

## De problemen van hergebruik gezien vanuit de stofstromenproblematiek

**Citation for published version (APA):**

Lambert, A. J. D. (1995). *De problemen van hergebruik gezien vanuit de stofstromenproblematiek*. (EUT - BDK report. Dept. of Industrial Engineering and Management Science; Vol. 72). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1995

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

De problemen van  
hergebruik gezien vanuit  
de stofstromenproblematiek

door: A.J.D. Lambert

Report EUT/BDK/72  
ISBN 90-386-0165-4  
ISSN 0929-8479  
Eindhoven 1995

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Lambert, A.J.D.

De betekenis van hergebruik gezien vanuit de  
stofstromenproblematiek / door: A.J.D. Lambert. -  
Eindhoven : Eindhoven University of Technology,  
Department of Industrial Engineering and Management  
Science, Section of Manufacturing Technology. - Ill. -  
(Report EUT/BDK, ISSN 0929-8479 ; 72)

Met lit. opg., reg.

ISBN 90-386-0165-4

NUGI 689/837

Trefw.: recycling.

*Trefwoorden:* Hergebruik, recycling, massastromen, productieprocessen, produktieketens, LCA

*Doelgroepen:* Dit rapport geeft een inleiding in het systematisch modelleren van herverwerkingsprocessen van complexe producten, gebaseerd op massastroomschema's. Het hergebruik wordt beschouwd in het kader van de totale produkt-levenscyclus. Het rapport wordt als reader verschaft aan studenten die het keuzecollege "Bedrijfskundige aspecten van Hergebruik" volgen. Het is van belang voor studenten en voor onderzoekers die zich op systematische wijze in dit onderwerp willen verdiepen en oog hebben voor de grotere verbanden. Voorts is het van belang voor degenen die zich bezighouden met de informatiestromen die verbonden zijn met herverwerkingsprocessen.

---

# DE BETEKENIS VAN HERGEBRUIK

gezien vanuit de

# STOFSTROMENPROBLEMATIEK

✕

door: A.J.D. Lambert

✕

Eindhoven University of Technology  
Department of Industrial Engineering and Management Science  
Section of Manufacturing Technology  
Eindhoven, the Netherlands

## Inhoudsopgave.

1.	<i>De problematiek van grondstoffen en afval</i>	2
1.1.	Het productieproces	2
1.2.	De produkt-levenscyclus	4
1.2.1.	Extractie	5
1.2.2.	Productie	6
1.2.3.	Consumptie	8
1.2.4.	Verwijdering	9
2.	<i>Plaats van produktafval binnen de afvalstroom</i>	10
2.1.	De verschillende afvalstromen	10
2.2.	Produktafvallen	12
3.	<i>Het verwerken van produktafval</i>	18
3.1.	Vorbereidende processen	18
3.2.	Disassembleren en ontmantelen	18
3.3.	Ontsluiten	20
3.4.	Scheiden	21
3.5.	Opwerken	22
3.6.	Hergebruiken	23
3.7.	Eindverwerking	24
3.8.	Levenscyclus	24
4.	<i>Theoretische beschouwingen</i>	26
4.1.	Energie- en milieu-optimalisatie	26
4.1.1.	Energie-optimalisatie	26
4.1.2.	Milieu-optimalisatie	29
4.2.	Optimale disassemblagediepte	30
	<i>Referenties en verdere literatuur</i>	34

---

## De betekenis van hergebruik, gezien vanuit de stofstromenproblematiek.

© A.J.D. Lambert, 10-8-1995.

De bedoeling van dit rapport is om een samenhangend beeld te schetsen van verwerkingsprocessen van produktafval. Dit beeld is opgebouwd aan de hand van een standaardmodel voor een productieproces, dat is gebaseerd op materiaal- en energiestromen. Aangevoerd wordt dat de levenscyclus van produkten beschouwd kan worden als een keten van soortgelijke processen. Hierbij komen proces- en produktafval vrij. De verschillen tussen productie en ontmanteling worden duidelijk gemaakt. Het geheel wordt geïllustreerd met behulp van een aantal praktijkvoorbeelden.

Het rapport wordt afgesloten met een korte literatuurlijst.

# 1. Problematiek van grondstoffen en afval.

## 1.1. Het productieproces.

*Productie van goederen* wordt gekenmerkt door transformatie van materialen, waarbij waarde aan deze materialen wordt toegevoegd. Dit betekent dat de waarde van de producten groter is dan de offers die voor deze productie moeten worden gebracht. Tot deze offers behoren de kosten van de benodigde grondstoffen, arbeid en kapitaalgoederen, de kosten van de benodigde energiedragers en hulpstoffen, en de kosten van het verantwoord verwerken van afvalstoffen.

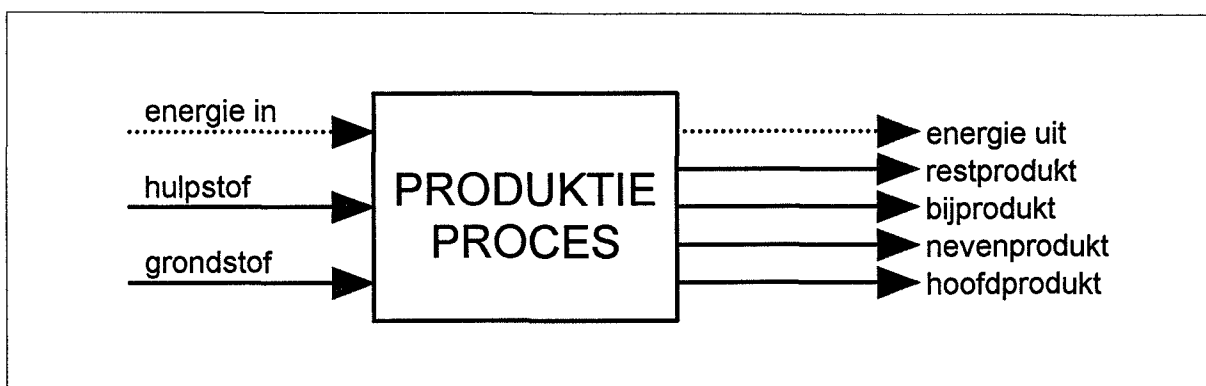
*Waarde* is een subjectief en relatief begrip dat bepaald wordt door de gebruiker. In abstracte zin kan men stellen dat de waarde van een produkt vaak gerelateerd is aan het aantal keuzemogelijkheden dat het een gebruiker biedt en aan de mogelijke substituten. Zo zal de waarde van een auto toenemen naarmate ze meer functionaliteit biedt. De waarde van bietsuiker is gerelateerd aan die van het substituuat rietsuiker.

Zoals figuur 1 laat zien, kan men goederenproductie opvatten als een black box die doorlopen wordt door materiaal- en energiestromen. De black box stelt hier het transformatieproces voor. Bij de materiaalstromen onderscheidt men aan de inputzijde de grondstoffen en de hulpstoffen. De grondstoffen vindt men (grotendeels) in het produkt terug. De hulpstoffen zijn nodig om het productieproces naar behoren te doen verlopen. Hulpstoffen en energiedragers samen worden wel *utilities* genoemd.

Aan de outputzijde onderscheidt men hoofdprodukten, nevenprodukten, bijprodukten en restprodukten.

De productie van *hoofdprodukten* is het primaire doel van het productieproces. Ze zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van de toegevoegde waarde.

*Nevenprodukten* hebben eveneens een hoge waarde maar komen onbedoeld vrij. Een



Figuur 1: Schema van een productieproces.

bekend voorbeeld levert de aardolieraffinage. Het hoofdprodukt is hier benzine, maar onvermijdelijk ontstaat ook nafta, dat als grondstof voor de petrochemische industrie wordt ingezet.



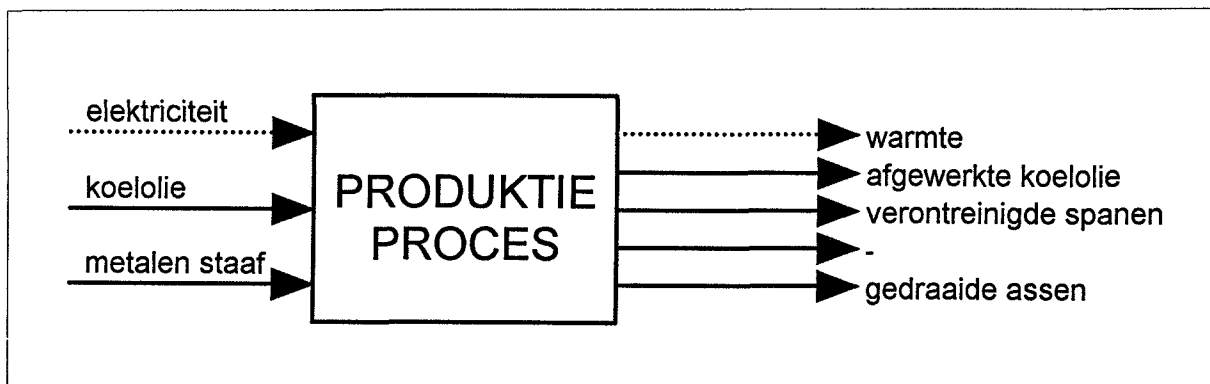
*Bijprodukten* zijn eveneens onbedoelde produkten. Hun specifieke waarde is echter veel lager dan die van de hoofd- en nevenprodukten, en vaak zelfs lager dan die van de grondstof. Voorbeelden zijn: de zware fractie bij de aardolieraffinage, en afval van de zuivelindustrie dat als veevoedingrediënt kan worden gebruikt.

*Restprodukten* hebben geen economische waarde of een negatieve waarde. Restprodukten vormen een belemmering voor de produktie. Ze zijn namelijk onderworpen aan regelgeving en het kost geld om er van af te komen. Ook zijn er voorschriften waardoor grenzen worden gesteld aan de produktie van restprodukten vanwege hun gevaar voor mens en milieu. Er zijn dan speciale voorzieningen nodig om de hoeveelheid restprodukten te verminderen aan de bron of om ze zodanig te behandelen dat hun schadelijkheid tot een verantwoord niveau wordt teruggebracht.

Restprodukten worden in het algemeen verdeeld in *emissies* naar bodem, water en lucht, en *afval*. Het begrip afval wordt in het algemeen gereserveerd voor hanteerbare of stapelbare reststoffen, zoals vaste afvalstoffen en vloeibare afvalstoffen in containers. Dit kan dan weer verder verdeeld worden in gewoon (bedrijfs-)afval en gevaarlijk afval.

Als voorbeeld (figuur 2) wordt het produceren van een as uit een stalen staaf uitgewerkt. De grondstofstroom bestaat uit onbewerkte metalen staven, de hulpstofstroom uit koelolie. Als hoofdprodukt ontstaan assen en als bijprodukt (met olie vervuilde) spanen. Deze kunnen als bijprodukt worden beschouwd omdat een verwerkend bedrijf, mits aan een aantal voorwaarden is voldaan, er een klein bedrag voor wil betalen. De afgewerkte koelolie is een typisch restprodukt. Er is regelgeving die voorschrijft dat deze stof niet geloosd mag worden maar moet worden overgedragen aan een bevoegde inzamelaar. Dit bedrijf brengt daarvoor kosten in rekening.

De energiestroom die het proces binnengaat is elektrische energie, ze verlaat het proces weer in de vorm van warmte. Ook dit is een reststroom. In dit geval mag ze zonder meer



Figuur 2: Voorbeeld van een produktieproces.

geloosd worden en kost dus niets. Toch zal men ook deze reststroom zo klein mogelijk willen houden. Iedere kiloJoule die het bedrijf langs deze weg verlaat is immers ingekocht in de vorm van elektriciteit.

Bij ieder proces wordt voldaan aan *massabehoud* en *energiebehoud*, omdat massa en energie niet verloren gaan. Dit betekent dat, over langere tijd bezien, de massa- en energiestromen die een produktieproces binnenkomen even groot zijn als de stromen die het proces verlaten. Een eventueel klein verschil wordt veroorzaakt door de opslagcapaciteit van het

systeem.

Hoewel de hoeveelheid energie niet verloren gaat, neemt de kwaliteit van de energie altijd af. Deze kwaliteit drukt men uit in de hoeveelheid mechanische energie die men maximaal met behulp van de betreffende energie kan opwekken. Thermische energie met een temperatuur die dicht bij de omgevingstemperatuur ligt heeft een lage kwaliteit.

## 1.2. De produkt-levenscyclus.

Een produktiesysteem van goederen wordt dus doorlopen door materiaal- en energiestromen. Deze komen natuurlijk ergens vandaan en gaan ook weer ergens naar toe. Ooit zijn ze aan de natuur onttrokken, bijvoorbeeld via landbouw en delfstofwinning, en uiteindelijk zullen ze ook weer in de natuur terecht komen. Het tijdsinterval hier tussen in heet de *verblijfstijd* in het technosysteem. Het begrip technosysteem zal nu worden uitgelegd.

Om te beginnen wordt het wat vage begrip: 'de natuur' nader omschreven, namelijk als een systeem. Dit noemen we het *ecosysteem*. Dit kan men op zijn beurt weer opdelen in een aantal compartimenten zoals geosysteem en biosysteem [1], waartussen massa- en energiestromen lopen die transformaties ondergaan. Hiernaast wordt dan het *technosysteem* gedefinieerd. Beide systemen wisselen onderling materie en energie uit en in beide systemen vinden transformatieprocessen plaats zoals die in figuur 1 schematisch zijn weergegeven. Voor beide systemen gelden natuurlijk ook dezelfde natuurwetten. Het verschil tussen beide systemen wordt gevormd door de *mens*. Het is de mens die de processen welke in het technosysteem plaatsvinden min of meer bestuurt. Het technosysteem is het systeem van door de mens voortgebrachte en gebruikte goederen. Het woord 'systeem' impliceert dat deze goederen met elkaar samenhangen.

Het zal duidelijk zijn dat de grens tussen ecosysteem en technosysteem vaag is. Bovendien zijn er goede argumenten voor de stelling dat het technosysteem een bijzonder deel van het ecosysteem is.

Figuur 3 toont een schematische weergave van de stofstroom door het technosysteem. Dit proces wordt wel aangeduid met de term: *industriële metabolisme* [2a].

Zojuist is gesteld dat alle materiaalstromen die in productieprocessen worden getransformeerd aan de natuur zijn onttrokken. Dit proces heet *extractie*.

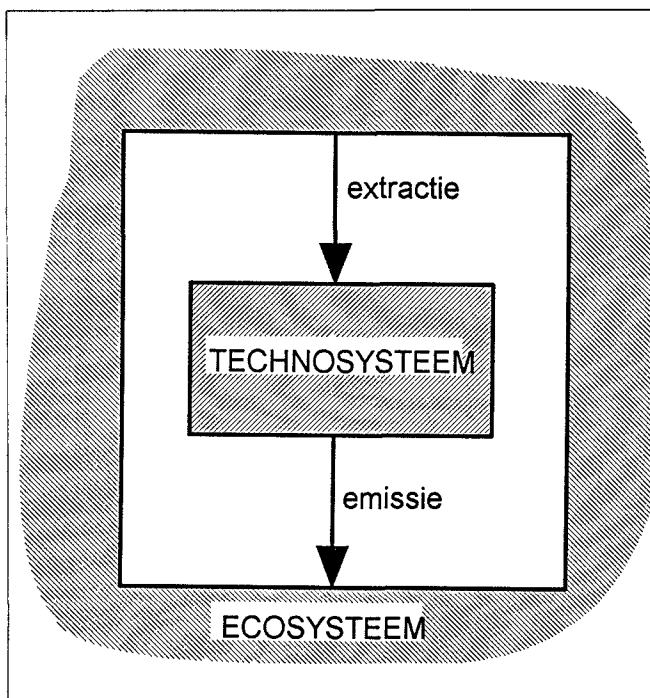
Na extractie vindt *productie* plaats. Hierbij wordt de ingaande grondstofstroom niet rechtstreeks aan de natuur onttrokken, maar is een voortbrengsel van een voorgaand productie- of extractieproces.

De essentie van productie is waardetoevoeging. Dit impliceert dat het produkt uiteindelijk zal worden geconsumeerd. Het *consumptieproces* kan analoog aan een productieproces beschreven worden. Dit wordt uitgewerkt in paragraaf 1.2.3.

Bij de schematische beschrijving van productieprocessen (figuur 1) werden de materiële aspecten van het gebruik van kapitaalgoederen stilzwijgend weg gelaten. De reden daarvoor is dat kapitaalgoederen vaak een langere levensduur hebben dan de tijdschaal waarop naar de stromen van grondstoffen enzovoorts wordt gekeken. Het verbruik van kapitaalgoederen kan men op dezelfde wijze beschrijven als de consumptie van duurzame verbruiksgoederen.

Voor veel productieprocessen zijn de daarmee gepaard gaande materiaalstromen beduidend kleiner dan die van grond- en hulpstoffen. Indien geen gegevens bekend zijn wordt wel gerekend met ongeveer 10% van de massastroom. Een voorbeeld is een booreiland dat in onbruik raakt. Hoewel de massa van een dergelijk eiland (beton, metaalconstructies) indrukwekkend is, valt ze in het niet bij de hoeveelheid ruwe aardolie die met deze installatie gedurende de levensduur ervan is gewonnen.

Na consumptie wordt het produkt afgedankt. Voordat restprodukten en afgedankte produkten op een verantwoorde wijze in het milieu kunnen worden gebracht dienen ze aan een *verwerkingsproces* te worden onderworpen. De aard van zo'n verwerkingsproces is afhankelijk van de eigenschappen van de betreffende (rest-)produkten. Enkele voorbeelden van verwerkingsprocessen zijn:



Figuur 3: Materiaal-uitwisseling tussen technosysteem en ecosysteem.

- Afgassen moeten naverbrand en gefilterd worden alvorens ze geloosd kunnen worden.
- Vervuilde waterstromen moeten gezuiverd worden alvorens ze geloosd kunnen worden op het oppervlaktewater.
- Proces- en produktafvallen kunnen al dan niet gecontroleerd gestort worden. Hierbij kunnen voorzieningen nodig zijn om percolatiewater en stortgas op te vangen.
- Proces- en produktafvallen kunnen gecontroleerd verbrand worden. De hierbij ontstane afgassen moeten gereinigd worden.
- Produktafvallen moeten ontdaan worden van gevaarlijke componenten en bedrijfsvloei-stoffen en kunnen ontdaan worden van onderdelen die herbruikbaar zijn als onderdeel of als materiaal.

In figuur 4 is de loop van de stofstromen door het technosysteem aan de hand van bovenstaande uiteenzetting vereenvoudigd weergegeven. Hoewel niet alleen bij de consumptie, maar bij ieder proces dat in deze figuur is weer gegeven reststromen vrijkomen en hulpstoffen nodig zijn, is dit ter vereenvoudiging weggelaten.

### 1.2.1. Extractie.

Extractie is een bijzondere vorm van productie. Extractie onderscheidt zich van andere productieprocessen doordat de grondstof stroom aan de natuur wordt onttrokken. Dit heeft

een aantal specifieke kenmerken vergeleken met een grondstofstroom die door een voortdurend productieproces wordt geproduceerd. Men is namelijk afhankelijk van een aantal, niet te beïnvloeden, natuurlijke omstandigheden. Deze hebben invloed op kwantiteit en kwaliteit van de grondstof. Ook de milieu-beïnvloeding is bij extractie anders van karakter dan bij andere vormen van productie.

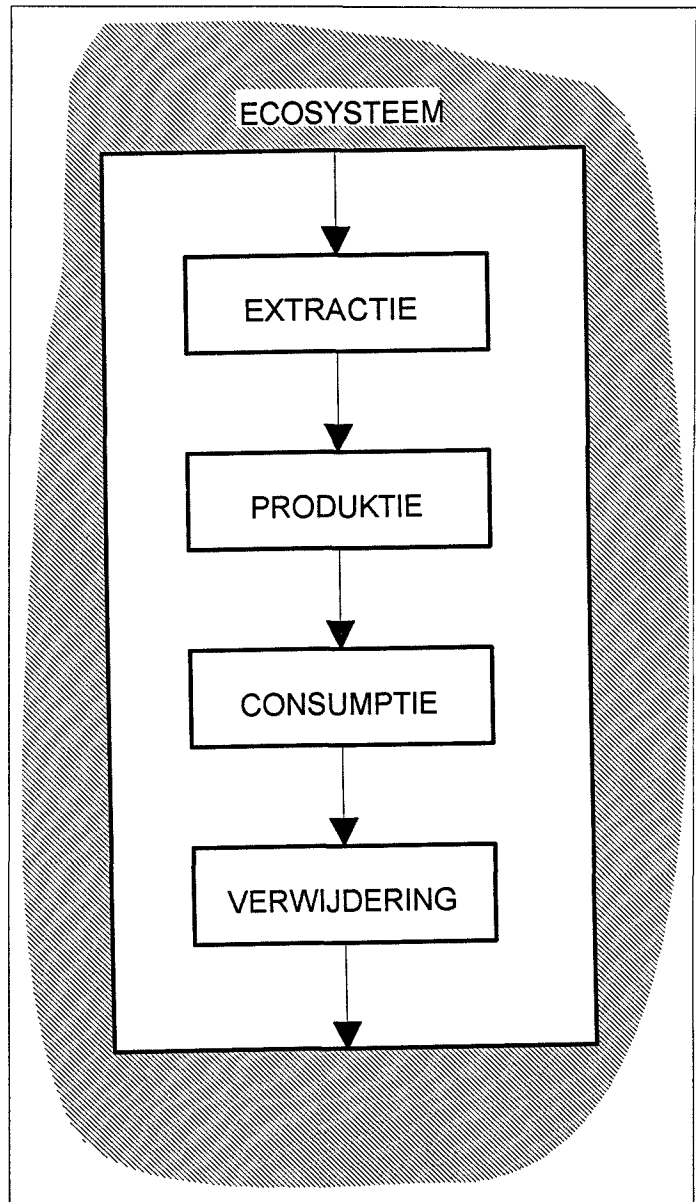
Bij extractie kan geput worden uit twee soorten bronnen: *voorraadbronnen* en *stromingsbronnen*. Voorraadbronnen, zoals reserves aan delfstoffen, hebben een beperkte voorraad (in kg), maar een vrijwel onbeperkte capaciteit (in kg/jaar), doordat men snel ler kan ontginnen of nieuwe mijnen kan ontsluiten. Stromingsbronnen, zoals landbouwgrond of waterkracht, hebben een beperkte capaciteit maar een onbeperkte voorraad.

Het aanbod van in de natuur gevonden grondstoffen voldoet in het algemeen niet aan de kwaliteit die door de mens ideaal zou worden gevonden. De gewenste stof treedt immers vermengd voor met andere stoffen op en niet in een constante samenstelling. Dit betekent dat de grondstof moet worden bewerkt. Daarbij komen andere stoffen dan de beoogde vrij. Som mige daarvan kunnen worden beschouwd als nevenprodukten, zoals de productie van nikkel bij de winning van koper uit erts. Andere, zoals steen slag, zijn bijprodukten. Vaak komen ook grote hoeveelheden restprodukten vrij. Berucht zijn de zogenaamde tailings die vrijkomen bij de bereiding van concentraat uit erts. Ze bevatten zeer schadelijke bestanddelen en moeten daarom gecontroleerd worden opgeslagen.

De bij extractie optredende milieuproblemen hebben betrekking op uitputting en op, vaak ingrijpende, verandering van landoppervlak en waterhuishouding.

### 1.2.2. Productie.

Figuur 1 schetste een schematisch beeld van een productieproces. In de praktijk krijgt een



Figuur 4: Materiaalstroom door het technosysteem.

produkt gestalte in een reeks produktieprocessen die na elkaar worden uitgevoerd. Deze vinden soms in een enkel bedrijf, maar gewoonlijk in verschillende bedrijven plaats. Men spreekt in dit verband van een *produktieketen*. Het produkt van een voorgaand produktieproces is daarbij grondstof voor het volgende proces. Dit noemt men een *tussenprodukt*. Een dergelijke keten wordt nogal eens als een zuiver *lineaire keten* voorgesteld. Een verder uitgewerkte structuur is een *convergente* structuur. Hierbij worden verschillende grondstoffen samengevoegd tot een produkt. Een produktieketen bevat echter ook *divergente* kenmerken. Dit betekent dat de stromen uiteenwaaiëren. Een voorbeeld is demontage, waarbij uit een grondstofstromen producten van uiteenlopende hoedanigheid ontstaan. Een ander voorbeeld is de staalproductie in de produktieketen voor auto's. Het staal wordt niet alleen in auto's, maar ook voor andere toepassingen gebruikt. Tenslotte komen bij een produktieproces ook neven-, bij- en restprodukten vrij. De lineaire produktieketen in figuur 4 is dus een vereenvoudiging van een sterk vertakt *netwerk*.

Er zijn vele produktieprocessen met sterk uiteenlopende kenmerken. Om hier structuur in aan te brengen is het van belang ze te classificeren in categorieën.

In de literatuur vindt men indelingen, die zijn opgesteld vanuit verschillende tradities en achtergronden. Deze verschillen komen voort uit de algemene structuur van de produktieketen.

Een produkt doorloopt na de extractie achtereenvolgens een aantal *procestechnologische* bewerkingen, gevolgd door een aantal *fabricagetechnologische* bewerkingen. Tenslotte vindt *assemblage* van de diverse onderdelen plaats tot een min of meer complex geheel.

In de drie genoemde fasen worden achtereenvolgens de *intrinsieke*- of materiaaleigenschappen, de *extrinsieke*- of werkstukeigenschappen en de complexe functionaliteit gecreëerd.

Bij de procesindustrie hanteert men al lange tijd een classificatiesysteem gebaseerd op "*unit operations*". Dit is ontstaan vanuit het inzicht dat in tal van verschillende produktieprocessen steeds weer in essentie gelijksoortige processtappen optreden.

Bij de fabricagetechnologie is het classificatiesysteem vooral uitgewerkt in DIN-normen en nogal ad-hoc van aard. In [3] wordt aansluiting gezocht bij de classificatiemethoden in de procesindustrie.

Uit de literatuur komt de volgende logische en algemeen toepasbare, hoofdingeling van produktieprocessen naar voren. Daarbij worden produktieprocessen ingedeeld in transformaties naar *plaats*, *tijd* en *hoedanigheid*. De eerste twee zijn zuiver *logistieke* processen, namelijk transport en opslag. De laatste categorie omvat de *bewerkingsprocessen*. Deze worden op hun beurt ingedeeld in processen waarbij *samenhang behouden* blijft, processen waarbij de *samenhang vergroot* en die waarbij de *samenhang vermindert*.

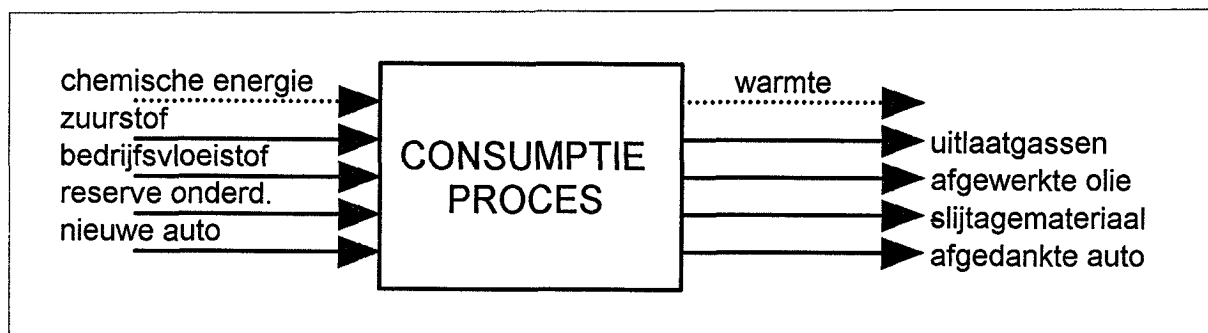
Voorbeelden van processen waarbij de samenhang vergroot zijn: persen, stollen, roeren, chemische binding en in het extreme geval het *samenbrengen* van twee of meer stofstromen, het convergente proces. Voorbeelden van processen waarbij de samenhang wordt verminderd zijn: malen, verdampen, chemische dissociatie en in het extreme geval het *scheiden* van twee of meer stofstromen, het divergente proces. Een voorbeeld van een proces waarbij de samenhang behouden blijft is een vervormingsproces zoals smeden.

De assemblage is een sterk convergent proces. In de denkwereld van de assemblage is het

probleem van de divergentie in eerste instantie beperkt tot diverse produkttypes die gemeenschappelijke (groepen van) onderdelen bevatten [4]. Vele productieprocessen, waaronder het verwerken van afgedankte complexe produkten, zijn vooral divergent. Hier spelen processen waarbij de samenhang wordt verkleind, en met name scheidingsprocessen, een cruciale rol.

Tussen de verschillende bewerkingsprocessen in de produktieketen vinden logistieke processen plaats, zoals in- en extern transport en opslag. Deze kunnen op dezelfde manier worden beschreven als het productieproces van figuur 1.

### 1.2.3. Consumptie.



Figuur 5: Een consumptieproces gemodelleerd als een productieproces.

Figuur 5 illustreert een schematische beschrijving van een consumptieproces aan de hand van het gebruik van een auto. De analogie met het productieproces van figuur 1 is duidelijk. Bij consumeren van een produkt levert dit diensten, waardoor de waarde ervan afneemt. Uiteindelijk is het produkt versleten en moet het worden afgedankt.

Ook consumptieprocessen kunnen worden geclassificeerd, bijvoorbeeld in de volgende categorieën:

*Actief en passief, diffuus en discreet, instantaan en duurzaam.*

Bij actieve consumptie worden produkten chemisch omgezet en verdwijnen als zodanig. Bij diffuse consumptie worden de restprodukten geloosd in het milieu of in lage concentratie toegevoegd aan een grote afvalstroom. Ze zijn dan niet meer terug te winnen.

Bij instantane consumptie is de dienst die een produkt levert éénmalig.

De consumptie van een auto is passief, discreet en duurzaam. Die van de benzine is daarentegen actief, diffuus en instantaan.

Figuur 5 staat model voor de consumptie van duurzame complexe produkten. Men onderscheidt hier het gebruik van energie en eventueel hulpstoffen, massaverlies door slijtage, de uitwisseling van onderdelen en het veroorzaken van emissies.

Het waardeverlies tijdens de consumptie treedt vooral op omdat het produkt tijdens het gebruik wijzigingen ondergaat. Uiteindelijk zal het daarom worden afgedankt. Daarna kan het soms, na eventuele bewerkingen, nog als *tweede-handsprodukt* worden ingezet en zelfs

een "tweede gebruik" is mogelijk, zoals het gebruik van oude autobanden voor de afdekking van voerkuilen. Uiteindelijk zal de gebruikswaarde echter tot nul reduceren en moet het produkt gereedgemaakt worden voor hergebruik dan wel voor verantwoorde afvoer naar het milieu.

#### 1.2.4. Verwijdering.

Er is al opgemerkt dat bij alle processen die in figuur 4 zijn weergegeven steeds restprodukten vrijkomen in de vorm van afval en emissies.

De materiaalstromen die gepaard gaan met de produktie worden wel samengevat onder de naam *procesafval*. Dit is vaak redelijk goed gedefinieerd qua samenstelling en hoedanigheid en kan in relatief grote hoeveelheden op gedefinieerde plaatsen ontstaan, waardoor de hergebruiksmogelijkheden toenemen. Soms wordt het zonder ingrijpende bewerking weer teruggevoerd in het proces zelf (*interne recycling*), soms vindt het een laagwaardiger toepassing elders of wordt het na een meer ingrijpende bewerking elders weer in een produktieproces gebruikt (*externe recycling*).

Het produktieproces is tevens verantwoordelijk voor *produktafvallen*, namelijk afgedankte kapitaalgoederen en afgekeurde produkten.

Ook bij het consumptieproces komen emissies en afvalstromen vrij. De laatste bestaan voor een niet onaanzienlijk deel uit afgedankte produkten. Hiertoe behoren afgedankte duurzame consumptiegoederen die men terugvindt in bouwafval, autowrakken en het grof huishoudelijk afval. Laatstgenoemd afval bestaat voor een deel uit eenvoudige produkten, zoals meubelen, en voor een ander deel uit complex samengestelde produkten zoals de technische produkten die worden samengevat onder de benaming: wit- en bruingoed.

Het functioneren van een technosysteem leidt, zoals we hebben gezien, tot milieubelasting die gerelateerd is aan de uitwisseling van massastromen tussen dit systeem en het ecosysteem. Om de milieubelasting te verminderen zoekt men naar mogelijkheden om omvang en schadelijkheid van deze stromen te verminderen zonder de kwaliteit van de diensten die deze ons leveren aan te tasten.

Tot voor kort werd de oplossing vooral gezocht in betere verwerkingsmethoden, de zogenaamde *end-of-pipe oplossingen*. Filters, waterzuiveringsinstallaties, gecontroleerde afvalstort en verbrandingsovens zijn voorbeelden van een dergelijke technologie. Tot op de dag van vandaag beheersen deze technieken de markt.

Daarnaast zijn er nieuwe ontwikkelingen gaande waarbij de opties *hergebruik* en *vermindering aan de bron* de voorkeur verdienen.

Dit kan men onder andere bereiken door *levensduurverlenging* van produkten, door *verkleining van de materiaalinhoud* van produkten en door *hergebruik van afvalstoffen*. Een voorbeeld van verkleining van de materiaalinhoud vindt men bij kunststof verpakkingen. Door produktaanpassing heeft men daar soms besparingen van 50% op het benodigde materiaal verkregen.

## 2. Plaats van produktafval binnen de afvalstroom.

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet waarom er aandacht moet zijn voor produktafval, hoewel dit slechts een klein deel van de totale afvalstroom uitmaakt.

### 2.1. De verschillende afvalstromen.

In het eerste hoofdstuk is uitgelegd dat naast *emissies* naar het milieu in het technosysteem grote *afvalstromen* vrijkomen, en dat deze kunnen worden onderverdeeld in proces- en produktafval. Het produktafval bestaat uit afgedankte kapitaalgoederen en uit afgedankte consumptiegoederen.

Procesafvallen treden zowel bij produktie- als bij consumptieprocessen op. Ze zijn verantwoordelijk voor de grootste afvalstromen in Nederland: mest en baggerslib.

De massastroom in kton/jaar zegt niet alles over de ernst van het afvalprobleem. Ook de toepasbaarheid en de samenstelling van de afvalstroom zijn belangrijk. Dierlijke mest kan weliswaar nuttig worden, maar er kunnen bestanddelen in aanwezig zijn die beperkingen aan de toepassing oplegt. Sommige daarvan zijn op zich nuttig, maar er is teveel van, zoals fosfaten. Andere zijn schadelijk, zoals zware metalen.

De belangrijkste bestanddelen van mest en slib zijn echter water, zand en afbreekbare organische stoffen. Een groot deel ervan kan opnieuw in het technosysteem worden ingezet, zonder probleem worden geloosd, of worden omgezet. Daartoe moeten echter allereerst de verontreinigingen worden verwijderd. Soms is dat buitengewoon moeilijk.

Een andere belangrijke afvalstroom is het *gewoon industrieel procesafval* (metaalresten, kunststofresten enzovoorts) en het *gevaarlijk afval* (voorheen chemisch afval genaamd). Het gewoon industrieel procesafval kan voor een belangrijk deel weer in hetzelfde of een ander productieproces worden ingezet.

Het consumptieproces levert een grote stroom procesafval. Het GFT-afval, glas en oudpapier en de enorme stroom verpakkingsmateriaal kan men als zodanig bestempelen. Dikwijls gaat het hierbij om afgedankte eenvoudige produkten, vaak bestemd voor eenmalig gebruik, zoals papierwaren en eenvoudige voorwerpen uit kunststof, glas, hout, textiel en dergelijke. Deze komen voor een groot deel bij het grof of klein huishoudelijk afval terecht, waaruit een deel ervan weer, met behulp van scheidingsprocessen, als materiaal kan worden teruggewonnen. Een deel van de afvalstroom wordt gescheiden ingezameld, waardoor het rendement van scheidingsprocessen kan toenemen.

Produktafvallen in de engere betekenis zijn afgedankte *complex samengestelde produkten*. Deze discrete produkten zijn samengesteld uit een groot aantal verschillende materialen en componenten en hebben over het algemeen een aanzienlijke levensduur (enkele jaren).

Deze produkten kunnen onderverdeeld worden in de volgende categorieën:

- Te slopen infrastructurele en bouwwerken.
- Afgedankte complexe kapitaalgoederen.
- Afgekeurde en incurante complexe consumptiegoederen.
- Afgedankte complexe consumptiegoederen.



Precieze statistieken over hoeveelheid en samenstelling van deze afvalstromen zijn niet voorhanden want veel afvalstromen zijn niet, en zeker niet exact, geregistreerd. Ook de gehanteerde indeling in categorieën is vaak niet adequaat voor het hier gestelde doel.

Hierbij komt dat de samenstelling van de afvalstromen niet exact bekend is en bovendien aan zeer grote schommelingen onderhevig. Dit heeft ermee te maken dat zowel de aard van de produkten als de samenstelling ervan aan een snelle evolutie onderhevig is. Ook het koopgedrag van de consumenten speelt een rol. Als veel mensen ineens een afwasmachine zullen kopen, wordt het aantal afwasmachines in de toekomstige produktafvalstroom aanzienlijk. Bij auto's ziet men een toenemend gebruik van kunststoffen en van elektronica en dergelijke. Ook dit leidt op termijn tot veranderingen in de afvalstroom. Het is duidelijk dat er een groot tijdsverschil bestaat tussen het produceren van een complex produkt en het aanbieden van dit produkt als afval. Dit ligt in de grootte-orde van de levensduur van het produkt, bijvoorbeeld tien jaar. In een dergelijke periode verandert de samenstelling van de 'in de pijpleiding zittende' produkten aanzienlijk.

De snelle evolutie van de samenstelling van de stroom afgedankte complexe produkten schept ook problemen bij de klassificatie van afgedankte complexe consumptiegoederen. Voorzover het elektrische en elektronische apparaat betreft wordt de indeling in witgoed en bruingoed gehanteerd. Het begrip 'bruingoed' verwijst naar radio- en TV-toestellen, die vroeger imposante bakelieten meubelen waren. Tegenwoordig maken TV-toestellen en monitoren nog steeds een belangrijk deel uit van het bruingoed, maar de chassis met buizen, elektrolytische condensatoren, weerstanden, spoelen en loodzware transformatoren zijn vervangen door printplaten. Stereo-installaties, CD-spelers en natuurlijk personal computers rukken op. Miniaturisatie gaat nog steeds door en de massale introductie van de 'platte' TV zonder beeldbuis lijkt nog slechts een kwestie van tijd. Daarbij komen nog allerlei produkten die moeilijk in bestaande categorieën te plaatsen zijn, zoals printers en magnetrons.

In tabel 1 worden de massastromen van een aantal verschillende afvalstromen weergegeven. In deze tabel worden een aantal schattingen gepresenteerd van afvalstromen in Nederland. Ze worden vergeleken met de grootste technische stofstroom, die voor ophoogmateriaal (zand en grind). Alleen water vertegenwoordigt een nog grotere stofstroom. In de laatste kolommen van de tabel wordt een schatting gegeven van de hoeveelheid huishoudelijke elektrische (*witgoed*) en elektronische apparaten (*bruingoed*) die jaarlijks in Nederland als afval worden aangeboden. Het witgoed bestaat uit wasmachines, centrifuges, koelkasten en dergelijke. Het bruingoed bestaat uit radio- en TV-toestellen, stereo-installaties, PC's en dergelijke apparatuur.

De getallen in tabel 1 geven niet meer dan een grootte-orde weer. Het valt op dat de massastroom van wit- en bruingoed relatief klein is, nog niet 1 massa-% van de totale hoeveelheid afval. Om deze reden alleen zal inzameling niet nodig zijn. De huidige aandacht voor hergebruik van produktafval is dan ook niet gebaseerd op de omvang van de massastroom, maar op de samenstelling en de specifieke eigenschappen van dit afval.

Stofstroom	Hoeveelheid (10 <sup>3</sup> ton/jaar)
<i>Benodigd ophoogmateriaal</i>	140.000
Mest	98.000
Bouw- en sloopafval	13.000
Klein huishoudelijk afval	4.600
Grof huishoudelijk afval	575
Industrieel procesafval	4.900
Gevaarlijk industrieel afval	950
Autowrakken	525
Autobanden	65
<b>Elektrische en elektronische apparaten</b>	<b>225</b>
waarvan kapitaalgoederen	75
waarvan consumptiegoederen	150
elektrische huishoudelijke apparaten	90
waarvan koelkasten	21
waarvan wasmachines	30
huishoudelektronica	60
waarvan TV, stereo enz.	50

Tabel 1: Enkele afvalstromen in Nederland.

## 2.2. Produktafvallen.

Met een belangrijk aspect van produktafval, namelijk de aanwezigheid van gevaarlijke stoffen hierin, kon men met de vroegere regelgeving niet uit de voeten. In de vroegere Wet Chemisch Afval kwam een lijst van stoffen voor, die onderverdeeld was in verschillende klassen. Als de concentratie van de betreffende probleemstof een bepaalde waarde overschreed, moest het afval als chemisch afval worden beschouwd. Als uitzondering hierop bestond de *Voorwerpenregeling* die stelde dat afvalstoffen niet als chemische afvalstoffen werden aangemerkt als ze bestonden uit voorwerpen die in het afvalstadium waren geraakt. Uitzonderingen hierop waren PCB-bevattende transformatoren, condensatoren en 'voorwerpen waar deze voorwerpen deel van uitmaken'. Daarnaast werden ook koelsystemen en hydraulische systemen genoemd waarin gehalogeniseerde aromatische verbindingen voorkomen, en verder accu's, kwikthermometers, batterijen en gasontladings-

lampen, met ontplofbare stoffen geladen voorwerpen alsmede asbest bevattende remlampen en koppelingsplaten [5]. Het is duidelijk dat een dergelijke regeling niet voorziet in de verantwoorde verwerking van de vele gevaarlijke stoffen die in produktafvallen aanwezig zijn. Zou men bijvoorbeeld een auto met airbags moeten betitelen als een 'met ontplofbare stoffen geladen voorwerp'? Met de concentratie van probleemstoffen, zoals in de Wet Chemisch Afval vermeld, kan men al evenmin uit de voeten. In een afvalstroom zal de probleemstof min of meer regelmatig verdeeld zijn over de gehele stofstroom, bij een produkt is de probleemstof meestal in enkele onderdelen geconcentreerd. Als de probleemstof een bedrijfsvloeistof is zal ze gemakkelijk kunnen weglekken en in het milieu terechtkomen. Denk in dit verband aan olie uit het carter van autowrakken.

De grootste massastromen bij het produktafval worden gevormd door sloop van bouwwerken en installaties, staalconstructies, grote machines en grote voertuigen zoals schepen en vrachtwagens. Een groot deel van de massastroom bestaat uit inert materiaal zoals betonpuin, en organisch materiaal zoals houtafval.

Sinds jaar en dag worden metalen ingezameld en verwerkt met het doel ze te hergebruiken. De handel in metaalschroot is winstgevend en schroot is een essentieel bestanddeel bij de bereiding van staal. Voor dit doel is het van belang te weten welke ijzerstromen er in Nederland zijn. Gegevens over afvalstromen zijn daarvoor onvoldoende. Immers zowel het gewicht daarvan als het ijzergehalte ervan berusten op grove schattingen. Toch zijn, bijvoorbeeld bij het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS), wel gegevens bekend waarmee men enig inzicht in deze materiaalstroom kan krijgen.

*In dit verband kan men in gedachten een "ijzerbalans" voor Nederland opstellen, waarbij men de hoeveelheid netto geïmporteerd ijzererts (overeenkomend met ongeveer 3200 kton ijzer) moet vergelijken met de netto export van ijzer en staal (1050) en ferroschroot (1150). Import en export van staalconstructies, voertuigen en apparaten zijn ongeveer met elkaar in evenwicht, zodat 1000 kton ijzer per jaar in Nederland zal blijven. Een deel daarvan is terug te vinden in de uitbreiding van het technosysteem, een deel in het bouw- en sloopafval, een deel in het klein- en een deel in het grof huishoudelijk afval, elk in de grootte-orde van 100 kton. De voertuigwrakken vertegenwoordigen 450 kton ijzer. Verder is een groot deel terug te vinden in het industrieel procesafval.*

Bij de afgedankte complexe consumptiegoederen vormen de *voertuigafvallen*, en dan vooral de autowrakken en autobanden, de belangrijkste stofstroom. Ze bestaan voor een groot deel (70 gewichtsprocent) uit staal, dat interessant is voor recycling.

Bij de overige afgedankte complexe consumptiegoederen speelt het reeds genoemde *witgoed* en *bruingoed* een grote rol. Het *witgoed* bevat voornamelijk plaatstaal en kunststof maar relatief weinig elektronica.

Het *bruingoed* is uiterst complex van structuur en bevatten een zeer grote verscheidenheid aan materialen. Deze zijn verdeeld over kleine onderdelen die vaak niet homogeen van samenstelling zijn. Het aandeel van metalen en vooral ijzer in het geheel is klein.

Om de produkten te karakteriseren zijn de onderdelensamenstelling, de massaverdeling tussen de onderdelen, het aantal onderdelen en de stofsamenstelling van belang.

Ter vergelijking volgen in tabel 2 enige globale cijfers die de stofsamenstelling in massa-procent van een aantal produktsoorten weergeven:

Materiaalsoort (massa-%)	Fe	Non-ferro	Kunststof	Rubber	Glas	Beton	Hout	Vloei-stof	Rest
Produktsoort									
vrachtauto	78,3	4,6	4,5	7,6					5,0
personenauto, 900 kg	63,5	7	10,4	4,9	3,5			1,0	7,8
wasmachine, 80 kg	50	7	2		7	22			8
koelkast, 35 kg	50	10	23					3	14
TV-toestel, 30 kg	11	10	15		48		13		3
PC (systeem), 3,5 kg	19	24	42						15
PC (monitor), 8 kg	25	5	46		20				4
printer, 6 kg	55	12	20						13

Tabel 2: Samenstelling van een aantal produktcategoriën in massaprocent.

Uit deze tabel blijkt dat vooral de kleinere elektronische huishoudapparaten slecht recyclebaar zijn. Ze bestaan uit relatief veel, en kleine onderdelen en een grote diversiteit aan materialen. Een kleuren TV (30 kg) bestaat uit tenminste 2000 onderdelen, waarvan de grootste, de beeldbuis, de helft van de massa van het apparaat vormt.

Indien men van een produkt de samenstelling wil bepalen bestaat altijd het probleem, welke samenstelling men moet kiezen. Tabel 2 geeft een indeling naar materiaalsoort. Men zou ook andere indelingen kunnen bedenken, bijvoorbeeld naar gewone of gevaarlijke stof of naar brandbare dan wel onbrandbare stof. Van groot belang is een indeling naar onderdeelsoort, zoals printplaten. Printplaten bestaan echter, evenals het complete produkt, uit tal van stoffen waaronder de kunststof dragers en behuizingen, de essentiële stoffen in de componenten zoals selenium en arsenicum, en de metalen van de geleidende verbindingen. Cijfers uit de literatuur omtrent de samenstelling van printplaten worden echter meestal gegeven voor printplaten die afkomstig zijn van allerlei produktfamilies. Dit leidt tot het schema van figuur 6.

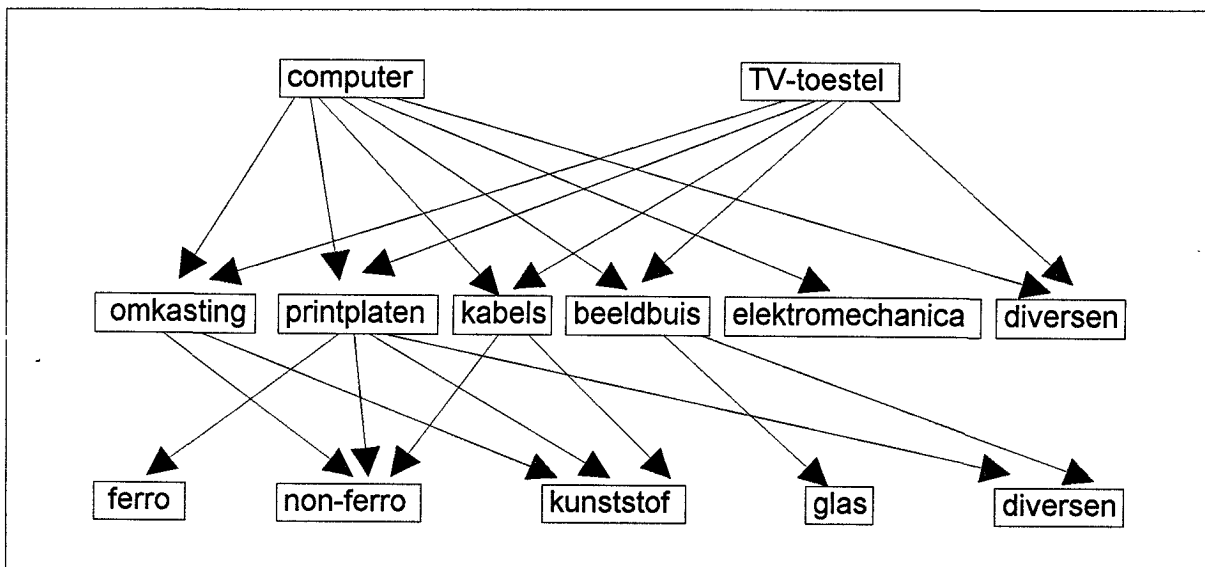
Hoewel, zoals reeds is betoogd, complexe consumptiegoederen een relatief gering deel van de totale afvalstroom uitmaken, kleven aan het storten ervan vele bezwaren:

- Het volume van de complexe consumptiegoederen is relatief groot
- De materialen waaruit de goederen zijn opgebouwd blijven, in tegenstelling tot organische afvallen, gedurende lange tijd vrijwel onveranderd in het milieu aanwezig.
- Complexe consumptiegoederen bevatten doorgaans vele schadelijke stoffen. Te denken valt aan bedrijfsvloei-stoffen zoals benzine, smeerolie, accuzuur en elektrolyet, PCB's, koelmiddelen zoals CFK's. Deze kunnen weglekken naar het milieu of bij verdere verwerking problemen veroorzaken. Dit beïnvloedt de waarde van de

reststroom in negatieve zin.

- In produktafval komen tal van zware metalen voor, hetzij in de vorm van legeringen of oppervlaktelagen, hetzij in de vorm van additieven bij kunststoffen, glas, rubber en dergelijke. Het percentage van deze stoffen in het apparaat als zodanig is niet groot. Ze zijn vaak geconcentreerd in bepaalde componenten. Verdere concentratie treedt op bij bewerkingen als smelten en verbranden.
- In complexe consumptiegoederen zijn, soms kleine, hoeveelheden van kostbare materialen zoals edelmetalen en zeldzame aardmetalen verwerkt. Recycling kan dan economisch lonend zijn of is zelfs noodzakelijk om de beschikking over deze materialen te behouden. Het zijn namelijk vaak nevenprodukten die ontstaan bij de winning van andere materialen. De katalysator in de uitlaat (Platina) en het eventueel in de toekomst te realiseren massaal gebruik van elektrische auto's (Ni-Cd batterijen) is zonder recycling niet te realiseren. Uit [6] is figuur 7 overgenomen.

Het volumeprobleem was de aanleiding tot het op grote schaal shredderen van autowrakken.

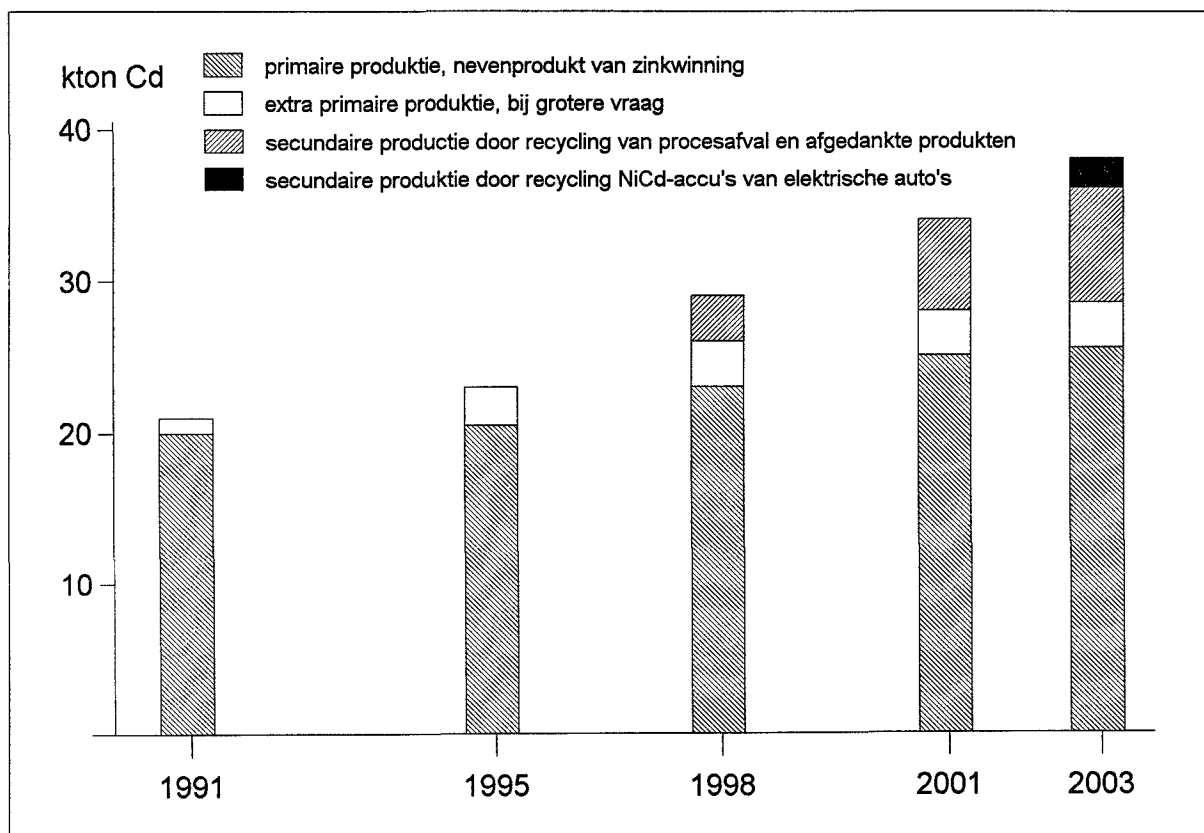


Figuur 6: Twee manieren om de samenstelling van een produkt aan te geven.

Bij de beoordeling van de problematiek dient ook naar de toekomst gekeken te worden. De tendens tot complexiteit, de toepassing van een steeds hoger percentage aan niet-traditionele materialen en het dóórdringen van elektronica in tal van niet-elektronische sectoren (zoals 'smart buildings') maken een verantwoorde verwerking van afgedankte produkten steeds moeilijker. Dit zal gecompenseerd moeten worden in het produktontwerp (modulaire structuur, uitneembaarheid, uitwisselbaarheid). Bij auto's is er een geleidelijke tendens naar een hoger percentage kunststoffen, aluminium en eventueel keramische materialen. Dit betekent dat een auto steeds inhomogener van samenstelling wordt en bovendien uit moeilijker te recyclen stoffen gaat bestaan. Daarnaast worden in auto's steeds meer nevenfuncties ingebouwd die onder meer leiden tot de introductie van steeds meer elektronica en gevaarlijke stoffen.

Voorbeelden van gevaarlijke stoffen in produktafvallen:

In auto's: Benzine, carterolie, hydraulische vloeistof, koppelingsvloeistof, ruitewisserreïning, inhoud van de waterkoeling met antivries, remolie en accuzuur. Indien de auto



Figuur 7: Primaire en secundaire productie van cadmium bij de introductie van een nieuwe toepassing.

uitgerust is met airconditioning komt het koelmiddel daarvan er nog bij. Voorts springstoffen in airbags en de elektronische apparatuur.

In koelkasten is compressorolie aanwezig en vindt men CFK's in het koelcircuit en het isolatiemateriaal.

In transformatoren: Transformatorolie.

In elektronische apparatuur is gevaarlijke bedrijfsvloeistof te vinden in accu's, batterijen en elektrolytische condensatoren.

Vlamvertragers zijn te vinden in kunststoffen (PBDE-polybroom difenylether).

Kwik is te vinden in relais en ontladingslampen.

Zware metalen bevattende fluorescerende stoffen zijn te vinden in beeldbuizen en ontladingslampen.

Zware metalen in wisselende concentraties zijn te vinden in soldeer, diverse andere legeringen en in kunststof- en andere additieven, pigmenten en coatings.

Het spreekt vanzelf dat deze lijst verre van volledig is!

In (West-)Duitsland (1988) was het aanbod aan afgedankte elektronische bouwelementen inclusief printplaten 24.600 ton (voor Nederland omgerekend: 6.000 ton). Printplaten

bevatten, naast de kunststof drager en de keramiek voor de huizen, vooral veel Fe (10 gewichts-%), Cu (4 %), Al (5 %), Sn (3 %), Br (3 %), Pd (0,1 %) en een gevarieerd palet aan, soms zeer exotische, metalen in concentraties tot vele honderden ppm (Ag). In dat jaar was overigens slechts 25 % van het aanbod uit huishoudelijk afval afkomstig, de rest uit afgedankte kapitaalgoederen.

### 3. Het verwerken van produktafval.

De verwerking van produktafval bestaat doorgaans uit demonteren/ontmantelen, ontsluiten en scheiden. De verwerking levert onderdelen, materialen, afval en emissies op. Voor de verwerking zijn, naast de grondstof produktafval, ook energiedragers en hulpstoffen nodig.

#### 3.1. Vorbereidende processen.

Nadat een produkt wordt afgedankt kunnen nog de processen *repareren* en *strippen* plaatsvinden. Na repareren kan een produkt een volgend leven als tweedehands produkt beginnen. Het strippen vindt plaats om courante reserve-onderdelen te winnen die doorgaans een hoge waarde vertegenwoordigen.

Een belangrijk voorbereidend proces is *inzamelen*. Dit omvat logistieke processen als opslag en transport, en sorteerprocessen. Sorteren kan zowel vòòr als na het verzamelen plaatsvinden. In het eerste geval spreekt men van *scheiding aan de bron*.

Vooraf het transport kan leiden tot grote kosten en tot veel energiegebruik en emissies. Optimale locatie en schaalgrootte van de verwerkende eenheden is in dit verband van groot belang. Dit probleem wordt gecompliceerd door een onvoorspelbaar aanbod en extra vrijheidsgraden in de samenstelling van de stofstromen (bijvoorbeeld: moeten alle PC's bij elkaar worden genomen of alleen de monitoren, en mogen daar ook de televisietoestellen bij?). De verwerker zal een constant aanbod eisen, en dat veronderstelt een zekere groot-schaligheid.

Het *inzamelpercentage* is een belangrijke indicator voor een hergebruikscyclus. Hier wordt in paragraaf 4.1.1. dieper op ingegaan.

Een belangrijk voorbereidend proces met milieutechnische consequenties is het *reinigen*. Hierbij komt meestal afvalwater en afval vrij dat verdere bewerking zal moeten ondergaan.

#### 3.2. Disassembleren en ontmantelen.

Complexe produkten bestaan doorgaans uit vele onderdelen die gegroepeerd zijn in groepen of modulen (subassemblies) die op hun beurt weer verder gegroepeerd kunnen zijn. De onderdelen zijn door fysieke verbindingen al dan niet reversibel met elkaar verbonden. Een voorbeeld van een reversibele verbinding is de bout-moerverbinding, een van een irreversibele verbinding is de lasverbinding.

Onder *disassembleren* wordt verstaan het niet-destructief scheiden in onderdelen. Onder *ontmantelen* wordt verstaan het destructief scheiden in onderdelen. In de praktijk zal de scheiding niet scherp zijn. Als men onderdelen voor hergebruik terug wil winnen (*parts recycling*) zal men uiteraard de eis stellen dat het onderdeel onbeschadigd is. Indien men materialen wil terugwinnen zal men uit het afgedankte produkt de onderdelen willen



verzamelen die rijk zijn aan het gewenste materiaal. Beschadiging van het onderdeel of andere onderdelen is daarbij niet ernstig.

Het disassembleren is iets anders dan simpelweg de assemblagevolgorde omkeren. Sommige assemblagestappen zijn simpelweg irreversibel. Ook de juridische en economische randvoorwaarden zijn anders: er wordt per produktiestap in het algemeen minder waarde toegevoegd, en sommige disassemblagestappen worden door regelgeving verplicht gesteld ook al zijn ze op grond van puur economische criteria niet interessant. Zo moeten accu's of PCB's bevattende condensatoren worden verwijderd. Een belangrijk verschil met assemblage is ook dat het assemblageproces in zijn geheel moet worden verricht, terwijl het disassemblageproces ook gedeeltelijk kan worden uitgevoerd, wat het aantal mogelijkheden enorm doet toenemen [7a]. Ook is er de extra vrijheid om destructief te scheiden.

Waar bij assemblage de totale waarde geleidelijk toeneemt kan het bij disassemblage zo zijn dat bepaalde stappen meer offers vergen dan aan opbrengst wordt toegevoegd, maar dat ze niettemin nodig zijn om andere, rendabele stappen mogelijk te maken.

In het algemeen zal men een beperkte *disassemblagediepte* realiseren. Men zal niet verder gaan dan milieutechnisch nodig en economisch aantrekkelijk is. Het uitvoeren van disassemblage en ontmanteling tot een beperkte diepte wordt *selectieve demontage* genoemd.

Na het disassembleren/ontmantelen volgt opnieuw een *sorteer- of aggregatieproces*. Immers, het disassembleren heeft een divergent karakter, omdat het produkt wordt getransformeerd tot een groot aantal onderdelen. Een groot aantal verschillende onderdelen kan echter op grond van gemeenschappelijke eigenschappen bij elkaar worden gevoegd, bijvoorbeeld ferrometalen onderdelen of kunststoffen. Optimaal sorteren is afhankelijk van een afweging van de opbrengst van de diverse materiaalstromen tegen de offers die men voor het dieper sorteren moet brengen. In het algemeen zal meer opbrengst worden behaald bij grote, homogene stromen. Een toenemende sorteerdiepte leidt tot kleinere stromen met een grotere homogeniteit. Een optimale sorteerdiepte ligt dus tussen twee uitersten in.

Bij vaste kosten voor de disassemblage/ontmantelingshandelingen en vaste opbrengsten voor de gegenereerde materiaalstromen moet dus een optimum worden bepaald voor de combinatie van disassemblagediepte en sorteerdiepte. De plaats van het optimum is afhankelijk van de schaalgrootte van de ontmantelingsinrichting.

Selectieve demontage wordt uitgevoerd omdat:

- Schadelijke bedrijfsstoffen verwijderd moeten worden: het zogenaamde *droogleggen*. Voorbeeld: aftappen van benzine, ontgassen.
- Onderdelen die schadelijke stoffen bevatten verwijderd moeten worden. Voorbeeld: verwijderen van accu's.
- Waardevolle onderdelen verzameld moeten worden. Voorbeeld: lenzen.
- Onderdelen die waardevolle materialen bevatten verzameld moeten worden. Voorbeeld: printplaten, draadbomen.
- Verwijdering van sommige onderdelen de totale verwerkingskosten vermindert. Voorbeeld: omkasting.
- Technische voorwaarden voor volgende produktiestappen moeten worden getroffen:

verwijdering van draden, verwijdering van stoffen die later te vormen fracties kunnen verontreinigen.

- De hoeveelheid licht shredderafval zover mogelijk moet worden teruggebracht. Hierop wordt in paragraaf 3.3 teruggekomen.

Tenslotte dient nog genoemd de produktiestap *volumereductie*, die nodig kan zijn om het transport goedkoper te maken of om het produkt geschikt te maken voor een volgende produktiestap, zoals shredderen. Volumereductie kan plaatsvinden door samenhang vergroten (persen, pletten) of juist door samenhang verkleinende processen, zoals knippen [8].

### 3.3. Ontsluiten.

Het ontsluitingsproces vindt na de ontmanteling plaats, gewoonlijk door middel van een *shredder* (hamers en/of messen) of puinbreker. Het ontsluiten kan twee doelen dienen:

- Het geschikt maken voor een volgende produktiestap, bijvoorbeeld door de doseerbaarheid te verbeteren of het actieve oppervlak te vergroten.
- Het creëren van brokstukken van een min of meer homogene samenstelling die op voldoende selectieve wijze door de navolgende scheidingsinstallatie kunnen worden uitgesorteerd.

Welke techniek men toepast hangt af van de grootte van de materiaalstroom en de afmetingen van de te verkleinen produkten, de brosheid ervan enzovoorts. Uiteraard kost het shredderen veel (elektrische) energie. Een belangrijk aspect bij het shredderen is de gemiddelde grootte van de te produceren brokstukken. Bij het shredderen ontstaat door gaans ook stof dat via een met de shredder geïntegreerde installatie, zoals een stofcycloon, wordt opgevangen. Deze materiaalstroom noemt men de *lichte shredderfractie*. Het aandeel daarvan in de totale massastroom kan aanzienlijk zijn. Tot de lichte shredderfractie wordt in het algemeen ook dat gedeelte van de shredderoutput gerekend dat overblijft na het afscheiden van relevante materiaalstromen (bijvoorbeeld ferro, non-ferro en gedefinieerde andere fracties zoals bepaalde kunststoffen, glas en dergelijke). Bij het shredderen van een auto bedraagt het aandeel van de lichte shredderfractie 20 á 25%. Door een toenemend aandeel van kunststoffen en keramiek als vervanger van metalen, en de aanwending van steeds meer elektronisch gestuurde regel- en hulpapparatuur zal het aandeel van metalen in diverse produkten in de toekomst naar alle waarschijnlijkheid verder afnemen, en daarmee de lichte shredderfractie een groter probleem worden. Scheiding van de lichte shredderfractie is vanwege haar complexe samenstelling en haar lage waarde relatief duur. Ook verbranding van deze slecht gedefinieerde substantie is kostbaar, temeer daar regelgeving in voorbereiding is die deze fractie als gevaarlijk afval beschouwt. Maatregelen in de produktontwerpsfeer, aangevuld met selectieve demontage kunnen aanzienlijk bijdragen tot de vermindering van de relatieve hoeveelheid lichte shredderfractie. In de regelgeving wordt in de nabije toekomst voorzien in een stortverbod voor lichte-shredderfractie. Dit leidt ertoe dat ze als gevaarlijk afval moet worden behandeld en dat komt neer op verbranding onder geconditioneerde omstandigheden. Een dergelijke behandeling is duur en dat maakt selectieve demontage, gericht op het terugdringen van de hoeveelheid lichte shredderfractie

lonend.

In [8] wordt een overzicht gegeven van een groot aantal technieken voor shreddering. De nomenclatuur is vaak verwarrend. Er bestaan roterende ('messen') en zwaaiende ('hamers') technieken. Het specifieke energiegebruik is relatief groot. Het wordt uitgedrukt in kW van de hoofdmotor. Soms ziet men nog wel de verouderde eenheid Pk (1 Pk = 0,735 kW). Het werkelijke nominale vermogen is groter omdat meestal nog een aanzienlijk vermogen aan hulpapparatuur geïnstalleerd is. Het specifieke energiegebruik hangt af van de bezettingsgraad, van de grootte en aard van de shredderapparatuur, van de te shredderen materialen (grootte, brosheid, hardheid en dergelijke), en van de deeltjesgrootte van de output. De in [9] genoemde waarde van 0,3 ... 5,3 kWh<sub>e</sub>/ton ofwel 1 ... 19 MJ/ton voor hard en breekbaar materiaal (steen, keramiek) bij aflopende deeltjesgrootte van 150 ... 0,25 mm is niet zonder meer toepasbaar voor het shredderen van produktafval. In [8] zijn een aantal waarden genoemd waaruit een energiegebruik tot 80 MJ<sub>e</sub>/ton kan worden afgeleid voor de grotere installaties.

Bij shredders is de slijtage van hamers en messen van groot belang. Deze bedraagt naar schatting ongeveer 225 gram hoogwaardig mangaanstaal per ton verwerkt produkt [8].

### 3.4. Scheiden.

Scheiden is het splitsen van een materiaalstroom in twee of meer componenten op grond van bepaalde criteria. In het onderhavige geval zal het gaan om het splitsen van een deeltjesstroom waarvan de deeltjes niet alle dezelfde kenmerken bezitten in twee of meer stromen. In ieder van deze stromen moeten de deeltjes aan specifieke criteria voldoen.

Het aantal scheidingstechnieken is zeer groot.

Er bestaan *actieve* en *passieve* scheidingstechnieken. Bij actieve scheidingstechnieken is een regelcircuit aanwezig: er wordt 'gemeten' of 'geobserveerd' en na vergelijking van de gemeten waarde met een normwaarde wordt een bepaalde actie ondernomen. Een dergelijk sorteerproces kan handmatig of automatisch plaatsvinden. In het laatste geval wordt, bijvoorbeeld met behulp van een laser, een analyse van het oppervlak van ieder deeltje uitgevoerd waarna een uitstootmechanisme al dan niet in werking wordt gezet.

Men kan scheiden op grond van *intrinsieke* of *extrinsieke* eigenschappen. Tot de extrinsieke eigenschappen behoren bijvoorbeeld vorm en grootte van de deeltjes. Een van de scheidingsmethoden hiervoor is het zeven. Aangezien men in het algemeen materialen wil terugwinnen zal het scheiden naar intrinsieke eigenschappen hier relevant zijn. Men gebruikt daartoe *chemische* en *fysische* scheidingstechnieken. Van de fysische scheidingstechnieken zijn vooral de *mechanische* scheidingstechnieken hier van belang. Essentieel daarbij is dat de materiaaldeeltjes worden onderworpen aan krachten die verschillend van grootte en richting zijn bij verschillende materiaalsoorten.

Tijdens en na het ontsluiten vindt in het algemeen *stofafzuiging* plaats: afscheiding van kleine en lichte deeltjes met behulp van een luchtstroom. Uit de luchtstroom wordt het stof verwijderd met behulp van stofcyclonen. Een groot deel van de luchtstroom circuleert, een klein deel wordt geloosd en passeert een wasser of scrubber die meestal werkt met behulp van water waarin chemicaliën zijn opgelost.

De deeltjesstroom die de shredder verlaat passeert in het algemeen een *magneetafscheider* waar de ferrometalen worden afgescheiden. Vervolgens wordt een *eddy current scheidingsinstallatie* doorlopen waar met behulp van de wervelstromen, die worden opgewekt door een roterende permanente magneet, de non-ferromaterialen worden weggeschoten.

Uit de resterende stofstroom kunnen eventueel nog andere fracties worden afgescheiden waarbij diverse technieken worden ingezet. Hierbij zal vaak gebruik worden gemaakt van verschillen in soortelijke massa zoals bij float- and sink technieken. Zo zinkt PVC in water terwijl de meeste andere kunststoffen drijven. Door media te gebruiken van uiteenlopende soortelijke massa kan men op basis van dit principe diverse componenten scheiden. Het gevarieerde arsenaal aan scheidingstechnieken is vooral ontwikkeld ten behoeve van de mijnbouw, waar reusachtige stofstromen moeten worden behandeld.

De van de scheidingsoperatie resulterende materiaalstromen zijn niet volmaakt zuiver om de volgende redenen:

- De brokstukken zijn zo groot dat ze delen van verbindingen bevatten en daardoor inhomogeen zijn,
- De materialen zijn composieten zoals gelaagde of samengestelde materialen.
- Oppervlaktelagen zoals lak en lijm zijn niet of moeilijk te scheiden,
- Aan materialen zijn additieven toegevoegd waarvan de samenstelling vaak niet bekend is en die niet langs mechanische weg te scheiden zijn,
- Materialen kunnen vervuild zijn,
- De scheidingsoperatie zelf is niet exact selectief maar verrijkt respectievelijk verarmt de stofstroom met betrekking tot een bepaald materiaal.
- Om technisch-economische redenen moeten verwante stoffen bij elkaar worden gevoegd.

### 3.5. Opwerken.

De materiaalstromen die bij het scheiden vrijkomen moeten in het algemeen nog worden opgewerkt. Dat geldt trouwens ook voor de materiaalstromen die eerder al bij de selectieve disassemblage ontstaan en voor hergebruik van materiaal in aanmerking komen. De bewerkingen zijn mechanisch en chemisch van aard. Tot de mechanische bewerkingen behoren onder meer briketten persen, pelletiseren, malen en dergelijke. Tal van chemische bewerkingen kunnen nodig zijn om materialen te verkrijgen van een voldoende zuiverheidsgraad en/of om kostbare materialen af te scheiden. Voor zover het om edelmetalen en zeldzame aardmetalen gaat zullen de chemische bewerkingen zeer complex zijn. Hierbij kunnen grote hoeveelheden afvalstoffen en emissies vrijkomen en is ook het energiegebruik hoog, bijvoorbeeld omdat elektrolyse wordt toegepast en/of het materiaal moet worden gesmolten.

Tot opwerking hoort ook het omzetten of afbreken van chemische verbindingen, bijvoorbeeld pyrolyse waarmee polymeren weer tot hun bouwstenen, de monomeren, worden afgebroken. Daaruit kunnen dan opnieuw polymeren worden vervaardigd die aan de gewenste kwaliteitsnormen voldoen.

Tenslotte kan het nodig zijn om schadelijke bestanddelen te immobiliseren, opdat ze niet vrijkomen in het milieu. Een voorbeeld is insluiting door verglazing.

Ondanks opwerking is het resulterende materiaal niet altijd van dezelfde kwaliteit als het oorspronkelijke. Dit kan technische maar ook economische redenen hebben. Er kunnen zich bijvoorbeeld verontreinigingen in het materiaal bevinden, de structuur van het materiaal kan zijn aangetast enzovoorts. Bij aanwezigheid van verontreinigingen is het mogelijk dat er een beperking is aan de hoeveelheid secundair materiaal (bijvoorbeeld schroot) die aan het primair materiaal kan worden toegevoegd. Ook komt het voor dat bepaalde verwerkingsmethodes voor primaire grondstoffen niet kunnen worden toegepast als er ook secundair materiaal wordt toegevoegd. De verwerkingsmethode moet namelijk in staat zijn om de aanwezige extra verontreiniging uit de secundaire grondstof te verwijderen. Soms voldoet secundair materiaal zoals kunststof of glas eenvoudigweg niet aan de specificaties die worden gevraagd omdat er teveel additieven in zitten.

### 3.6. Hergebruiken.

Uiteindelijk zal het herwonnen materiaal worden hergebruikt. Dit kan geschieden in een hoogwaardiger, een gelijkwaardige of een laagwaardiger toepassing.

Een hoogwaardiger toepassing lijkt paradoxaal, treedt echter toch incidenteel op, bijvoorbeeld met betrekking tot het restprodukt elektrodeslib, een procesafval bij elektrolyse, waaruit op rendabele wijze zeer kostbare materialen gewonnen kunnen worden zoals Au, Ag, Pt en Mb.

Een gelijkwaardige toepassing komt voor bij metalen. Soms worden er echter beperkingen gesteld aan de secundaire grondstof. Dit betekent dat deze voor bepaalde hoogwaardige toepassingen niet altijd in aanmerking komt.

Vooraf bij kunststoffen ziet men dat de toepassing voor hergebruik laagwaardiger is dan de aanvankelijke. Niet alleen het materiaal zelf is aan slijtage en afbraak onderhevig, maar ook kan men geen goed gedefinieerde en voldoende zuivere retourstromen genereren. Beeldbuizen bijvoorbeeld bestaan uit samengestelde glassoorten waaruit, in geval van hergebruik, nimmer nieuwe beeldbuizen zijn te vervaardigen. Het materiaal wordt tegenwoordig gebruikt voor email van sanitair, na welke toepassing het overigens niet meer terug te winnen is, behalve dan als een soort keramisch puin dat zijn weg weer vindt naar nog laagwaardiger toepassingen. Een voorbeeld van een laagwaardige toepassing is vulmiddel, waarbij geen bijzondere eisen aan sterkte of oppervlaktestructuur worden gesteld, hooguit een zekere mate aan elasticiteit zoals bij vulstof voor wegverharding.

Een toepassing als ophoogmiddel voor taluds en dergelijke is wellicht een van de meest laagwaardige toepassingen. Men spreekt wel van 'lineaire vuilnisbelten' doch bij deze toepassing wordt wel degelijk grind en zand vervangen door granulaat.

*Substitutie* is een effect dat bij hergebruik altijd optreedt. Bij de toerekenen van de offers die men voor het recyclen maakt (kosten, milieubelasting enzovoorts) zal men een afweziging moeten maken ten opzichte van de offers bij het niet recyclen. Deze omvatten de eindverwerking van het secundaire materiaal, dat in het milieu moet worden geloosd, en de offers voor het verkrijgen van de primaire materialen die door de secundaire (uit afval gewonnen) materialen kunnen worden vervangen. Er zal hierbij overigens een rebound-effect optreden: door het overvloedig ter beschikking komen van laagwaardige secundaire materialen zal de prijs ervan afnemen en de vraag naar deze materialen en hun toepassingen

toenemen.

### 3.7. Eindverwerking.

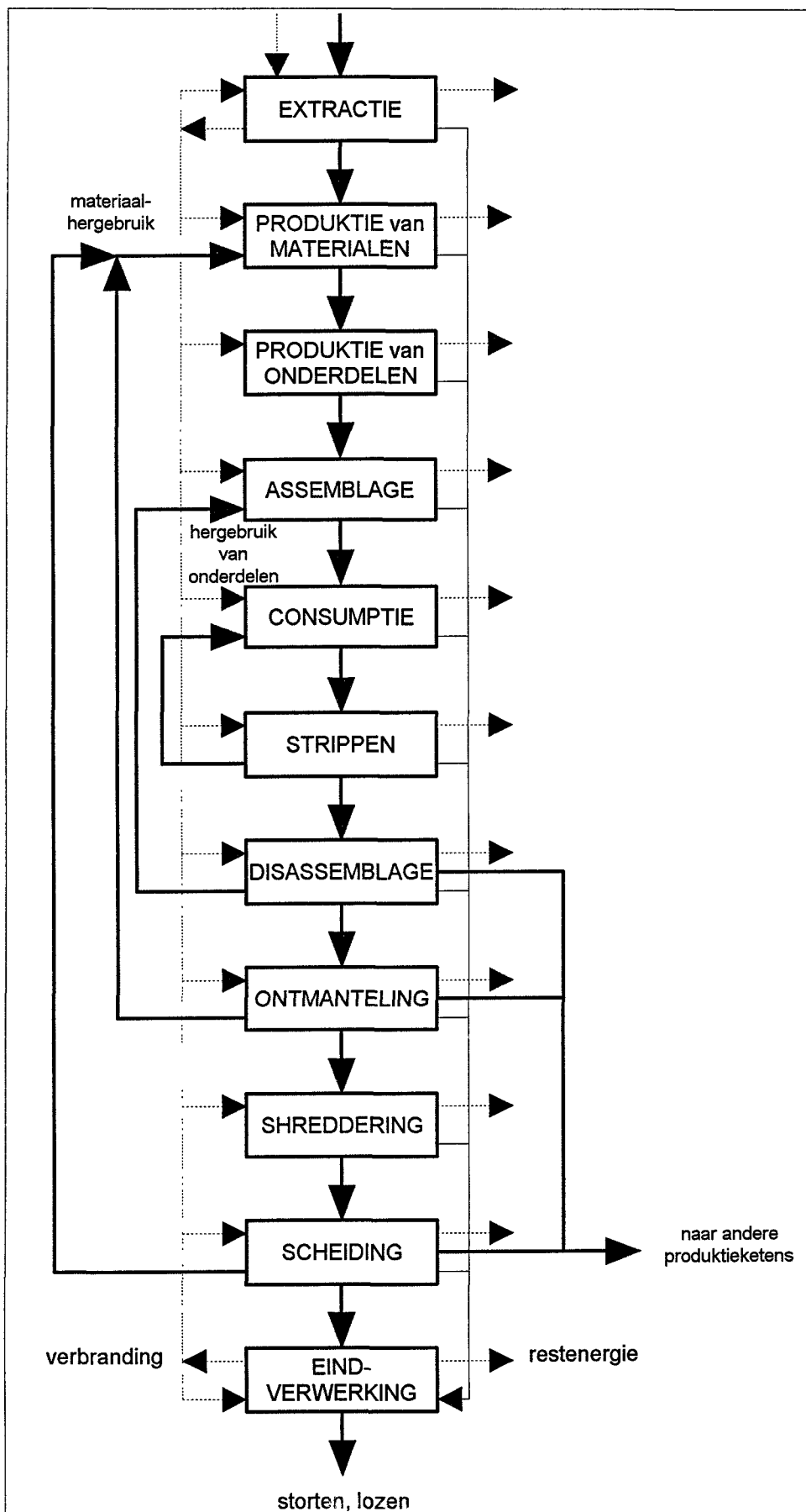
De eindverwerking omvat het voorbereiden van de reststromen op het terugbrengen in het milieu. Ze omvat een aantal produktiestappen die ten doel hebben om de schadelijkheid van de stofstromen naar het milieu te beperken. Een voor de hand liggende eindverwerking is *verbranden*. Hier bij kan niet alleen energie uit de rest stoffen worden gewonnen, doch bovendien kunnen schadelijke verbindingen worden vernietigd. Het eindprodukt omvat afgassen en slak. De afgassen moeten worden gereinigd, waarbij uiteraard ook weer stofstromen vrijkomen zoals vervuilde filters en verontreinigd water dat op zijn beurt ook weer gezuiverd moet worden. De slak kan worden hergebruikt, of moet verder worden verwerkt of worden gestort.

De uiteindelijke eindverwerking is *storten*. Uit de organische bestanddelen kan dan nog stortgas worden onttrokken. Het milieuprobleem bij storten is het volume en de schadelijke emissies naar water en bodem. Om deze tegen te gaan wordt het percolatiewater opgevangen en aerob gezuiverd. Ook het stortgas wordt opgevangen en verbrand, waarbij energie wordt opgewekt. Voor zover het om gevaarlijke en niet-afbreekbare stoffen gaat wordt een wissel op het nageslacht getrokken: 'daar vinden ze vast wel wat op'.

### 3.8. Levenscyclus.

De in figuur 1 t/m 5 behandelde modellen voor de levenscyclus van een produkt kunnen met behulp van het bovenstaande worden uitgebreid. Om te beginnen wordt de produktie (paragraaf 1.2.2) voorgesteld door een drietal stappen: produktie van materialen, produktie van onderdelen en assemblage van onderdelen. Daarbij worden achtereenvolgens de intrinsieke en extrinsieke eigenschappen en de totale functionaliteit gecreëerd. Na de consumptie worden een aantal verwerkingsstappen uitgevoerd die een min of meer omgekeerd beeld van de produktie te zien geven: strippen, disassembleren, ontmantelen, ontsluiten en scheiden. Hierbij worden achtereenvolgens onderdelen voor consumptie, onderdelen voor produktie, en materialen teruggewonnen. Uiteindelijk vindt een eindverwerking plaats waarbij eventueel nog energie teruggewonnen wordt en verder slechts laagwaardige bijprodukten, afval en emissies ontstaan.

In aanmerking moet worden genomen dat alle produktiestappen energie kosten en procesafvallen genereren. Uiteindelijk ontstaat het beeld van figuur 8. Men kan daar op twee manieren tegenaan kijken. Om te beginnen kan men deze keten beschouwen als een model van het gehele produktiesysteem. Secundaire materiaalstromen vloeien dan terug in de keten, waarbij de toepassing natuurlijk kan veranderen. Men kan de keten echter ook beschouwen als zijn de toegespitst op een bepaald produkt. In dat geval kunnen secundaire materiaalstromen de keten verlaten en in een andere keten terechtkomen.



Figuur 8: Volledige produkt-levenscyclus met inbegrip van hergebruik.

#### 4. Theoretische beschouwingen.

De volgende theoretische problemen worden hier nader uitgewerkt:

- Energie- en milieu-optimalisatie.
- Optimale disassemblagediepte, optimaal herverwerkingstraject.

##### 4.1. Energie- en milieu-optimalisatie.

###### 4.1.1. Energie-optimalisatie.

Het energiegebruik dat vereist is om een bepaald produkt te vervaardigen wordt met behulp van de methode van bruto energiebehoefte (GER) bepaald. Deze methode, ontwikkeld door IFIAS [10], maakt het mogelijk om op gestandaardiseerde wijze aan te geven hoeveel energie het kost om, bijvoorbeeld, een kilogram zuiver koper te vervaardigen. Door eenzelfde analyse op secundair koper uit te voeren, waarbij vanaf het gebruik de diverse verwerkingsstappen als inzameling, demontage, shredderen enzovoorts worden meegenomen, kan men het energiegebruik van primair en secundair materiaal met elkaar vergelijken. Het winnen van koper uit afval kan analoog aan het winnen van koper uit erts worden beschouwd. Een van de complicaties daarbij is dat zowel primair als secundair materiaal uit verschillende bronnen kan voortkomen. Bovendien is op korte termijn het aanbod van secundair materiaal begrensd. Dat van primair materiaal is veel ruimer omdat de uitputting van de voorraden aan primair materiaal een verschijnsel is dat zich op een lange tijdschaal afspeelt. Het aanbodprobleem van secundair materiaal is nog het best vergelijkbaar met dat van materialen die uitsluitend als nevenprodukt gewonnen worden, zoals Cadmium.

Van belang zijn de grootheden *inzamelpercentage* en *recyclepercentage*.

Het *inzamelpercentage* is het percentage van een bepaald materiaal (in kg/kg) of discreet produkt (in stuks/stuks) dat wordt ingezameld op jaarbasis. Een probleem hierbij is de vraag, over welke grootheid dit percentage genomen moet worden, aangezien de productie van goederen per jaar sterk kan fluctueren en de verblijfstijd van de produkten in de consumptiesfeer een grote spreiding vertoont.

Het *recyclepercentage* is het percentage van een bepaald materiaal dat daadwerkelijk gerecycled wordt.

Het *inzamelpercentage* is altijd kleiner dan 100 %. Om dit percentage te verhogen zijn relatief gezien steeds meer offers nodig. De offers voor iedere toegevoegde eenheid, de *marginale offers*, nemen toe met het *inzamelpercentage*. Vanaf een zeker *inzamelpercentage* overtreffen de marginale offers zelfs die van de winning van primair materiaal, bijvoorbeeld uit erts. Bij offers hoeft men niet alleen aan financiële offers te denken maar ook aan, bijvoorbeeld, energie- of milieu-offers. Het zal hiermee duidelijk zijn dat een *inzamelpercentage* van 100%, zelfs al was dat technisch mogelijk, in het algemeen niet zinvol is.

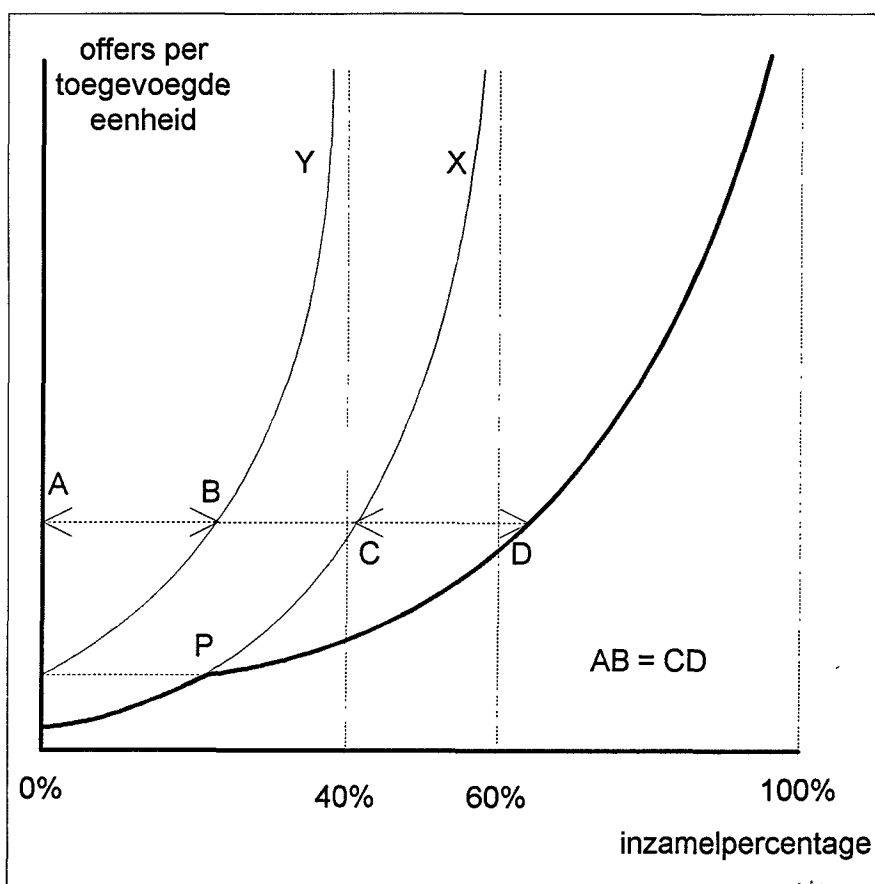
Het *inzamelpercentage* van materialen is afhankelijk van het spectrum aan toepassingen dat het betreffende materiaal heeft. Dit kan een *diffuse*, *semi-diffuse* of *discrete* toepassing zijn. Door diffuus gebruik komt een materiaal in lage concentratie in het milieu terecht zoals het geval is bij het gebruik van koper in veevoer, of bij slijtage van materialen. Het betreffende



materiaal kan niet worden ingezameld.

Door semi-diffuus gebruik wordt een materiaal in lage concentratie aan andere materialen toegevoegd, die wél kunnen worden ingezameld maar waarbij het grote offers kost om het betreffende materiaal terug te winnen. Als voorbeeld kan genoemd worden: koperzouten als pigment in inkt. Het koper wordt ingezameld via het oud papier, maar de concentratie ervan is te laag om winning zinvol te maken. Ook het gebruik van koperen nietjes kan men opvatten als semi-diffuus. Een deel ervan kan worden teruggewonnen als bijproduct bij de scheiding van oudpapier.

Indien een auto wordt ingezameld zal het technisch onmogelijk zijn om al het daarin aanwezige koper terug te winnen. Een deel is namelijk in kleine onderdelen aanwezig, en een ander deel is in de vorm van legeringen, oppervlaktelagen en verbindingen terug te vinden. Omdat de scheidingsmethoden na inzameling bovendien niet voor 100 % selectief zijn zal er ook een deel van het materiaal zijn dat uit het proces tevoorschijn komt als ongewenste verontreiniging van een andere materiaalstroom, of als bestanddeel van een restfractie die wordt gestort of verbrand. Door al deze oorzaken is het recyclepercentage altijd kleiner dan het inzamelpercentage.



Figuur 9: Offers bij inzameling van een materiaal met twee toepassingen.

Bij kunststoffen, rubbers, glas en dergelijke liggen de zaken nog veel gecompliceerder. Door hun grote variatie in samenstelling, de bijgevoegde additieven, de lage waarde en vaak de kleinheid van onderdelen bestaat er een combinatie van technische en economische factoren die het vrijwel onmogelijk maakt deze stoffen te recyclen en in te zetten voor een hoogwaardig doel. Aan slechte oppervlakte-eigenschappen valt nog wel wat te doen, maar slecht te mechanische eigenschappen vormen een ernstige beperking. Dit leidt ertoe dat dit soort kunststoffen uiteindelijk nog slechts

aangewend kunnen worden voor laagwaardige toepassingen, zoals vulmiddelen en dergelijke. In de automobiellindustrie bijvoorbeeld ziet men een neerwaartse recycling van kunststoffen waaraan hoge technische eisen worden gesteld zoals bumpers en benzinetanks, via

dashborden en sierstukken tot verborgen onderdelen waaraan nauwelijks eisen worden gesteld. Bij de PVC-pijp is een bekende keten: waterleidingbuis-rioleringsbuis-draineringsbuis. Deze volledige cyclus leidt overigens tot een verblijfstijd binnen het technosysteem van een eeuw of langer.

Bij papier heeft men een neerwaartse kwaliteitsspiraal van kopieerpapier, via druk- en schrijfpapier en pakpapier/karton naar hygiënisch- en wegwerppapier.

Figuur 9 toont de offers (energie of kosten) per eenheid extra in te zamelen materiaal als functie van het recyclingspercentage. In deze figuur is gedemonstreerd dat ze tot stand komt door superpositie van verschillende toepassingen. Een bepaalde stof wordt immers voor tal van toepassingen gebruikt waarvan de discrete toepassingen gemakkelijk, semi-diffuse toepassingen minder gemakkelijk en diffuse toepassingen vrijwel niet gerecycled kunnen worden. In figuur 9 is aangegeven hoe de superpositie tot stand komt bij twee categorieën van toepassingen. Het denkbeeldig materiaal wordt voor 60 % gebruikt voor de gemakkelijk terug te winnen toepassing X en voor 40 % voor de moeilijker terug te winnen toepassing Y. Het spreekt vanzelf dat, naarmate een groter gedeelte van de toepassing is ingezameld, iedere volgende eenheid meer offers zal vergen. De allerlaatste eenheden zijn slechts tegen zeer hoge offers, of in het geheel niet, terug te winnen. Dit is aangegeven met asymptoten. Men begint de toepassing Y pas in te zamelen als van de gemakkelijker in te zamelen toepassing X zo'n hoog percentage is ingezameld dat iedere toegevoegde eenheid X even lonend is als een toegevoegde eenheid van Y. Dit is aangegeven met punt P in figuur 9. Vaak zal het daarbij om een economisch criterium gaan. De offers per toegevoegde eenheid van het materiaal als geheel (vette lijn) worden verkregen door X en Y te superponeren. Hoe dat gaat is aangegeven met de lijnstukken AB en CD, die even lang dienen te zijn.

Een praktijkvoorbeeld voor verschillende toepassingen van een materiaal wordt gegeven voor het metaal cadmium [11]:

- Ni-Cd-batterijen	61 %
- Pigmenten	16 %
- Stabilisatoren	11 %
- Coatings	7 %
- Legeringen	2 %
- Diversen	3 %

De Ni-Cd-batterijen (herlaadbare batterijen voor walkmans en dergelijke) kan men relatief gemakkelijk inzamelen waarbij een statiegeldsysteem denkbaar is. De overige toepassingen hebben weliswaar betrekking op discrete produkten, maar het betreffende materiaal komt er vaak in zulke lage concentraties in voor dat het -zelfs bij een hoog inzamelpercentage van deze produkten- nauwelijks terug te winnen is. Figuur 7 geeft een prognose van het aandeel van secundair cadmium in de totale cadmiumproductie weer. Ze is zowel aan de vraag- als aan de aanbodzijde sterk afhankelijk van de verschillende toepassingen. Omdat cadmium een nevenprodukt is van de zinkfabricage kan een nieuwe, grootschalige toepassing ervan niet los gezien worden van het probleem hoe aan de vergrote vraag kan worden voldaan. Recycling maakt een integraal onderdeel uit van het oplossen van dit probleem.

Voor kunststoffen zijn gegevens voor West-Europa bekend omtrent de verschillende toepassingen en het recyclingsniveau per toepassing. Ze zijn illustratief voor de verschillen die per toepassing bestaan.

Toepassing:	%	Recyclingsniveau (%)
Landbouw	4	20,5
Automobiellndustrie	10	5
Bouw	16	6
Verpakking bij distributie	38	25
Huishoudelijke produkten	32	0,9

Het is meestal zo dat grote, homogene en goed gedefinieerde stromen het hoogste recyclingpercentage kennen.

De bovenstaande beschouwing blijft onverkort geldig als men zich beperkt tot het energiegebruik. Het specifieke energiegebruik neemt, op dezelfde wijze als de offers, toe bij een hoger recyclingpercentage.

Natuurlijk is de energiebehoefte voor terugwinning ook afhankelijk van de recyclingmethode, waarvan er vele bestaan. Energiekengetallen voor een aantal kenmerkende processen (unit-operations) bij het verwerken van afgedankte produkten zijn te vinden in [9]. Deze cijfers lijken echter soms enkele grootte-orden te laag ingeschat en zijn daardoor niet altijd betrouwbaar.

Het ontstaan van nevenprodukten, een omstandigheid die nogal eens wordt verwaarloosd of genegeerd, is bij beschouwingen over hergebruik essentieel omdat scheidingsprocessen zo'n grote rol spelen bij de verwerking van produktafvallen. Als er echter nevenprodukten optreden wordt men geconfronteerd met een *allocatieprobleem*. Het toekennen van de offers aan de verschillende deelstromen is tot op zekere hoogte arbitrair. Dit betekent dat, als men naar het energiegebruik kijkt, het niet eenduidig vastligt hoe men de energie die een productieproces kost, moet verdelen over de verschillende soorten produkten die eruit voortkomen.

Al de bovengenoemde beperkingen in aanmerking genomen kan men zich een idee vormen van de energiebehoefte voor recycling en dit vergelijken met de energiebehoefte voor het verkrijgen van gelijkwaardig primair materiaal.

#### 4.1.2. Milieu-optimalisatie.

De moeilijkheden die optreden bij het bestuderen van de energie-optimalisatie doen zich bij milieu-optimalisatie in nog sterkere mate voor. Dat komt omdat bij de beoordeling van de milieu-prestaties van recycling en hergebruik aan meerdere criteria moet worden voldaan. Deze criteria zijn niet zonder meer met elkaar vergelijkbaar. Sommige effecten zijn lokaal van karakter (geluid), andere zijn globaal van aard, bijvoorbeeld uitputting of CO<sub>2</sub>-emissie. Al deze uiteenlopende effecten moeten met elkaar worden vergeleken. Daarbij mag nimmer worden voorbijgegaan aan de al even complexe economische, logistieke en technische

criteria. Bij traditionele LCA (Life Cycle Analysis) berekeningen [12] wordt met het creëren van nevenprodukten geen rekening gehouden. De bekende softwarepakketten zoals SimaPro en PIA, die hulpmiddelen zijn bij LCA zijn niet in staat om met nevenprodukten om te gaan. Ook wordt daar met vaste waarden gewerkt, terwijl zojuist is uiteengezet dat, bijvoorbeeld, de milieu-effecten sterk afhankelijk van het inzamelpercentage en het recyclepercentage.

Een voorbeeld is het recyclen van koelkasten. Hoofddoel is het terugwinnen van CFK's uit koelcircuit en isolatiemateriaal. Als nevenprodukt ontstaan stromen ferro- en non-ferromateriaal, en bepaalde kunststofstromen. Als restprodukt ontstaat een lichte fractie. De milieuwinst door het elimineren van schadelijke stoffen en het recyclen van materiaal moet worden afgewogen tegen energiegebruik en milieubelasting door het verzamelen en het complexe recyclingproces. Daarnaast moeten economische criteria in aanmerking worden genomen. Van belang is de vraag hoe de 'milieuwinst' moet worden afgewogen tegen de gemaakte kosten. Dit is vooral van belang als de activiteit niet intrinsiek rendabel is, maar via wetgeving, heffingen of subsidies rendabel gemaakt wordt.

#### 4.2. Optimale disassemblagediepte.

Een van de problemen waarbij men zich gesteld ziet bij het ontwerpen van een verwerkingstraject is het probleem van de optimale disassemblagediepte. Onder *disassemblagediepte* verstaat men de mate waarin wordt gedisassembleerd. Het is immers meestal niet nodig om een afgedankt produkt geheel te disassembleren. Men moet hierbij bedenken dat, hoewel de theorie over disassemblage oorspronkelijk voortkwam uit de theorie over assemblage, er toch grote onderlinge verschillen zijn. Deze zijn technisch en economisch van aard. Als men een produkt assembleert wordt bij iedere assemblage stap waarde toegevoegd. Dit is bij disassemblage niet zonder meer het geval. Een disassemblage stap kan meer offers kosten dan de produkten die ze oplevert opbrengen. Dit wordt in principe als volgt berekend: stel dat een produkt A door een disassemblage stap uiteenvalt in de produkten B en C. De opbrengst per gewichts-eenheid kan voor B en/of C hoger zijn dan voor A, bijvoorbeeld omdat het onderdeel zuiverder is van samenstelling.

Ook disassembleren kost een bepaald bedrag. De offers worden bepaald door dit bedrag, vermeerderd met de opbrengst van A bij verkoop, omdat A door de disassemblage stap vernietigd wordt. De opbrengsten zijn die van B en C samen, en deze moeten hoger zijn dan de kosten opdat de disassemblage stap rendabel is.

In tegenstelling tot assemblage behoeft disassemblage niet volledig te gebeuren. Als de laatste disassemblage stap onrendabel is, dient ze niet te worden uitgevoerd. Hetzelfde geldt voor groepen van disassemblage stappen. Dit maakt reeds bij eenvoudige produkten met enkele componenten het aantal theoretisch mogelijke disassemblage trajecten nog vele malen groter dan het aantal theoretisch mogelijke assemblage trajecten. Van deze enorme hoeveelheid theoretisch mogelijke trajecten vallen overigens vanwege de specifieke configuratie van het produkt ook weer de meeste af, maar zelfs dan blijven er nog heel veel over, zie [7a]. Met een grafische methode of een eenvoudig algoritme kan men niettemin het optimale disassemblage traject bepalen.

Als voorbeeld zijn voor een apparaat dat uit 10 onderdelen bestaat een aantal berekeningen

uitgevoerd:

Het aantal theoretisch mogelijke volledige disassemblagetrajecten be draagt 34.459.425

Indien ook onvolledige disassemblagetrajecten worden beschouwd, bedraagt het aantal disassemblagetrajecten zelfs 314.726.297, dus ongeveer tienmaal zoveel.

Het aantal uitvoerbare (on)volledige disassemblagetrajecten bedraagt in het specifieke geval echter 'slechts' 298, omdat niet ieder onderdeel met ieder ander onderdeel verbonden is.

Deze aantallen nemen snel toe als functie van het aantal onderdelen, en de meeste afgedankte produkten bevatten honderden tot duizenden onderdelen.

De werkelijkheid is nog ingewikkelder dan bovenstaande uiteenzetting doet vermoeden. Om te beginnen is niet mogelijk om de kosten van iedere theoretisch mogelijke disassemblagehandeling van een bepaald produkt, noch de opbrengsten van de vele theoretisch mogelijke partiële combinaties van onderdelen te kennen.

In de praktijk zal men dus het disassemblageproces niet gedetailleerd beschrijven, maar het verdelen in een aantal groepen van handelingen en deze als een geheel beschouwen. Dit wordt bijvoorbeeld gedaan bij het model van Spengler et al. [13], voor het slopen van huizen.

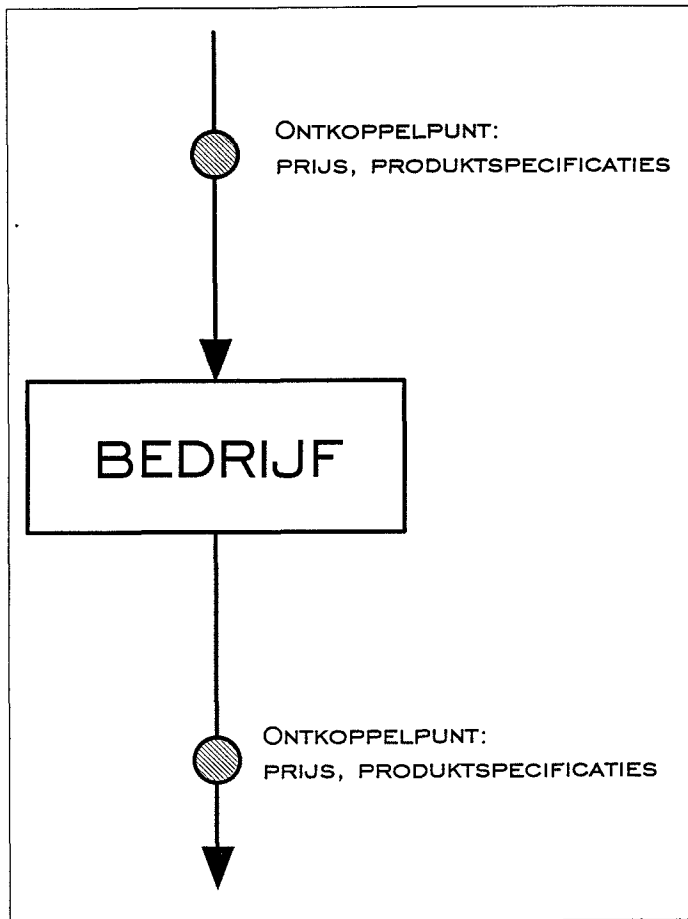
Omdat bij disassemblage andere, en meestal gemakkelijker te vervullen kwaliteitseisen bestaan dan bij assemblage, zullen de overeenkomstige handelingen eenvoudiger en dus goedkoper kunnen zijn. Bovendien zijn destructieve handelingen zoals zagen, snijden en breken toegestaan. Deze zijn zelfs noodzakelijk als de verbindingen, die bij de assemblage tot stand zijn gebracht, niet reversibel zijn.

Beperking van vrijheidsgraden treedt op als er verplichtingen bestaan om bepaalde onderdelen, zoals PCB-bevattende condensatoren, te verwijderen. Dit houdt in dat bepaalde handelingen altijd moeten worden verricht. Daarbij horen ook voorbereidende handelingen die als 'nevenprodukt' weer andere demontagehandelingen rendabel maken. Als, bijvoorbeeld, van een auto de carterolie moet worden verwijderd moet deze op een brug worden gereden. Dit maakt het tevens lonend om een aantal onderdelen aan de onderzijde van de auto te demonteren.

Door de opbrengst van de verschillende onderdelen tot criterium te maken, wordt een van *informatie-ontkoppelpunt* in de keten ingebouwd (figuur 10). Een informatie-ontkoppelpunt of *informatie-verdichtingspunt* heeft tot kenmerk dat informatie daar wordt geaggregeerd, bijvoorbeeld tot een of enkele kengetallen. Een voorbeeld zo'n kengetal is de prijs van een produkt. Indien een bedrijf aan de zijde van de toeleveranciers en de klanten enkel prijsinformatie heeft zal het de vrijheidsgraden in zijn productieproces zodanig kiezen dat een optimum volgens een bepaald criterium, bijvoorbeeld de winst, wordt bereikt.

Voor een demontage- of ontmantelingsbedrijf betekent dit dat de voorafgaande handelingen en de handelingen die 'stroomopwaarts' gebeuren, met name bij shredderen, scheiden en opwerken, niet waargenomen worden. Ze vertalen zich slechts in enkele kengetallen, namelijk de opbrengsten van de geproduceerde materialen.

Indien men het verwerkingsproces wenst te optimaliseren dient eigenlijk de gehele procesketen beschouwd te worden. Dit is echter in de praktijk niet mogelijk, ook al omdat de verwerking evenals de productie geen lineaire keten is, doch een wijdvertakt netwerk dat voortdurend verandert. De vele vrijheidsgraden ervan omvatten onder andere korrelgrootte bij het shredderen en de configuratie en instelling van de scheidingsinstallatie, alsmede de



Figuur 10: Informatie-ontkoppelpunten in een productieketen.

mogelijkheden tot opwerking.

Door de aanwezigheid van ontkoppelpunten vindt dus meestal een sub-optimalisatie op bedrijfsniveau plaats. De disassemblage gebeurt dan zodanig dat de opbrengst van de verschillende vrijkomende producten maximaal is.

Het sterk divergente karakter van het disassemblageproces leidt tot de complicatie dat van een lineaire 'slooplijn' geen sprake is. Een PC bijvoorbeeld valt uiteen in monitor, systeem en toetsenbord die elk op hun eigen wijze moeten worden verwerkt. Dat kan gebeuren op parallelle lijnen, of men kan van ieder onderdeel voorraden opbouwen en de lijn regelmatig omstellen op een nieuw te ontmantelen product. Bij auto's (en slachterijen) wordt een karkas ontmanteld en de diverse vrijgekomen onderdelen of modules ondergaan specifieke bewerkingen aan een zijlijn of in een ander bedrijf.

In figuur 11 ziet men een schema-

tisch weergegeven hoe een product bij selectieve demontage uiteenvalt in verschillende categorieën:

1. Voor hergebruik geschikte modules en onderdelen.
- 2a. Voor materiaalhergebruik geschikte onderdelen.
- 2b. Onderdelen die worden uitgenomen om shredderresidu te verminderen.
3. Gevaarlijk afval.
4. Modules en onderdelen die niet verder worden gedemonteerd.

1. Bij categorie 1 volgen nog bewerkingen als testen en reinigen.

2. Bij de categorie 2a. en 2b. volgt na een divergente produktiestap altijd een convergente produktiestap, het aggregeren of sorteren. Dit is behandeld in paragraaf 3.2.

Het ontkoppelpunt ligt, ook bij uitbesteding van verdere verwerking, altijd na het sorteren, want men biedt het product op de markt aan nadat het gesorteerd is. Omdat de verwerker, zeker als het om hergebruik gaat, van een redelijk constante aanvoer verzekerd wil zijn is ook de grootte en voorspelbaarheid van de stroom belangrijk.

Optimalisatie van disassemblagediepte betreft dus altijd een gecombineerd probleem van disassembleren en aggregeren.

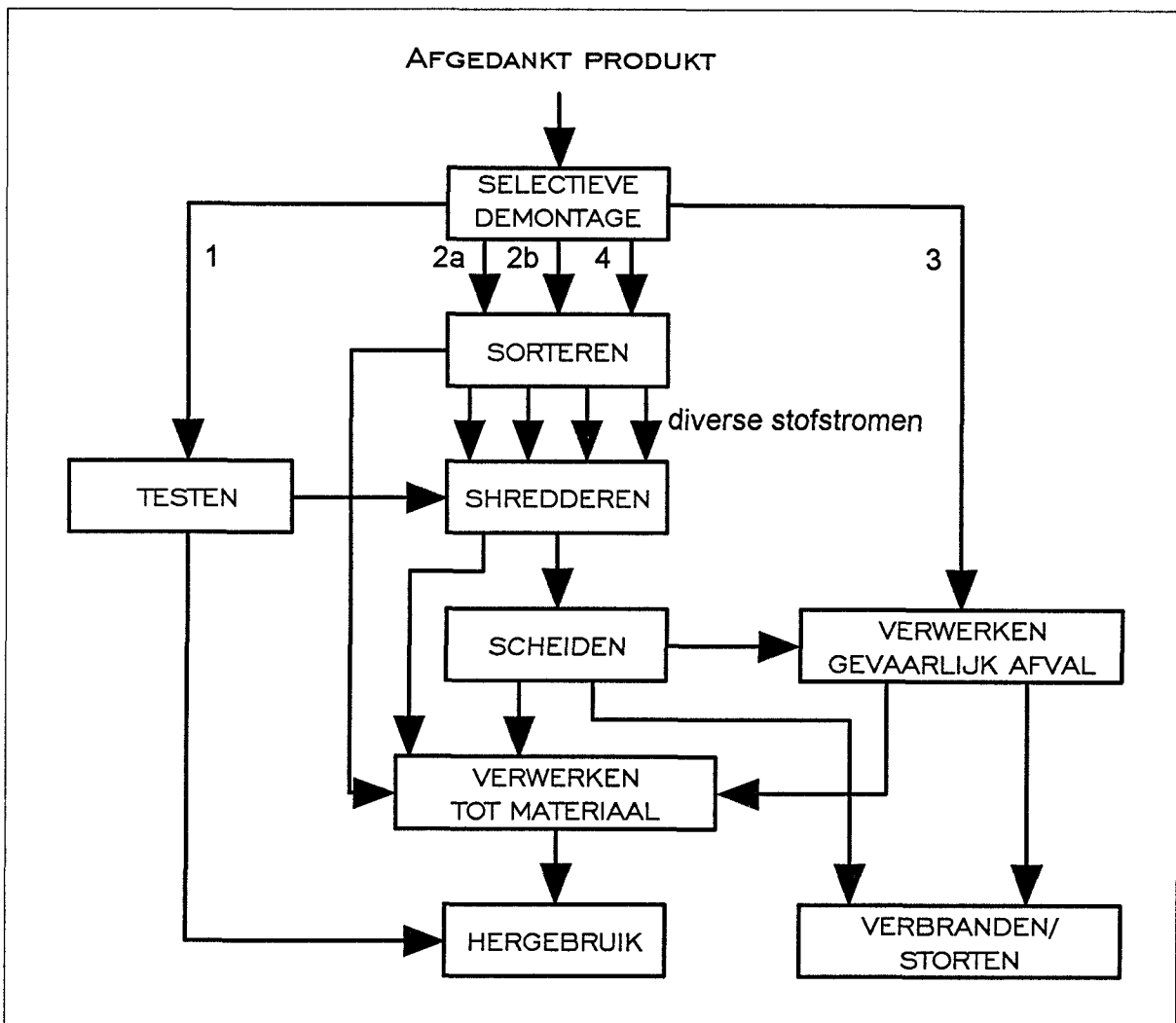
De verwerking kan bestaan uit malen tot granulaat, shredderen en scheiden, smelten,

verbranden en storten

.3. Gevaarlijk afval wordt door bevoegde verwerkers verwerkt. Hierbij kan sprake zijn van hergebruik voor een laagwaardige toepassing, chemische behandeling, verbranden en gecontroleerd storten.

4. Categorie 4 kan worden verwerkt door shredderen, smelten, verbranden en storten. Na het shredderen wordt gescheiden waarna een slecht definieerbaar en laagwaardig shredderesidu achterblijft. Dit kan op zijn beurt worden verbrand en gestort.

Bij verbranding komt slak vrij en bij de bijbehorende rookgasreiniging komen onder meer



Figuur 11: Diverse verwerkingstrajecten bij complexe producten.

filterresten vrij. Dit alles moet uiteindelijk ook worden gestort tenzij de reststof niet schadelijk is of zo inert dat het kan worden toegepast als bijvoorbeeld ophoogmiddel. Uiteraard komen bij de verbranding ook afgassen vrij.

In een dergelijk ingewikkeld schema moeten ook nog milieu- en energie-criteria worden meegenomen want, zeker als het herverwerkingsproces niet intrinsiek rendabel is, zal de milieu-winst positief moeten zijn.

## Referenties en verdere literatuur.

- [1] Lambert A.J.D., *Massa- en energiestromen*, in Hekman H. red., *Handboek Arbeids & Milieuveiligheid*, Kluwer Bedrijfswetenschappen, Deventer, 1995.
- [2] Ausubel J.H. en Sladovich H.E. red., *Technology and Environment*, National Academic Press, Washington DC, 1991.
- [2a] Ayres R.U., *Industrial Metabolism*, pp. 23-49, in [2].
- [3] Alting L., *Manufacturing Engineering Processes*, M. Dekker Inc., New York, 1982.
- [4] Veen, E.A. van, *Modelling Product Structures by Generic Bills-of-Materials*, Proefschrift, TU Eindhoven, 1991.
- [5] Ministerie van VROM, *Milieuveilig omgaan met chemisch afval*, brochure, Den Haag, 1991.
- [6] *Nickel-Cadmium Batteries*, brochure van The NiCd Electric Vehicle Information Center, London.
- [7] Ebrahimpur M., Proceedings of 23<sup>d</sup> Annual Regional Conference of Northeast DSI, Omnipress, Madison Wi (USA), 1994.
- [7a] Lambert A.J.D., *Optimal Disassembly of Complex Products*, pp 74-80, in [7]
- [8] Nijkerk A.A., *Handboek der Recycling Technieken*, Nationaal Onderzoekprogramma Hergebruik van Afvalstoffen (NOH), Nijkerk Consultancy, Den Haag, 1994.
- [9] Heijningen R.J.J. van, Castro J.F.M. de, Worrell E. en Hazewinkel J.H.O., *Meer Energiekentalen in relatie tot Preventie en Hergebruik van Afvalstromen*, Nationaal Onderzoekprogramma Hergebruik van Afvalstoffen (NOH), 1992.
- [10] The International Federation of Institutes for Advanced Study (IFIAS), Report of Workshop No. 9 on Energy Analysis and Economics, Lidingö, Zweden, 1975.
- [11] Cook M.E., *Cadmium: Supply, Demand and the Electric Vehicle*, 9th International Minor Metals Seminar, Budapest, 1993.
- [12] Heijungs R. Et al., *Environmental Life Cycle Analysis of Products; Guide & Backgrounds*, Centrum voor Milieukunde, RU Leiden, 1992.
- [13] Spengler T., *Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis*, Band 67, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994.
- [14] Feldmann K., Recy '94, Proceedings of 2. International Seminar on LCA gehouden te Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg (D), 1994.
- [14a] Heldmann K., Scheller H., Meerkamm H. en Krause D., *Design for Recyclability and Economic Planning of Disassembly based on the Recyclinggraph Tool*, pp 76-90, in [14].
- [14b] Bullinger H.-J., Warschat J., en Bopp R., *Methods and Tools to Support Design for Recycling*, pp 106-127, in [14].
- [14c] Hentschel C., Seliger G., en Zussman E., *Recycling Process Planning for Discarded Complex Products: A Predictive and Reactive Approach*, pp 195-209, in [14].
- [15] Angerer G., Bätcher K. en Bars P., *Verwertung von Elektronikschrott*, Erich Schmidt Verlag, 1993.



**Eindhoven University of Technology**  
**Graduate School of Industrial Engineering and Management Science**  
**Research Reports (EUT-Reports)**

The following EUT-Reports can be obtained by writing to:

Eindhoven University of Technology, Library of Industrial Engineering and Management Science, Postbox 513, 5600 MB Eindhoven, Netherlands.

The costs are HFL 5.00 per delivery plus HFL 15.00 per EUT-Report (unless indicated otherwise), to be prepaid by a Eurocheque, or a giro-payment-card, or a transfer to bank account number 52.82.11.781 of Eindhoven University of Technology with reference to "Bibl.Bdk", or in cash at the counter in the Faculty Library.

**20 LATEST EUT-REPORTS**

---

- EUT/BDK/71 Problemen en knelpunten bij gebruik van MRP in de praktijk : onderzoeksrapport **M.J. Euwe**
- EUT/BDK/70 De groothandel is dood. Leve de groothandel! : een branchegericht onderzoek naar de toekomst van de groothandel en de rol van informatie technologie  
**M. Coenjaerts, B.H.P.J. Vermeer**
- EUT/BDK/69 Methodologies for information systems investment evaluation at the proposal stage : a comparative review  
**Th.J.W. Renkema, E.W. Berghout**
- EUT/BDK/68 Software quality management : ISO 9000, but not only **K. Balla**
- EUT/BDK/67 Thematiek en methodologie in de organisatiekunde : een inhoudelijke verkenning over de periode 1986-1991 op basis van onderzoek van enkele Nederlandse tijdschriften  
**J.D. van der Bij, J.A. Keizer**
- EUT/BDK/66 Naar een tweede generatie total quality management  
**J.D. van der Bij, J.E. van Aken**
- EUT/BDK/65 Economische aspecten van informatietechnologie : de stand van zaken en de praktische relevantie **R.M.H. Deitz**
- EUT/BDK/64 The Socio-Technical Systems Design (STSD) Paradigm : a full bibliography of 3082 English-language literature references **f 60,00 !!**  
**F.M. van Eijnatten, S.J.C. Eggermont, G.T.A. de Goffau, I. Mankoe**
- EUT/BDK/63 Het Socio-Technisch Ontwerp Paradigma van Organisaties : een bibliografie van 1145 Nederlandstalige literatuurreferenties **f 40,00 !!**  
**F.M. van Eijnatten, S.J.C. Eggermont, G.T.A. de Goffau, I. Mankoe**
- EUT/BDK/62 De service-mix : uitgangspunt voor succesvol relatiemanagement  
**H.W.C. van der Hart, M.A.M. Wollaert, J.P.M. Wouters**
- EUT/BDK/61 Ondersteuning van professionals m.b.v. IT **M.W. 't Hart**
- EUT/BDK/60 Organisatievorm of basis van Groepentechnologie **H.H. van Mal**
- EUT/BDK/59 The Socio-Technical Systems Design (STSD) Paradigm: A Full Bibliography of 2685 English-Language Literature References  
**F.M. van Eijnatten**
- EUT/BDK/58 Verbalization rate as an index of cognitive load **J.A. Brinkman**
- EUT/BDK/57 Trends and tasks in control rooms **T.W. van der Schaaf**
- EUT/BDK/56 The system of manufacturing: A prospective study  
**J.C. Wortmann, J. Browne, P.J. Sackett**
- EUT/BDK/55 Rekenmodellen voor de grootschalige mestverwerking; gebaseerd op het MEMON-mestverwerkingsprocédé **Mat L.M. Stoop**
- EUT/BDK/54 Computer, manager, organisatie (deel I en II)  
**R. Cullen, H. Grünwald, J.C. Wortmann**
- EUT/BDK/53 Risico diagnose methode voor produktinnovatieprojecten; Een uitwerking toegesneden op de Industriegroep TV van Philips Glas te Eindhoven/Aken **J.I.M. Halman, J.A. Keizer**
- EUT/BDK/52 Methodological problems when determining verbal protocol accuracy empirically **J.A. Brinkman**



Eindhoven University of Technology  
Graduate School of Industrial Engineering and Management Science

P.O. Box 513  
5600 MB Eindhoven, The Netherlands  
Telephone 31-40-472873