholdet mellem magneter (vægt) og svovlsyrevolumen (badbelastning)
- Opløsningstid for magneterne
- Indflydelse af nikkelaget på opløsningstiden
- Skylning af bortfiltrerede materialer
- Fældningstiden for dobbeltsaltet

### 3.2.1 Magnet mængde opløst i svovlsyre

Klipning i mindre stykker forbedrede opløsningen af magneterne idet kortere tid er nødvendigt. Forskellen er dog relativ lille. Tilsættes mere end 10 g magneter pr. 100 ml syre, vil opløsningstiden blive længere og længere – indtil det punkt hvor den begrænsede mængde syre ikke længere kan opløse alt magnetmaterialet.

Intensiteten af både neodym- og jern signalet i et spektrum optages fra 400 til 1000 nm steg næsten lineært med den mængde magnet som blev opløst i 100 ml af svovlsyre (20 %, se Figur 22).

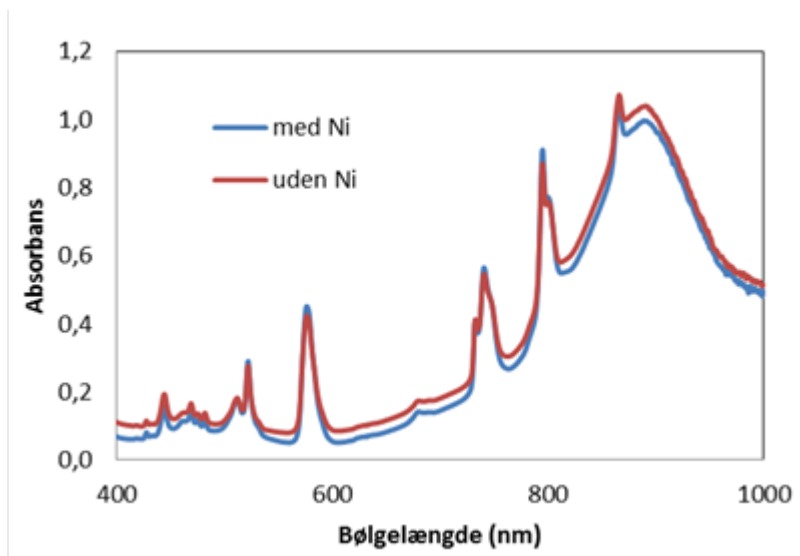


**FIGUR 22**  
 SPEKTRUM AF MAGNET OPLØSNINGER MED FORSKELLIGE KONCENTRATIONER AF MAGNETER I 100 ML FORSYNDET SVOVLSYRE (20 %). MAN SER KLART DE FEM TOPPE DER ER TYPISK FOR NEODYM, SAMT DEN STORE BREDE TOP FOR JERN OMKRING 900 NM. BEMÆRK AT IKKE ALLE MAGNETER INDEHOLDER LIGE MEGET NEODYM, F.EKS. ER KURVEN FOR 5 OG 7 GRAM MAGNET NÆSTEN SAMMENFALDENDE I DET LILLE BILLEDE DER ZOOMER IND PÅ EN AF NEODYMTOPPENE. OMKRING 900 NM, SOM ER JERNABSORBANS, ER DER KLAR FORSKEL PÅ KURVEN FOR 5 OG 7 GRAM MAGNET.

### 3.2.2 Nikkelaget på magneten

Intensiteten et spektrum med og uden nikkellag på magneterne ændrer sig ikke (se Figur 23). Hvis magneterne er knust i passende små stykker, ser nikkellaget altså ikke ud til at forstyrre opløsningen af magneten. Det giver derfor ikke mening at forsøge at fjerne nikkellaget mekanisk inden opløsningen af magneterne.

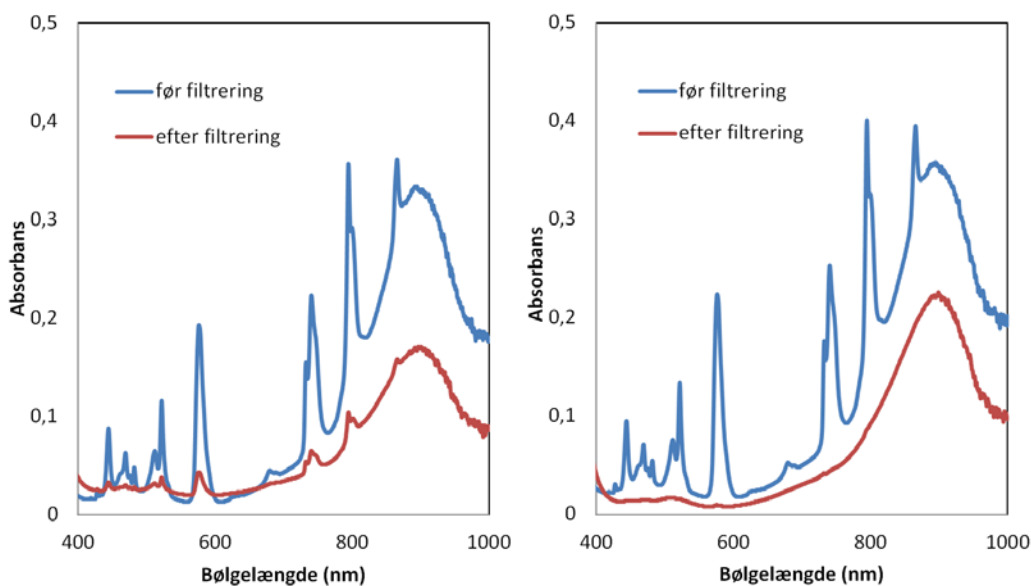




**FIGUR 23**  
SPEKTRUM AF FILTRAT FRA OPLØSTE MAGNETER MED OG UDEN NIKKELAG.

### 3.2.3 Fældningstiden for dobbeltsaltet

Genvindingsgraden steg til 91 % fra 25 % ved at øge fældningstiden til 24 timer fra 10 minutter. Der er ingen spor at de fem karakteristiske toppe for neodym i det højre spektrum i figuren herunder. Det indikerer, at næsten alt neodym er blevet fældet som dobbeltsalt (Figur 24).



**FIGUR 24**  
SPEKTRUM FOR MAGNETOPLØSNINGEN FØR OG EFTER AT NEODYM-DOBBELTSALTET ER FILTRERET FRA. DEN VENSTRE KURVE ER MED 10 MIN. FÆLDNINGSTID FOR DOBBELTSALTET OG DEN HØJRE KURVE FOR 24 TIMERS FÆLDNINGSTID (INDEN FILTRERING).

### 3.2.4 Skylning af filtret

Hvis mængden af magneter øges til f.eks. 10 g pr. 100 ml fortyndet svovlsyre, vil noget af magnetmaterialet ende op i filteret – selv efter 24 timers opløsning. Dette materialer er normalt spild, men det viser sig at en del af materialet hurtig opløses af vand (Figur 25), og en efterfølgende analyser viser da også at denne metode øger den samlede genvindingsgrad for neodym. Tilføjelse af skyllevand, øgede drastisk genindvindingsgraden til 91 % fra omkring 50 %.



**FIGUR 25**

FOTO AF FILTERPAPIR EFTER FILETERING AF OPLØSTE MAGNETER. BILLEDET TIL VENSTRE ER FØR SKYLNING MED VAND OG BILLEDET TIL HØJRE EFTER SKYLNING MED DESTILLERET-VAND.

### 3.2.5 Opløsningstid

Muligheden for at reducere opløsningstiden er også blevet undersøgt. Vægten af det magnetmateriale der ikke opløses ud af 10 g var henholdsvis 4,1 g, 2,9 g og 0,41 g med henholdsvis 2 timer, 6 timer og 24 timer som opløsningstid.

Genvindingsgraden var tilsvarende 52 %, 62 % og 91 %.

### 3.2.6 Svovlsyre koncentration

En række forsøg med at opløse magneterne i en 10 % fortyndet svovlsyre, i stedet for som normalt 20 %, er blevet forsøgt – dels for at reducere udgiften til svovlsyre (der dog ikke er et dyrt kemikalie) og dels fordi en mere fortyndet opløsning vil være mindre ubehagelig at arbejde med. Effektiviteten mht. at opløse magneterne i 10 % svovlsyre er højere end for 20 % svovlsyre. Vægten af uopløst magnetmateriale efter 24 timer er henholdsvis 0,24 g og 0,41 g ved 10 % og 20 % svovlsyre. Det er formodentlig på grund af den lavere viskositet af 10 % svovlsyre. Forskellen er dog ikke større end det kan forklares med at de magneter der bruges til forsøgene ikke er ens – idet de stammer fra tilfældige harddiske blandt de 100 der er udtaget til analyse. Hvis nogle magneter f.eks. har et tykkere nikkellag end andre, vil denne forskel påvirke vægten af den uopløselige fraktion. Ulempen ved at anvende en mere fortyndet svovlsyre er, at man skal være mere forsigtigt med at tilsætte natriumhydroxid til 10 % svovlsyre. Hvis pH-værdien i opløsningen bliver for høj, vil jern også blive fældet sammen med neodym-dobbelsaltet og dette vil føre til et mindre rent produkt. Genvindingsgraden for 10 % svovlsyre var lidt mindre, omkring 77 %, sammenlignet med tilsvarende forsøg med 20 % svovlsyre. Det kan være at dannelse af dobbelsaltet er mere stabilt i 20 % svovlsyre.

En kombination af opløsning i 10 % svovlsyre og fældning i 20 % svovlsyre er også forsøgt (se nedenstående tabel). Efter filtrering af magnetopløsning tilsættes svovlsyre til 20 % koncentration og neodym dobbelsalts fældes ved tilsætning af natriumhydroxid. Genvindingsgraden stiger dermed til næsten det samme som fra opløsning og fældning i 20 % svovlsyre. Opløsningstiden kan dog forkortes i 10 % svovlsyre, men proceduren er naturligvis lidt mere kompliceret.

### 3.2.7 Oversigt

- Magnetopløsningstiden skal være 24 timer i 20 % svovlsyre. Magneterne kan opløses hurtigere i 10 % svovlsyre.
- Fældningstiden for dobbelsaltet skal være mindst 6 timer. Koncentration af svovlsyre er kritisk for dobbelsaltdannelse - 10 % svovlsyre er ikke nok.
- En simpel skylning af filteret efter opløsning af magneterne og den første filtrering, sikrer at evt. uopløst neodym alligevel genvindes. Alternativt skal mængden af magneter der opløses pr. 100 ml syre holdes omkring 5 g.

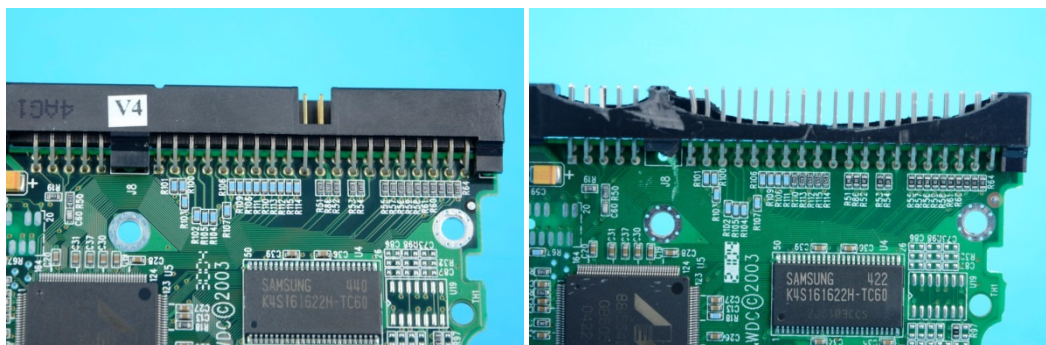
**TABEL 13**

GENVINDINGSGRAD AF NEODYM FRA MAGNETER (10 GRAM PR. 100 ML SVOVLSYRE). I BEREGNING AF GENVINDINGSGRADEN ER DET ANTAGET AT MAGNETERNE I GENNEMSIT INDEHOLDER 31 % NEODYM (DVS. 10 GRAM MAGNETER INDERHOLDER 3,1 GRAM NEODYM)

Koncentration af svovlsyre	Opløsningstid	Skylning af filtret	Fældningstid	Genvindingsgrad
20 %	24 timer	Nej	10 minutter	25,0 %
20 %	2 timer	Ja	24 timer	52,4 %
20 %	6 timer	Ja	24 timer	62,0 %
20 %	24 timer	Ja	4 timer	78,9 %
20 %	24 timer	Ja	24 timer	91,1 %
10 %	24 timer	Ja	24 timer	77,4 %
10 %	24 timer	Ja	24 timer (i 20 % svovlsyre)	90,5 %

### 3.3 Guld fra stik på printpladen

Guld er, måske med undtagelse af platinmetallerne, det mest kostbare af alle de mange materialer man kan finde i elektronikskrot og i harddiske. Som tidligere beskrevet findes guld på kontakter (for at sikre lav kontaktmodstand) samt enkelte andre steder (f.eks. inde i nogle af de integrerede kredse). Guldbelægningen af de stik der forbinder harddisken med resten af computeren, repræsenterer den største mængde guld på en harddisk (dette gælder uanset om stikket er af den gamle IDE type eller den nye kaldet SATA).

**FIGUR 26**

NÆRBILLEDER AF TO PRINTPLADER FRA TO (NÆSTEN) IDENTISKE HARDDISKE. PÅ BILLEDET TIL VENSTRE ER IDE-STIKKET INTAKT OG MAN KAN SE GULDBELÆGNINGEN Gennem ÅBNINGEN I PLASTKAPPEN. BEMÆRK AT KUN DEN DEL AF STIKKET DER ER UNDER KAPPEN ER GULDBELAGT (FOR AT SPARE PENGE). PÅ BILLEDET TIL HØJRE ER GULDET BORTÆTSET SELEKTIVT, OG DELE AF PLASTKAPPEN ER BRÆKKET AF FOR AT VISE HVOR EFFEKTIV METODEN ER.

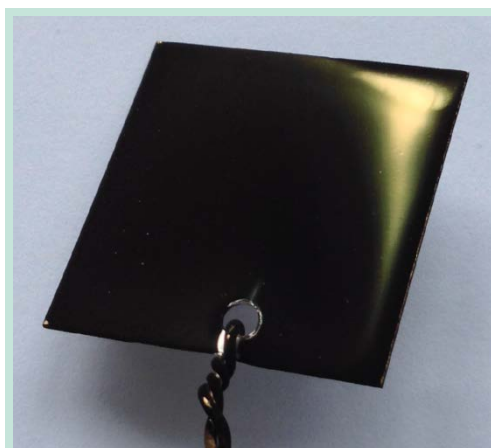
Der findes kommercielt tilgængelige opløsninger, der selektivt angriber og opløser guld, uden at skade andre metaller som f.eks. nikkel og kobber. Da stikkene består af en kobberlegering med et tyndt lag nikkel efterfulgt af et endnu tyndere lag guld, kan disse opløsninger bruges til at fjerne guld uden af skade resten af printpladen.

Denne metode har bl.a. været brugt til at estimere hvor meget guld der er på stikkene i en typisk printplade. Alternativt kan man smelte printpladen og derudfra forsøge at adskille metallerne metallurgisk eller elektrokemisk. Denne metode anvendes af de store smelteværker som Umicore i Belgien, Aurubis i Tyskland eller Boliden i Sverige.

Ved at anvende f.eks. den kommercielle guldstripper (som disse selektive ætseopløsninger kaldes) Entreat 100 fra Engelhardt, er et antal stik på printplader strippet for guld. Guldet bliver i opløsningen og koncentrationen vil derfor øges efterhånden som flere og flere printplader har været igennem. Det tager omkring 15 minutter at fjerne guldet, men det er muligt at neddyppe mange printplader på samme tid.

Enkelte forsøg er udført hvor guld fra disse opløsninger er udfældet på en kobberplade (se Figur 27), ved at sætte strøm til opløsningen hvor kobberplader er katode (negativ) og en rustfri stål plade anode (positiv). Derved reduceres guld ved katoden og det oxidationsmiddel som guldstripperen indeholder oxideres ved anoden.

Der er kun udført et begrænset antal forsøg med at udfælde guld fra disse opløsninger, men det ser ud til at fungere – og være stabilt igennem længere tid. Normalt vil en guldstripper have en begrænset anvendelsestid, fordi koncentrationen af guld kontinuerligt stiger – samtidigt med at oxidationsmidlet opbruges. Ved løbende at udfælde guld på en plade fjernes guld og oxidationsmidlet bringes tilbage til sin aktive form.



**FIGUR 27**  
FOTO AF GULD UDFÆLDET FRA GULDSTRIPPER  
PÅ EN KOBBERPLADE

Selvom overstående virker lovende, er det dog besluttet at opgive at udvinde guld fra printplader på denne måde. Dels vil man kun fat i det guld der sidder "udvendigt" på printpladen, og dels vil printpladens værdi (når den bagefter sælges UDEN guld) falde tilsvarende.

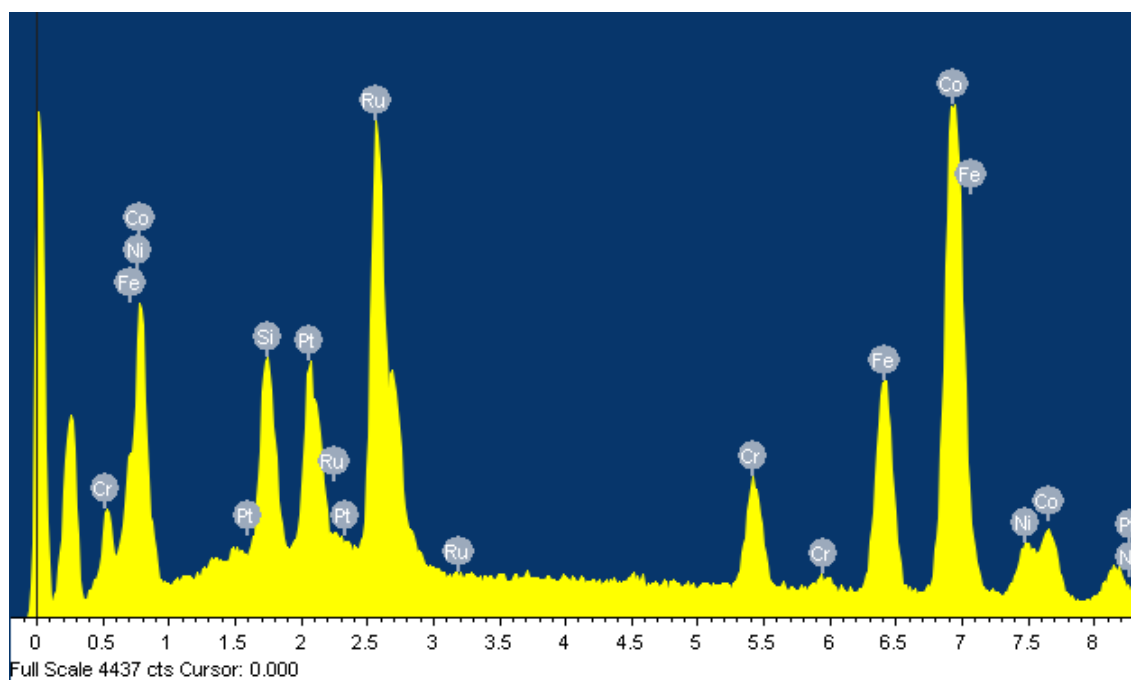
De firmaer der køber printplader fra elektronikskrot, betaler en pris, der er baseret på stikprøver af printpladerne. Hvis man på forhånd har fjernes guldet, vil printpladens værdi være væsentligt lavere og det kan derfor næppe betale sig at forsøge at konkurrere med virksomheder der gennem mange år har opbygget en kompetence med at udvinde guld og andre metaller fra printplader.

### 3.4 Metaller fra pladelageret

Den sidste af de 3 vigtigste områder af harddiskene, der er lavet forsøg med, er overfladen på pladelageret. De øverste lag af pladelageret er dem der indeholder den magnetiske information på harddisken. Ifølge litteraturen har sammensætningen af disse lag ændret sig en del gennem tiden, men nogle ting er dog fælles. Det magnetiske lag består af en legering af kobolt, en eller flere ædelmetaller samt et mere aktivt metal som f.eks. krom. Krom bruges også som vedhæftningslag til det umagnetiske lag af kemisk nikkel der er nedenunder. Kemisk nikkel indeholder omkring 12 % fosfor (og er derfor ikke magnetisk) og kan derfor poleres. Selve substratet er en skive af aluminium.

Det ses af Figur 28 og Tabel 14, at de øverste magnetiske lag indeholder både platin (Pt) og ruthenium (Ru), samt kobolt (Co). Derudover er der en del jern (Fe) og krom (Cr). Krom bruges bl.a. for at sikre en god vedhæftning til underliggende lag. Endelig er der signal fra både nikkel (Ni) og aluminium (Al), men dette formodes at stamme fra substratet og det kemiske nikkellag der åbenbart ikke har været helt opløst.

Ruthenium tilhører også gruppen af platinmetaller og er både sjældent og værdifuldt, dog ikke helt så dyrt som platin. Både kobolt og nikkel er også relativt dyre metaller, i modsætning til jern, krom og aluminium. Se evt. oversigten over metallernes priser i Bilag 1:.



**FIGUR 28**  
ENERGIDISPERSIVT RØNTGENSPEKTRUM AF DET YDERSTE LAG AF PLADELAGERET. SELVE PLADEN (EN ALUMINIUM SKIVE) ER OPLØST OG DET UNDERLIGGENDE NIKKELLAG ER OGSÅ FJERNET INDEN DETTE SPEKTRUM ER OPTAGET.

**TABEL 14**  
SAMMENSETNINGEN AF OVERFLADELAGENE PÅ PLADELAGERET. DE FIRE UDVALGTE SPEKTRA ER FRA FORSKELLIGE PLADELAGRE, SPEKTRUM 2 OG 3 ER MÅLT TO FORSKELLIGE STEDER PÅ SAMME PLADELAGER, OG GIVER SÅLEDES ET INDBLIK I USIKKERHEDEN PÅ MÅLINGERNE.

Element	Al	Cr	Fe	Co	Ni	Si	Sr	Ru	Pt	Total
Spectrum 1	2.44	8.43	24.80	28.34	7.52		1.53	20.03	6.91	100.00
Spectrum 2	2.02	8.50	24.63	24.76	5.98			25.75	8.35	100.00
Spectrum 3	4.35	8.14	23.39	24.20	6.72			24.78	8.42	100.00
Spectrum 4		4.86	13.73	39.44	4.28	3.57		23.26	10.87	

# 4. Opstilling til mekanisk adskillelse

## 4.1 Procedure for mekanisk adskillelse

I løbet af projektet er en række delprocesser blevet undersøgt i laboratoriet, men henblik på at finde en robust og universel procedure til at adskille harddiske mekanisk. Den oprindelige plan var at genkende hver enkelt harddisk, f.eks. ved at maskinen "læste" etiketten, men det overraskende store antal harddiskproducenter, -modeller og varianter, har gjort denne fremgangsmåde umulig. Ud af de 100 undersøgte harddisk har kun 4 været ens. Og med et så lille statistisk grundlag, kan det vise sig at være endnu lavere.

Planen blev derfor ændret til at acceptere at alle harddiske er ukendte og uens, og i stedet udvikle en procedure som kan bruges til at adskille hovedparten af de undersøgte harddiske. Nedenstående procedure kan bruges til mere end 80 % af de undersøgte harddiske, baseret på systematisk afprøvning af 10 tilfældigt udvalgte. Der er ganske få harddiske, specielt blandt de meget gamle enheder, hvor låget f.eks. at forseglet med tape – eller hvor magneterne ikke kan fjernes blot ved at løsne skruer. Disse under 20 % af harddiskene må systemet derfor afvise.



**FIGUR 29**  
PLADELAGER AFMONTERET MED PRESSECYLINDER. DER PRESSES MED EN KRAFT PÅ MELLEM 3,5 OG 6 KN.

Som udgangspunkt i design af systemet til mekanisk adskillelse, er der indledningsvist udført en procesanalyse med henblik på at identificere og beskrive de nødvendige trin der skal udføres for at

adskille en harddisk. De "nødvendige procestrin" er dem der skal til for at fjerne og udsortere låget, magneterne, printpladen og aluminiumsrammen. Disse fire elementer repræsenterer over 90 % af materialeværdien (se kapitel 2). Resultaterne fra denne procesanalyse kan ses i Bilag 3:

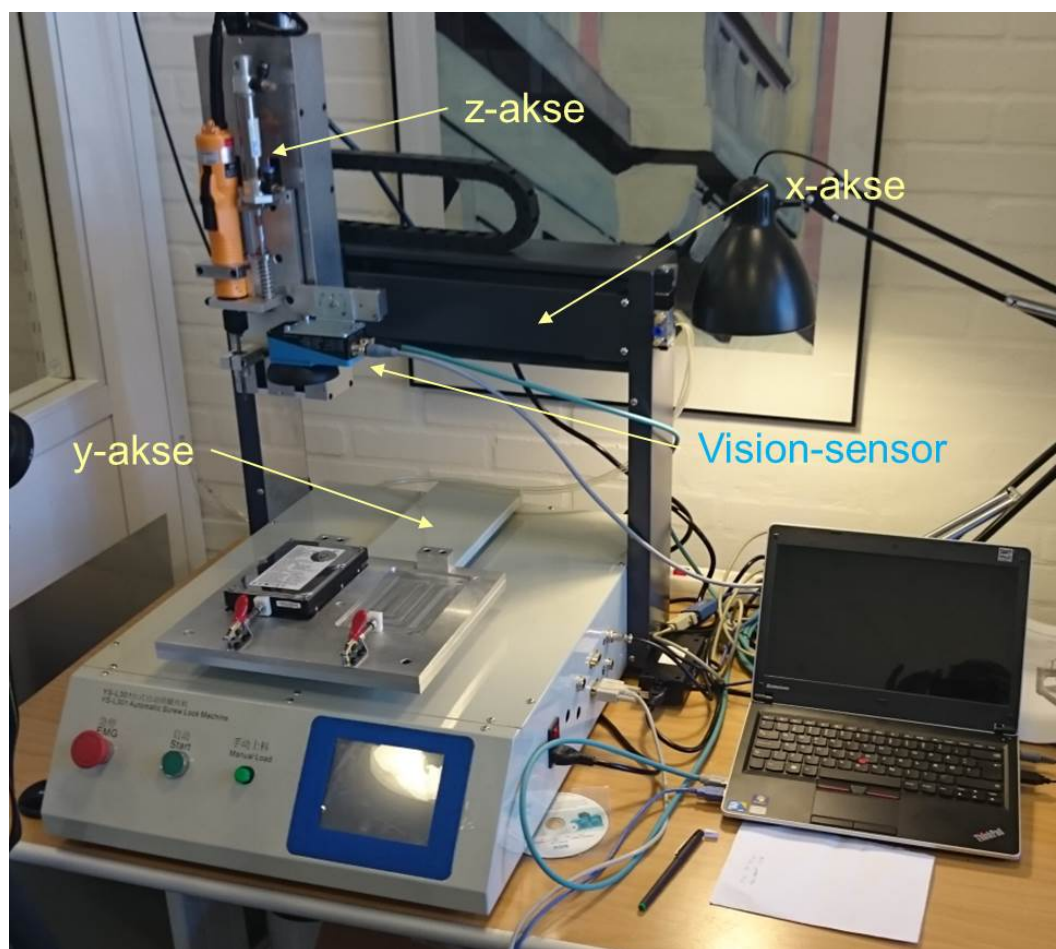
Det er i nærværende projekt valgt at fokusere på at konstruere en demonstrationsopstilling vedr. trin 4 og trin 6, fjernelse af skruer fra låg og printplade. Dette skyldes at disse operationer er helt essentielle for adskillelsesprocessen, samt at det er muligt at udbygge opstillingen til også at omfatte de øvrige trin i ovenstående tabel. Andre adskillesestrin såsom trin 12 og 13, udpresning af motor og læsearm, er også blevet undersøgt og demonstreret manuelt vha. en laboratoriepresse, se Figur 29.

Forsøgene med udpresning af lejer til både læsearm og spindelmotor har vist, at metoden er ret robust og fungerer uanset om motoren (og læsearmen) er integreret i rammen eller er selvstændig enhed der er skruet fast i rammen. Motoren i ovenstående figur er et eksempel på en motor der er integreret i rammen.

I enkelte tilfælde er aluminiumsrammen knækket før motoren blev presset ud. Det kan således være nødvendigt at bore for med et kopbor, for at sikre at rammen knækker der hvor det ønskes.

#### 4.2 Opbygning af demonstrator system

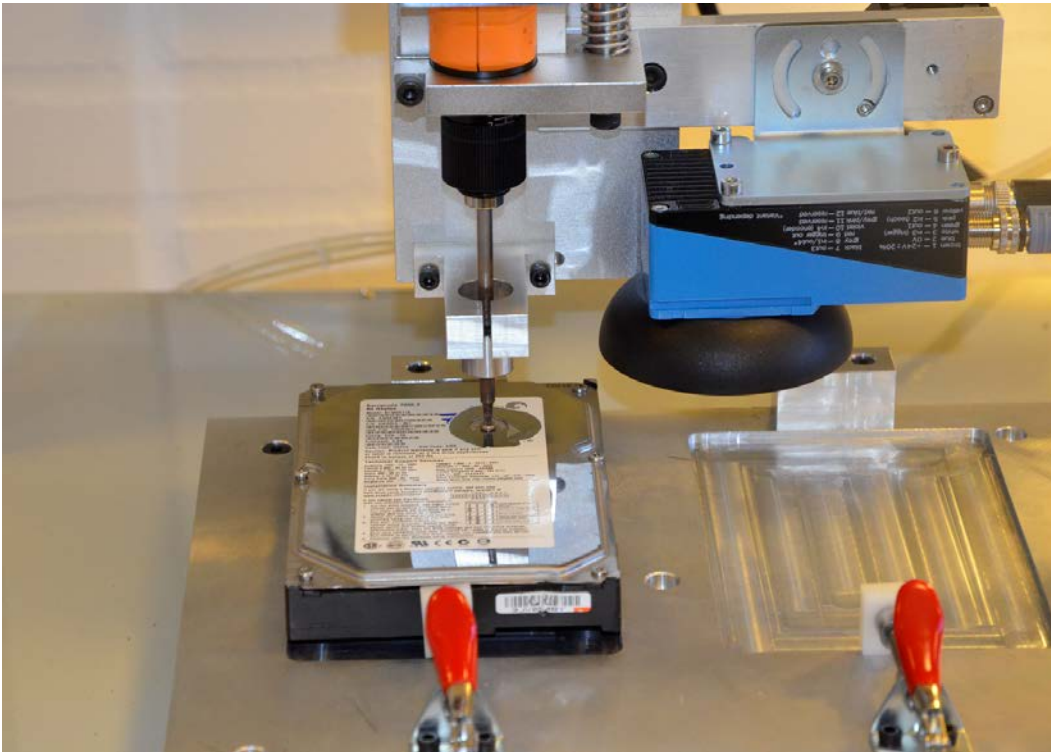
Demonstratorsystemet er opbygget på baggrund af en YS-4301 Automatic Screw Lock Machine, kombineret med en SICK Inspector PIM60 maskin-vision sensor til identifikation og lokalisering af skruer og komponentdele, samt en computer til styring.



FIGUR 30  
DEMONSTRATOROPSTILLING TIL AUTOMATISK AT LØSNE (OG FJERNE) SKRUE PÅ HARDDISKE.

Maskinen består af et emneplan, der kan bevæge sig i y-retningen, samt et værktøjsplan der kan bevæge sig i x og z-retningen, se Figur 30. På værktøjsplanet er monteret et vision-kamera med indbygget belysning. Til at kontrollere opstillingen er der udviklet et MATLAB baseret styresystem.

I ovenstående konfiguration placeres harddisken på emnebordet, hvorefter maskinen ved hjælp af vision-sensoren scanner, finder og gemmer positionen af hver enkelt skrue på harddisks lag eller printplade. Herefter flytter maskinen en automatske skruemaskine rundt og løsner hver enkelt skrue, se Figur 31.



**FIGUR 31**  
SKRUEMASKINEN I FÆRD MED AT AFMONTERE SKRUER. DE TRE SKRUER PÅ VENSTRE SIDE AF HARDDISKEN ER LØSNET.

Især 100 % sikker identifikation af skruer har voldt nogle problemer. Dette skyldes at kontrastforholdene, med den nuværende belysning, på grund af skruernes placering og både skruernes og lågets blanke overflader, gør det vanskeligt for sensoren at "se" skruernes omrids. Dette kan løses med bedre og mere styret belysning.

### 4.3 Performance af demonstratorsystem

Demonstratorsystemet er blevet testet på 6 repræsentativt udvalgte harddiske. Harddiskene er udvalgt fra perioden 2003 til 2007, da harddiske fra dette interval udgør 59 % af mængden af de harddiske der undersøgt i løbet af projektet. Af denne delmængde er der udvalgt 2 harddiske fra hver af producenterne Seagate, WD og Samsung, da harddiske fra disse 3 producenter udgør 66 % af alle harddiskene der indgår i undersøgelsen.

I den nuværende konfiguration er der målt følgende performance for demonstratorsystemet, idet kontrollerprogrammet dog konfigureres manuelt afhængigt af om det er låg eller printkort der skal skrues af:

- Identifikation af skruer og afmontering for harddisk-låg giver en taktid på ca. 71 sekunder
- Identifikation af skruer og afmontering for printkort giver en taktid på ca. 50 sekunder
- Med korrekt konfigureret kontrollerprogram opnås 100 % skrue genkendelse



De opnåede takttider kan forbedres betragteligt ved at forbedre systemets vision-sensor, med højere opløsning og bedre optik. Dette forventes at kunne halvere takttiden, da kameraet bruger over halvdelen af takttiden på at affotografere hele arealet. Der kan yderligere også optimeres på xyz-bordets vandringsmønster, med en reduktion af takttiden som følge.

Overordnet kan har systemet følgende kendetegn:

Semi-automatisk:

Man skal selv placere harddisken

Hastighed:

Takt-tiden er ca. 71 sekunder for et harddisklåg

Pris:

Omkring 75.000, inkl. xyz-bord, skruemaskine, vision-kamera og tilpassede dele. Dertil kommer programmering og softwareudvikling

#### **4.4 Konklusion for mekanisk adskillelse**

På basis af den udførte procesanalyse er det for relativt få midler lykkedes at konstruere en demonstratoropstilling der kan identificere og lokalisere skrue på harddisklåg og print kort og afmontere disse. Systemet er baseret på et vision kamera til ca. 20.000,- og en simpel skrueautomat med xyz-bord til ca. 55.000 kr. Dertil kommer dog udvikling af software samt programmering. Da nogle af skrueene på harddiskenes låg er skjult af mærkater, er det nødvendigt først at fjerne disse med en roterende stålborste.

Med den rette konfiguration af kontrolprogrammet kan denne simple opstilling lokalisere og afmontere 100 % af skrueene på harddisklåg og printkort.

Det har dog inden for projektets rammer ikke været muligt at lave et fuldt ud automatiseret system, i stand til at håndtere alle typer harddiske og alle nødvendige procestrin.

Med testopstillingen er det sandsynliggjort at en fuldautomatisk maskine til adskillelse af harddiske kan bygges, og at den samlede pris på komponenterne en sådan maskine vil være 150.000 til 250.000 kr. (afhængig af krav til robusthed, hurtighed, etc.). Dertil kommer udgifter til programmering.

Med udgangspunkt i opgørelsen over de enkelte materialefraktioners værdi i en harddisk, samt input fra projektets følgegruppe, anses det pt. ikke for økonomisk rentabelt at udvikle og producere en maskine der kan foretage 100 % automatisk adskillelse af harddiske. Dette skyldes ikke mindst den usikkerhed der er omkring priserne på de forskellige materialefraktioner, specielt omkring printplader og neodym.

# Referencer

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Voice\\_coil](http://en.wikipedia.org/wiki/Voice_coil)
- [2] V. Zakian & T. Ono, "Design of a Hard Disk Drive System", Springer London (2005)
- [3] S. Kozawa, "Trends and Problems in Research of Permanent Magnets for Motors – Addressing Scarcity Problem of Rare Earth Elements", Science & Technology Trends, No. 38, pp. 40-54, January (2011)
- [4] N. Takahashi, Y. Kashiwakura & K. Shibata, "Recording Density Enhancement and Material-Process Technologies for Magnetic Hard Disks", Fuji Electric Review, Vol. 46, No. 1 (2000)
- [5] Dansk Producentansvars System (DPA system), "WEEE og BAT statistik -2011", udgivet september 2012 (se [www.dpa-system.dk](http://www.dpa-system.dk))
- [6] R.L. Moss et al., "Critical Metals in Strategic Energy Technologies", European Commission JRC and the Hague Centre for Strategic Studies, EUR 24884 EN (2011)
- [7] M. Humphries, "Rare Earth Elements: The Global Supply Chain", Congressional Research Service (CRS), U.S.A. R41347 (2012)
- [8] Takeda et al., "Recovery of neodymium from a mixture of magnet scrap and other scrap", J. of Alloys and Comp., 408-412, pp. 387-390 (2006)
- [9] F.C. Liew, Pyrometallurgy Versus Hydrometallurgy, Internal report from TES-AMM (Australia/Singapore), April (2008)
- [10] J.F. Peeters, P. Vanegas, J.R. Duflou, T. Mizuno, S. Fukushige & Y. Umeda, "Effect of boundary conditions on the end-of-life treatment of LCD TVs", CIRP annals – Manufacturing Technology, Vol. 62, pp. 35-38, Copenhagen (2013)
- [11] M. Ueberschaar & R. Götze, "Rare earth elements in WEEE: Case study of Neodymium potential in hard disc drives", Proceedings of the 2nd Science congress of the German association for solid waste management (DGAW), Rostock (2012)
- [12] J.A.N. Friend, "The Solubility of Neodymium Sulphate, etc.", chapter in book, publ. January 1930
- [13] D-Y. Chung, et al., "Solubility of Rare Earth Oxalate in Oxalic and Nitric Acid Media", J. of Ind. And Engineering Chem., Vol. 4, No. 4, pp. 277-284, December (1998)
- [14] E-H. Kim, et al., "Development of Oxalate Precipitation Process...", J. of Ind. And Engineering Chem., Vol. 6, No. 1, pp. 37-46, January (2000)
- [15] S. Kozawa, "Trends and Problems in Research of Permanent Magnets for Motors – Addressing Scarcity Problem of Rare Earth Elements", Science & Technology Trends, No. 38, pp. 40-54, January (2011)
- [16] C.-H. Lee et al., "Selective Leaching Process for Neodymium Recovery from Scrap Nd-Fe-B Magnet", Metallurgical & Materials Trans., Vol. 44A, pp. 5822-5833, December (2013)
- [17] K. Baba, Y. Hiroshige & T. Nemoto, "Rare-earth Magnet Recycling", Hitachi Review, Vol. 62, No. 8, pp. 452-455 (2013)
- [18] J. Szalatkiewicz, "Robotic disassembly of the waste of electrical and electronic equipment (WEEE), based on the criteria of identification and analysis of waste characteristics, presented on the example of computer hard disk drives", PLM11 8th Int. Conf. on Product Lifecycle Management, pp. 287-296, Eindhoven (2011)

- [19] K. Binnemans et al., "Recycling of rare earth: a critical review", *J. of Cleaner Production*, pp. 1-22, Vol. 51 (2013)
- [20] J. Cui & E. Forssberg, "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review", *J. of Hazardous Materials*, pp. 243-263, Vol. B99 (2003)
- [21] J. Cui & L. Zhang, "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review", *J. of Hazardous Materials*, pp. 228-256, Vol. 158 (2008)
- [22] J.W. Lyman & G.R. Palmer, "Recycling of Neodymium Iron Boron Magnet Scrap", United States Department of the Interior, Investigation 9481 (1991)
- [23] B.A.A. Balboul & A.Y.Z. Myhoub, "The characterization of the formation course of neodymium oxide from different precursors: A study of thermal decomposition and combustion processes", *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, pp. 95-101, Vol. 89 (2010)

**Bilag 1: Periodisk system med danske navne og priser (april 2013)**

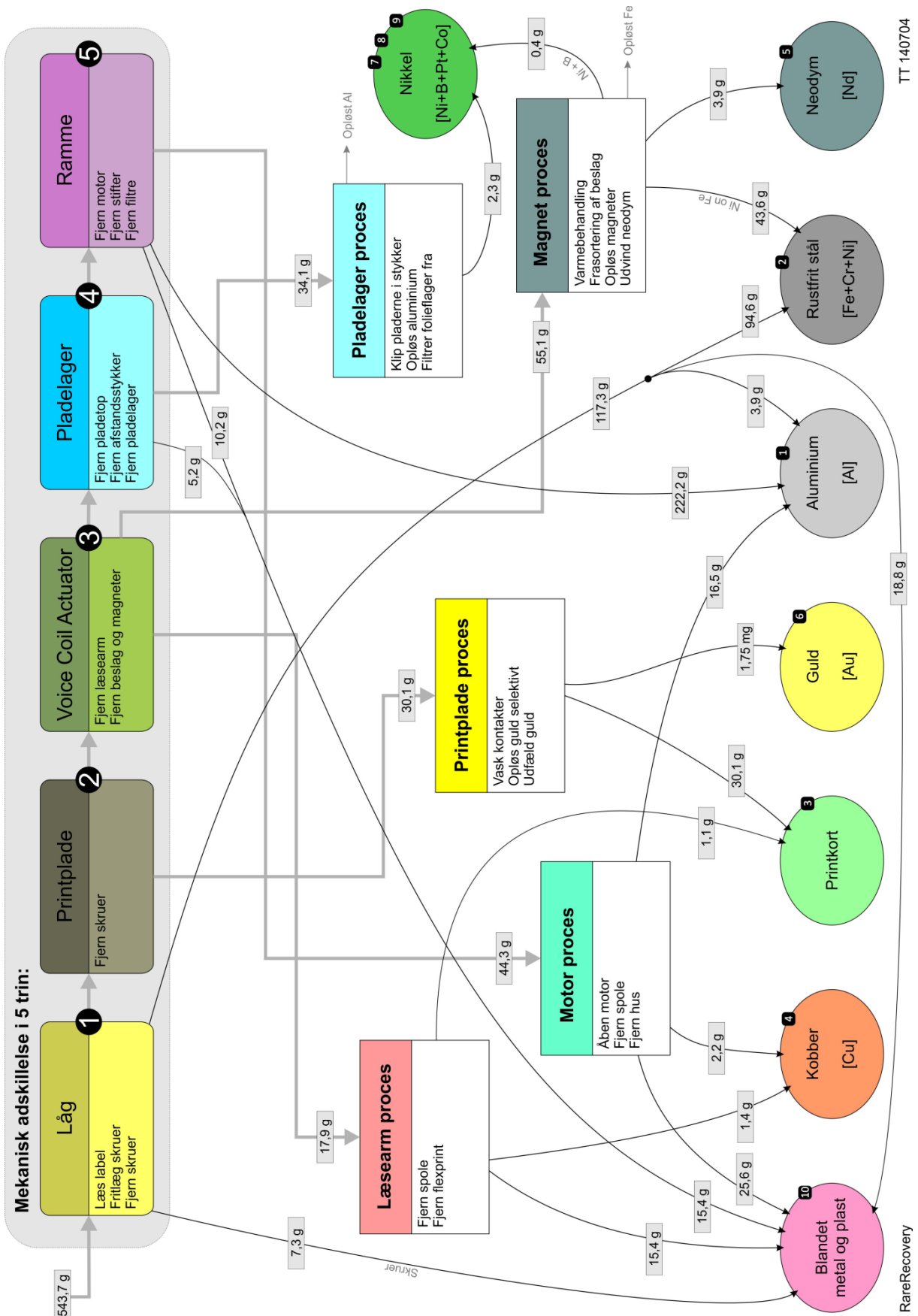
Aa		Aa		Aa		Aa		Aa	
Ikke relevante		Platinmetaller		Sjældne jordarter		Fundet i hårddiske			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H Hydrogen -259,2	He Helium -272	Li Lithium 186 55,3	Be Beryllium 1280 1086	B Bor 2040	C Carbon 3500	N Nitrogen -210	O Oxygen -219	F Fluor -220	Ne Neon -249
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Na Natrium 97,5	Mg Magnesium 651	Al Aluminium 660 1,8	Si Silicium 1420 2,7	P Fosfor 44,1	S Svovl 119	Cl Klor -101	Ar Argon -189	K Kalium 62,3 84,5	Kr Krypton -157
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Rb Rubidium 38,5	Sr Strontium 769	K Kalium 62,3 84,5	Ca Calcium 845	Sc Scandium 1539	Ti Titan 1675	V Vanadium 1900	Cr Krom 1890	Mn Mangan 1244	Fe Jern 1535
47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Rb Rubidium 38,5	Sr Strontium 769	Y Yttrium 1509 64,4	Zr Zirkonium 1860 31,9	Nb Niobium 2420 135,2	Mo Molybdæn 2620 41,1	Tc Technetium 2200	Ru Ruthenium 2450	Rh Rhodium 1970 40000	Pd Palladium 1550 27040
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Fr Francium 27	Ra Radium 700	La Lanthan 920 13,8	Ce Cesium 28,5 85,9	Ba Barium 725	Hf Hafnium 2200	Ta Tantal 3000	W Wolfram 3370	Re Rhenium 3180 3593	Os Osmium 2700
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
Xe Xenon -112	I Iod 113	Te Tellur 450 125	Sb Antimon 631 10,7	Sn Tin 232 23,3	Pb Bly 327 2,0	Bi Bismuth 271 19,0	Po Polonium 254	At Astat 302	Rn Radon -71
137	138	139	140	141	142	143	144	145	146
Lu Lutetium 1652	Yb Ytterbium 419	Tm Thulium 1545	Er Erbium 1487	Ho Holmium 1461	Dy Dysprosium 1407	Tb Terbium 1356	Gd Gadolinium 1312	Eu Europium 826	Sm Samarium 1072
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
Lr Lawrencium	No Nobelium	Md Mendelevium	Fm Fermium	Es Einsteinium	Cf Californium	Bk Berkelium	Cm Curium	Am Americium 1200	Pu Plutonium 640
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
Lu Lutetium 1652	Yb Ytterbium 419	Tm Thulium 1545	Er Erbium 1487	Ho Holmium 1461	Dy Dysprosium 1407	Tb Terbium 1356	Gd Gadolinium 1312	Eu Europium 826	Sm Samarium 1072
171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
Lu Lutetium 1652	Yb Ytterbium 419	Tm Thulium 1545	Er Erbium 1487	Ho Holmium 1461	Dy Dysprosium 1407	Tb Terbium 1356	Gd Gadolinium 1312	Eu Europium 826	Sm Samarium 1072

**Aa**  
 Navn  
 Smeltepunkt (°C)  
 Værdi (\$/kg)\*

RareRecovery © TT 140630

\*) www.metaprices.com, april 2013

**Bilag 2: Oversigt over materialestrømme og fraktioner**



Rare Recovery		Version 2 (TT141201)
1392		
Procedure til automatisk adskillelse af kasserede harddiske (HDD).		
	Blandet metal	► Billede til vision systemet
	Blandet plast	↻ HDD roteres 180 grader
	Rustfrit stål	◇ Trin udføres kun hvis en betingelse er opfyldt
	Aluminium	
	Magneter med beslag	
	Printplader	
	Motor og plade lager	
	Læsearm, fleksprint og "plug"	
<b>Trin</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Bemærkninger</b>
1	HDD fjernes manuelt fra den kasserede computer og placeres med låget opad og stikket fremad på et rullebånd	
2	HDD fanges af 6 stifter i en holder og denne placeres på en drejetallerken med låget mod kameraet	
3	Kameraet læser etiketten og stålborster fjerner derefter etiketter og labels fra låget	Hvis label ikke læses skal lågets materialer sorteres senere
►	Der tages et billede af låget	
↻	HDD drejes 180°	
4	Skrueerne til låget skrues ud og fjernes	
►	Der tages et billede af printpladen	Billedes tages samtidig med at der skrues
5	Låget fjernes med en sugkop	Låget består nogle gange af både aluminium og rustfrit stål
↻	HDD drejes 180°	
6	Skrueerne til printpladen skrues ud og fjernes	
►	Der tages et billede af magneterne inde i harddisken (låget er jo væk)	Billedes tages samtidig med at der skrues
7	Printpladen fjernes med undertryk (støvsuger eller lignende)	
8	Skumisolering og lignende fjernes	De fleste HDD har noget skum under printpladen
↻	HDD drejes 180°	
9	Hvis der en skrue i topmagneten skrues denne (eller disse) ud	Typisk en eller ingen skrue
10	Hvis der en skrue i den såkaldte "plug" til læsearmen skrues denne (eller disse) ud	Typisk to skrue
11	Topmagneten fjernes med elektromagnet	
↻	HDD drejes 180°	
12	Motoren og pladelageret presses ud med et stempel fra bagsiden (læsearmen bøjes)	1000 kg burde være nok, måske skal der et kopbor på først
13	Læsearmen presses ud med et stempel fra bagsiden	I nogen HDD sidder armen direkte på aluminiumsrammen
►	Der tages et billede af bundmagneten (læsearmen er nu væk)	Billedes tages samtidig med ovenstående trin
↻	HDD drejes 180°	
14	Hvis der en skrue i bundmagneten skrues denne (eller disse) ud	Typisk to skrue
15	Bundmagneten fjernes med elektromagnet	
16	Andre identificerede skrue fjernes	
17	Plastdele og filtre suges ud af rammen	
18	Rammen lægges i kassen med aluminium (holderen giver slip)	Holderen går til trin 2



## **RareRecovery**

Rapporten har haft til formål at undersøge mulighederne for at opkoncentrere sjældne jordarter (specielt neodym) og andre metaller fra gamle harddiske i elektronikaffald, der modtages på danske genbrugspladser. Som det er i dag, bliver harddiskene typisk knust – og derefter forsøger man i store anlæg at frasortere f.eks. aluminium og kobber. Men de sjældne jordarter, og en række andre metaller, går tabt i denne proces og havner i bunken ”blandet metal”.

Der er udviklet mekanismer til en automatisk adskillelse af harddiskene samt kemiske og elektrokemiske metoder til udvinding af metaller og sjældne jordarter. Projektet er gennemført sammen med DCR Miljø A/S i perioden 2014-15. Harddiske er valgt fordi de har en standardiseret størrelse og fordi alle mekaniske harddiske indeholder neodym magneter.

Projektleder er Peter Torben Tang (IPU).  
[www.ipu.dk](http://www.ipu.dk)



**Miljø- og  
Fødevarerministeriet**  
Miljøstyrelsen

Strandgade 29  
1401 København K  
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

**[www.mst.dk](http://www.mst.dk)**