

Herbert Scheller

*Automatisierte Demontagesysteme und
recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen*

Herbert Scheller

*Automatisierte Demontagesysteme und
recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen*

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 7. Februar 1997
Tag der Promotion: 28. Mai 1997
Dekan: Prof. Dr. Phil. Dr.-Ing. Habil H. Stoyan
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Scheller, Herbert:

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen / Herbert Scheller. Hrsg.
von Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1998
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 74)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1997
ISBN 3-87525-099-0 ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 1998
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg.

Herrn Professor Dr.–Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich herzlich für den Freiraum zur Durchführung dieser Arbeit, sowie die großzügige und vertrauensvolle Förderung.

Bei Herrn Professor Dr.–Ing. H. Meerkamm, Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik am Institut für Fertigungstechnik bedanke ich mich für die fruchtbare Zusammenarbeit, aus der wesentliche Beiträge zum zweiten Teil meiner Arbeit entstanden sind sowie auch für die wohlwollende Übernahme des Korreferats.

Bei Herrn Professor Dr.–Ing. Neese bedanke ich mich für seine Bemühungen bei der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Meinen herzlichen Dank möchte ich auch bei allen Kollegen des Lehrstuhls, im besonderen bei Dr.–Ing. Andreas Brand, Dr.–Ing. Manfred Gerhard, Dipl.–Ing. Ralf Luchs, Dipl.–Ing. Otto Meedt, Dipl.–Ing. Stefan Trautner und Dipl.–Ing (FH) Willi Weller, sowie bei den nicht namentlich erwähnten Kollegen und Ehemaligen aus der Gruppe Elektronikproduktion aussprechen. Ferner danke ich auch allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften die durch Ihre Unterstützung am Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt auch allen 'Recyclern' aus den verschiedenen Fachgebieten der Universität Erlangen/Nürnberg, die durch viele äußerst fruchtbare und interdisziplinäre Diskussionen ihren Teil zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt und besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir diese Ausbildung nicht nur ermöglicht haben, sondern mich dabei mit viel Geduld und Vertrauen nach besten Kräften unterstützt haben.

Mein ganz besonders herzlicher Dank gilt jedoch meiner Frau Kiki, sowie meinen Kindern Sophie Julie und Helene Marie, die durch ihre Freude und Geduld aber auch durch Mahnung und Ansporn diese Arbeit erst ermöglichten.

1.	Einleitung	1
2.	Analyse der Recyclingfähigkeit elektronischer Baugruppen	4
2.1	Klassifikation der Aufbautechniken und Materialien in der Elektronik	4
2.2	Abschätzung des Wertstoffgehalts und des Ressourcenpotentials	12
2.3	Abschätzung des Gefahrstoffpotentials elektronischer Schaltungen	14
2.4	Analyse des Wiederverwendungspotentials elektronischer Bauelemente	17
3.	Integration der automatisierten Demontage in das Entsorgungssystem elektronischer Baugruppen	18
3.1	Strukturierte Analyse relevanter Prozesse zum Elektronikrecycling	18
3.2	Methodische Bestimmung der Ressourceneffizienz von Prozessen zum Recycling elektronischer Baugruppen	25
3.3	Schwachstellenanalyse der Recyclingkette und Verbesserungspotentiale durch die Demontage elektronischer Schaltungsträger	26
3.4	Entwicklung von Konzepten zur automatisierten Demontage elektronischer Schaltungsträger	28
3.4.1	Anlagenkonzept zur Demontage wiederverwendbarer Bauelemente	29
3.4.2	Anlagenkonzept zur Gefahrstoffentfrachtung und Wertstofffraktionierung	30
3.4.3	Systemaufbau	31
4.	Analyse des Einflusses elektronischer Verbindungstechniken auf Demontageprozesse	33
4.1	Festlegung möglicher Demontageprozesse und deren Prozeßparameter	33
4.2	Rückbiegen von Bauelementepins bei der Entstückung von THD	35
4.3	Lösekräfte von kraft– (reib–)schlüssigen Verbindungen	37
4.4	Abscheren von Verbindungselementen	38
4.5	Lösen von stoffschlüssigen Verbindungen in Abhängigkeit von der Wärmeeinbringung	39
4.6	Gegenüberstellung der Demontagekräfte und Diskussion	46
4.7	Wärmeeinbringung zum Lösen von stoffschlüssigen Verbindungstechniken	47
5.	Systematische Entwicklung automatisierter Entstücksysteme und –prozesse	49
5.1	Entwicklung eines Systems zur selektiven Demontage elektronischer Flachbaugruppen	49

5.2	Verfahren zur simultanen Demontage elektronischer Bauelemente	55
5.3	Prozeß zur simultanen Demontage elektronischer Schaltungsträger mit Hilfe von Vibrationen	56
5.4	Entwicklung eines simultanen Entstückprozesses durch den Einsatz von Entstückbürsten	60
6.	Entwicklung von Werkzeugen zur prozeßintegrierten Klassifikation elektrischer Bauelemente im automatisierten Demontagesystem	65
6.1	Allgemeiner Aufbau von Klassifikationssystemen	65
6.2	Auswahl eines Sensorprinzips zur Klassifikation wiederverwendbarer Bauelemente	67
6.2.1	Entwicklung eines Konzepts zur Klassifikation selektiv zu demontierender elektrischer Bauelemente	68
6.2.2	Systematische Auswahl eines geometrieerfassenden optischen Meßverfahrens	69
6.2.3	Auswahl des Meßprinzips zur Informationsgewinnung über Leiterplatten	76
6.3	Konzeption und Realisierung eines Mustererkennungssystems zur Erzeugung von Entstückdatensätzen	77
6.3.1	Syntaktische Methoden zur Musteranalyse und Klassifikation	78
6.3.2	Definition und Systematik von Strukturgrammatiken	78
6.3.3	Entwicklung eines Parsers für Strukturgrammatiken	80
6.3.4	Parserstrategien und Attributverarbeitung	82
6.3.5	Implementierung des Parsers zur online Identifikation von ICs	86
6.4	Auswahl eines Sensorsystems zur automatisierten Identifikation elektrischer Bauelemente	89
6.4.1	Klassifizierung von Bauelementen in Materialfraktionen und Beschreibung der Sortiermerkmale	89
6.4.2	Auswahl des Meßprinzips zum Gewinnen geometrischer Bauteilmerkmale	91
6.4.3	Meßaufbau auf Basis von Lichtleiterquerschnittswandlern	94
6.5	Konzeption und Realisierung eines Identifikationssystems mit Hilfe Neuronaler Netze	96
6.5.1	Auswahl geeigneter Bauteilmerkmale zur numerischen Klassifikation	96
6.5.2	Aufbau Neuronaler Netze und Auswahl der geeigneten Topologie	100
6.5.3	Training des Neuronalen Netzes und Einbindung in eine prozeßintegrierte Analyseumgebung	103
7.	Entwicklung eines Regelwerks zur recyclinggerechten Gestaltung elektronischer Baugruppen	107
7.1	'Design for Recycling' als Voraussetzung zum effizienten und ökologischen Recycling komplexer Produkte	108

7.2	Regeln zur recyclinggerechten Gestaltung von Elektronikkomponenten	110
7.3	Anforderungen an ein System zur recyclinggerechten Produktgestaltung	114
7.4	Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Recyclinggerechtheit komplexer Produkte	116
7.5	Defizite rechnergestützter Systeme zur recyclinggerechten Produktbewertung elektronischer Baugruppen im Produktverbund	122
8.	Entwicklung eines Systems zur recyclinggerechten Produktbewertung . .	125
8.1	Recyclingbezogenes Datenmodell für elektronische Produkte	126
8.2	Definition des Recyclinggraphen zur strukturierten, recyclingorientierten Produktmodellierung	130
8.3	Formalisierung von Demontageprozessen	133
8.4	Auswahl einer geeigneten Methodik zum Erzeugen aller Demontage– kombinationen	135
8.5	Entwicklung einer Datenstruktur zur Recyclingprozeßanalyse	138
8.5.1	Ablaufstruktur zur Transformation eines Recyclinggraphen in einen AND/OR–Graphen	138
8.5.2	Abbildung aller Demontagepfade in einer Datenstruktur	139
8.6	Aufbau eines Datenmodells zur Abbildung von Recyclingprozessen	139
8.6.1	Systematische, rechnerverarbeitbare Beschreibung von Recyclingprozessen .	140
8.6.2	Erzeugen von Hypergraphstrukturen und Berücksichtigung von Recycling– prozessen	141
8.7	Programmierungsumgebung und Implementierung der DfR–Analysesoftware 'Recycling Graph Editor' (REGRED)	144
8.7.1	Recyclingorientierter Produkteditor REGRED	144
8.7.2	Modellierung von Recyclingprozessen im Prozeßsimulator	145
8.7.3	Durchführung eines Analyseablaufs mit REGRED und dem Prozeßsimulator . .	146
8.7.4	Recyclinggerechte Optimierung eines Beispielprodukts	147
9.	Zusammenfassung	149
10.	Literaturverzeichnis	152

1. Einleitung

Für die in den vergangenen Jahrzehnten erheblich beschleunigten Stoff- und Energie-durchsätze unseres Wirtschaftssystems stehen immer weniger Senken zur Verfügung. Ein Beispiel: Nach einer Studie des Umweltbundesamtes werden bis zum Jahre 2000 circa 75% des 1987 verfügbaren Hausmülldeponieraums verfüllt sein /163, 5/. In der Studie 'Zukunftsfähiges Deutschland' des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie werden zur Lösung des Konflikts zwei zentrale Leitgedanken vorgestellt /75/:

- Dematerialisierung: Die Material- und Energieflüsse, die Menschen der Natur entnehmen, müssen in den nächsten 10 Jahren um den Faktor 10 verringert werden.
- Industrielle Ökologie: Durch Aufbau einer Kreislaufwirtschaft muß die Integration des Wirtschaftssystems in den Rahmen der natürlichen Kreisläufe gelingen.

Die herkömmlichen Strukturen der Wirtschaft sind neu auszurichten. Der Umbau der Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft mit reduzierten Materialflüssen bringt erhebliche Chancen und Zukunftspotentiale mit sich, die von Warnecke in /168/ mit einer vierten industriellen Revolution verglichen werden (siehe auch /145/).

Kreislaufwirtschaft

Eine im industriellen Maßstab funktionierende Kreislaufwirtschaft beruht auf der consequenten Schließung der Materialkreisläufe die grundlegend in:

- Produktionsabfallrecycling,
- Produktrecycling,
- Materialrecycling und
- thermische Nutzung einzuteilen sind.

Bild 1 gibt die Stoffkreisläufe wieder und weist die entsprechenden Begriffe nach VDI 2243 /94/ zu. In der vertikalen Achse ist qualitativ der Wertzuwachs bzw. -verlust während eines Produktlebenszyklusses aufgezeigt. Die Grafik hebt den stetigen Wertverlust in den Stationen eines Produktlebens hervor und weist deutlich auf werterhaltende bzw. werterzeugende Kreisläufe (Produkt- und Materialrecycling) hin.

Durch das am 7. Oktober 1996 in Kraft getretene Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz; KrW-/AbfG; /108/) wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Aufbau von Stoffkreisläufen unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit, der Umweltverträglichkeit sowie ökonomischer Kriterien durch die Bundesregierung festgeschrieben. In Anbindung an das Kreislaufwirtschaftsgesetz wird der Bundesregierung ermöglicht, produktklassenspezifische Verordnungen zu verabschieden. Deren Aufgabe ist es, die Kreislaufwirtschaft im speziellen Produktbereich zu reglementieren. Mit den Entwürfen zu einer 'Verordnung über die Entsorgung von Geräten der Informations-

technik' ('IT-Geräte Verordnung') /111/ wird zum ersten mal auf die Belange der industriellen Kreisläufe elektronischer Produkte eingegangen.

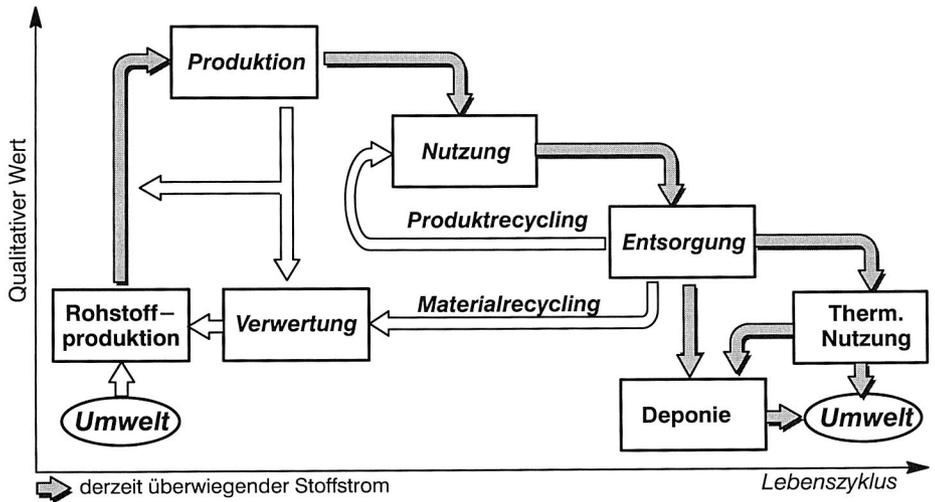


Bild 1: Stoffströme in der Kreislaufwirtschaft; nach /15/

Elektronik und Umwelt

Der zunehmende Einsatz elektronischer Baugruppen in modernen Produkten ermöglicht die Bereitstellung komplexer Funktionalitäten, die im Besonderen in umweltrelevanten Aufgabengebieten innovative Lösungsansätze bieten. Ein Beispiel: Die technischen Möglichkeiten moderner Kommunikationssysteme (z.B. E-mail, Telekonferenz) beeinflussen das Reiseverhalten der Menschen erheblich und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des durchschnittlichen Energieverbrauchs. Der ökologische Nutzen elektronischer Baugruppen ist unumstritten. Wissenschaftlich fundierte Aussagen zu deren Verhalten in industriellen Stoffkreisläufen sind hingegen nicht bekannt.

Ziel des ersten Abschnittes dieser Arbeit ist es, die Schwachstellen der Entsorgungssysteme elektronischer Baugruppen zu erkennen. Dazu wird der Stand der Technik im Recycling elektronischer Flachbaugruppen analysiert, deren ökologische und ökonomische Effizienz bewertet und das durch den Einsatz innovativer, automatisierter Demontagetechnologien ausschöpfbare Optimierungspotential bestimmt.

Auf der Basis eines zweistufigen Anlagenkonzepts zur vollständigen Entstückung elektronischer Flachbaugruppen werden technologische Lösungen zur selektiven und zur simultanen Demontage entwickelt. Dazu werden theoretische Prozeßanalysen durchgeführt, mechanische Demontageanlagen aufgebaut sowie problemorientierte Mustererkennungssysteme (Sensorauswahl, Klassifikationsmethodik, Softwareimplementierung) entwickelt.

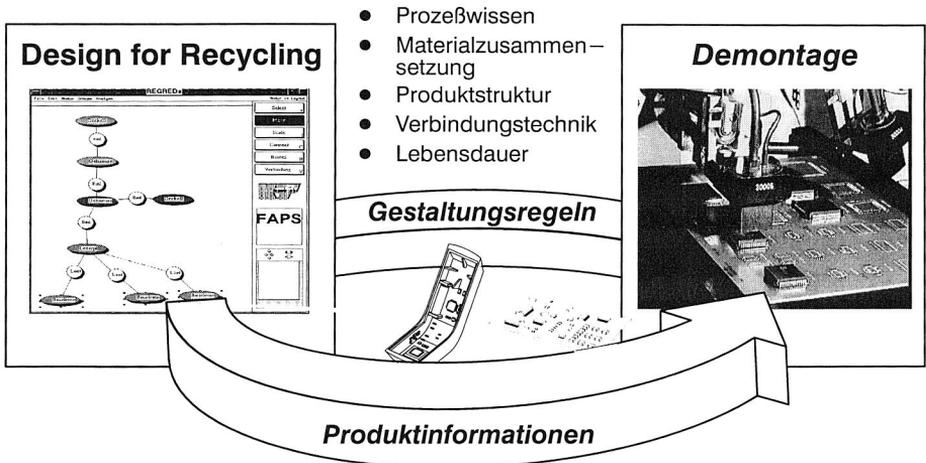


Bild 2: Abhängigkeiten zwischen Demontage und recyclinggerechter Produktgestaltung

Die Kreislauffähigkeit technischer Produkte bestimmt sich nicht nur durch die Leistungsfähigkeit von Recyclingverfahren sondern vor allem durch den konstruktiven Aufbau der zu recyclingenden Produkte. Wie Bild 2 darstellt, kann eine funktionierende Kreislaufwirtschaft nur unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Recyclingtechnik während der konstruktiven Ausgestaltung aufgebaut werden.

Am Beispiel der Flachbaugruppe wird ein Regelwerk zur recyclinggerechten Konstruktion vorgestellt. Die optimale Anwendung der zum Teil gegenläufigen Regeln bedarf eines Mechanismus zur Bewertung der Auswirkungen im späteren Recycling. Unter Einbeziehung wissenschaftlicher Vorarbeiten wird das Konzept einer Software zur rechnergestützten Bewertung der Recyclingprozeßfähigkeit elektronischer Produkte auf Basis ökonomischer und ökologischer Größen hergeleitet. Abschließend wird die Implementierung eines Prototypen vorgestellt und an einem Produktbeispiel exemplarische Analysen durchgeführt.

2. Analyse der Recyclingfähigkeit elektronischer Baugruppen

Inhalt der folgenden Kapitel ist es, den Zustand der bestehenden Kreislaufwirtschaft für elektronische Baugruppen zu prüfen und zu bewerten. Neben einem fundierten Prozeßwissen müssen dazu vorrangig die recyclingrelevanten Aspekte der betreffenden Bauteile herausgearbeitet werden. Im ersten Abschnitt des folgenden Kapitels werden daher die Aufbauvarianten elektronischer Schaltungen dargestellt und das Spektrum der eingesetzten Materialien in den verschiedenen Bauteilen zusammengestellt. Im Rahmen der Analyse bestehender Produktrecyclingkreisläufe werden ergänzend verwendungsrelevante Produkteigenschaften beschrieben. In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels werden die gewonnenen Kenntnisse über das Produkt zusammengeführt und in recyclingrelevante Kennwerte transformiert.

2.1 Klassifikation der Aufbautechniken und Materialien in der Elektronik

Der funktionale Verbund elektronischer Baugruppen setzt sich aus elektronischen Bauelementen, Schaltungsträgern und den Verbindungen zwischen Bauelement und den Leiterbahnen auf der Substratoberfläche zusammen. Im Recycling dieser Produkte sind vor allem Produktaufbau und Materialzusammensetzung sowie technologische Aspekte interessant, die im folgenden analysiert werden. Charakteristische Materialeigenschaften sowie Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse sind mehrfach in der Literatur beschrieben worden und sollen in diesem Zusammenhang unbeachtet bleiben (z.B.: /47, 7/).

2.1.1 Substrate und Aufbautechniken

Insbesondere der Schaltungsträger übernimmt in der funktionalen Einheit der elektronischen Baugruppe eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen. Im konventionellen Aufbau trägt er die Bauelemente, stellt deren elektrische Verbindungen zur Verfügung und stützt den gesamten Aufbau mechanisch ab. Das verwendete Material ist elektrisch isolierend, muß die während des Betriebs entstehende Wärme ableiten und darf sich während Gebrauch und Produktion nicht entzünden /148/.

Alternative Aufbautechniken definieren sich durch integrieren bzw. differenzieren von Funktionalitäten in bzw. aus dem Funktionsverbund der konventionellen Leiterplatte. Die MID-Technik (*Molded Interconnect Device*) orientiert sich an der konstruktiven Integration vieler/ aller Teilfunktionen eines elektronischen Produkts. Sie ermöglicht beispielsweise die Realisierung zusätzlicher Funktionen wie Buchsen, Stecker, Schalter, Abschirmung etc. im Schaltungsträger /34/.

Durch die Ausgliederung von Funktionen wie z.B. der mechanischen Abstützung aus dem klassischen Produktaufbau werden alternative Aufbautechniken ermöglicht. Die 'Folienleiterplatte' entspricht einer Differentialkonstruktion aus einem elektronischen (Folie) und einem mechanischen Element (z.B. Stahlblech) /67/. Dabei übernimmt der mechanische

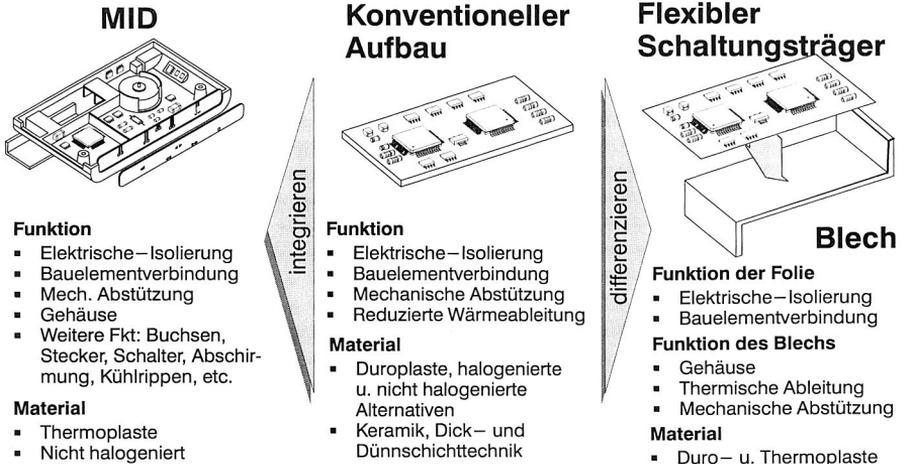


Bild 3: Alternative Aufbautechniken in der Elektronik

Aufbau Funktionen wie Wärmeableitung und Stabilisierung, die flexible Leiterplatte die Anordnung der Bauelemente und deren elektrische Verbindung. Im folgenden werden die stofflichen Zusammensetzungen der einzelnen Aufbautechniken beschrieben.

Konventioneller Leiterplattenaufbau

Die *konventionelle Leiterplatte* ist ein Schichtpreßstoff, der sich aus einem Trägermaterial (z.B. Glasfaser) und einem Duroplast (Epoxid– oder Phenolharz) zusammensetzt. Auf ihrer Oberfläche werden die Leiterzüge durch das Auflaminieren einer Kupferfolie und Ätzen der Struktur (Subtraktivtechnik) erzeugt. Die Leiterbahnen sind typischerweise zwischen 30 und 50 µm dick. In 90% der Einsatzfälle von Glasfaserverstärkung wird als Trägermaterial Glasseidengewebe verwendet, welches sich aus SiO_2 , Al_2O_3 , MgO und B_2O_3 zusammensetzt /114, 159/.

Kunststoffe lassen sich im allgemeinen bei relativ niedrigen Temperaturen in leicht entflammare gasförmige Fragmente zersetzen, die sich unter Sauerstoffzufuhr spontan oder durch Funken entzünden. Um dies z.B. während der Produktion oder im Schadensfall während des Gebrauchs zu vermeiden, stehen verschiedene flammgeschützende Additive zur Verfügung, die z.B. durch das Initiieren einer endothermen Reaktion einen raschen Temperaturverfall verursachen (Al_2O_3), also flammhemmend wirken /36/.

In den klassischen Leiterplattenharzen sind zumeist Halogene in verschiedener Konzentration als additiver (z.B. polybromierte Biphenylether) oder reaktiver Flammenschutz (z.B. Tetrabrombispfenol–A) zu finden. Sie ersetzen die den Verbrennungsprozeß tragenden Hydroxyl– und Wasserstoffradikale durch weniger reaktive Halogenradikale. Dies kann durch die Beimischung von Antimontrioxid (Sb_2O_3) in der Wirkung verstärkt werden. Ziel dieser Bemühung ist es, das Material so auszurüsten, daß Brennbarkeitsprüfungen nach Vorgaben z.B. der Underwriters Laboratories (UL–94) erfolgreich absolviert werden und somit die

gewünschte Flammschutzklasse (z.B. V–0, V–1, HB) bei einer definierten Schichtstärke (bei Leiterplatten <1,6 mm) erreicht wird /9, 95,/.

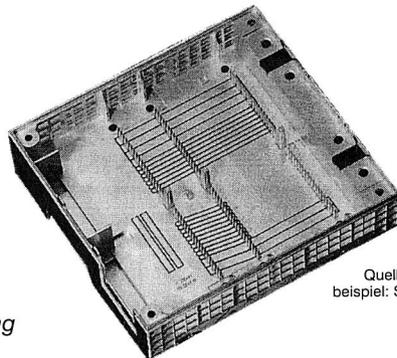
Halogenfreies FR4 und FRN:

In /115, 139, 166/ werden die Entwicklungsergebnisse auf Basis reaktiver Phosphorverbindungen flammgehemmter duroplastischer Leiterplatten beschrieben. Um eine UL V0–Einstufung zu erreichen, müssen ca. 3 % Phosphor in die Epoxidmatrix eingebaut werden. Der Selbstverlöschungseffekt wird erreicht, indem sich auf dem Polymer sehr schnell eine Kohlenstoffkruste bildet, die den weiteren Verbrennungsprozeß behindert. In Versuchen wurde auch die geringe Korrosivität der Verbrennungsgase sowie eine geringere Umweltbelastung gegenüber den halogenierten Materialien nachgewiesen.

Molded Interconnect Device, MID

Durch den integralen Ansatz der MID–Technologie wird es möglich, mechanische und elektrische Funktionen in einem Bauteil zu integrieren /142, 34, 23 – 26/.

- *Gehäuse*
- *Versteifungen*
- *Bauelementeträger*
- *Stecker, Verbinder*
- *Montagehilfen*
- *Leiterplatte*
- *Kabelsträngen*
- *elektromagnetischen Abschirmung*



Quelle Produktbeispiel: Siemens AG

Bild 4: Produktbeispiele auf Basis der MID–Technik und deren Hauptfunktionen; aus /34/

Dabei werden die Schaltungsträger aus temperaturbeständigen, thermoplastischen Kunststoffen gefertigt und damit dem Konstrukteur die Gestaltungsfreiheit der Spritzgießtechnik eröffnet. Es kann z.B. das *Gehäuse*, in dem das betrachtete Funktionsmodul zusammenfaßt wird, mit:

- *Versteifungen* zur mechanischen Stabilisierung der Baugruppe,
- *Montagehilfen*, wie Fügefasen, Schnappverbindungen etc. zur Befestigung von Bauteilen,
- der *Leiterplatte* zur Aufnahme der elektronischen Bauelemente und zu deren Verdrahtung,
- *Kabelsträngen* zur Verbindung räumlich getrennter elektronischer Funktionen,
- oder einer metallischen Oberflächenbeschichtung zur *elektromagnetischen Abschirmung*

verbunden werden. Für MID sind eine Vielzahl verschiedener Thermoplasten einsetzbar, die sich in ihren Eigenschaften und auch im Preis erheblich unterscheiden. Die Eignung eines Thermoplasten für eine spezielle Anwendung hängt nicht allein von den Materialeigenschaften

ten ab. Es sind auch spezifische Fertigungstechniken, deren Möglichkeiten und Grenzen in den Auswahlprozeß mit einzubeziehen. Unter anderem geeignet sind die Thermoplaste PS, ABS, PA66, PA6/T6, PEI, PSU oder LCP /26/. In Bild 4 ist ein Produktbeispiel und dessen integrierte Aufgabenbereiche dargestellt.

Folienleiterplatten

Kupferkaschierte Folienmaterialien finden breite Einsatzgebiete als flexible Leiterplatten, als Verbindungsleitungen, sowie im Bereich dichtgepackter Elektronik wie in Multi Chip Modulen oder Microsystemen. Als Folienmaterialien kommen zumeist schwer entflammbare, zum Teil verstärkte Materialien zum Einsatz, wie:

- *LCP-Folien* /96, 101/: Das Material ist ohne verstärkende Elemente sehr steif, wird aber auch mit Glasfaserfüllung geliefert.
- *BEND/flex* /102/: ist ein kupferkaschiertes Epoxid-Laminat, gefüllt mit anorganischem Material sowie einer Mischung aus Polyester und Glasfaser.
- *PI-Folien – Dycorate* /148/: Bei dieser Technik werden durch einen Plasma-Ätzprozeß Löcher in einer Polyimid-Folie erzeugt, die als Durchkontaktierungen im Multilayeraufbau dienen.
- *Simclad SIM-2* /95, 148/: Simclad basiert auf einem Aramid-Vlies, ist durch eine Phosphor-Stickstoff-Verbindung flammgeschützt und erreicht dadurch die UL 94 V-0 Klassifizierung.

Keramik

Keramische Werkstoffe finden vor allem in der Hybridtechnik Einsatz. Die Leiterbahnen werden entweder durch Sputtern (Dünnschichttechnik) oder Pastenauftrag (Dickschichttechnik) aufgebracht. Dabei können Widerstände und Kapazitäten in den Leiterstrukturen integriert werden. Als Werkstoffe werden zumeist Aluminiumoxid (Al_2O_3), Berylliumoxid (BeO) und Aluminiumnitrid (AlN) verwendet /116, 113, 119, 120/.

2.1.2 Verbindungstechniken – Lot-, Klebe- und Steckverbindungen

Zur elektronischen und mechanischen Verbindung von Bauelementen auf der Leiterplatte sind grundsätzlich die drei Verbindungstechniken Löten, Kleben, Stecken zu unterscheiden (Bild 5).

Die Pins konventionell bedrahteter Bauelemente – *Through Hole Device* (THD) – werden in entsprechende Bohrungen der Leiterplatte gesteckt und die mechanisch-elektrische Verbindung im Wellenlötverfahren unter Verwendung von naheeutektischen Zinn-Bleiloten (L-Sn60 Pb40 oder L-Sn63 Pb37 /134/) oder bleifreien Loten (mögliche Legierungselemente: Bi, In, Sn, Ag, Cu) hergestellt /12, 45/. Als Transportsicherung zwischen den Fertigungsanlagen in der Bauelementbestückung werden die durchgesteckten Anschlußbeinchen teilweise an der Unterseite der Leiterplatte umgebogen /47/.

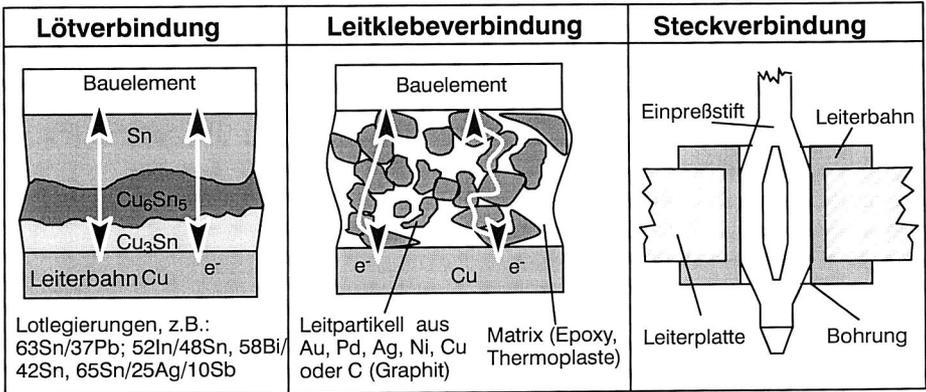


Bild 5: Übersicht über Aufbau und Materialien häufig eingesetzter elektrisch leitfähiger Verbindungstechniken in der Elektronik /12, 76, 128/

Oberflächenbestückbare Bauelemente – *Surface Mounted Device* (SMD) – verdrängen THD zunehmend. Begründet ist dies in der vereinfachten Fertigung, der erhöhten Packungsdichte der Bauelemente und der zweiseitigen Bestückbarkeit der Leiterplatte. Man unterscheidet die Fertigungsverfahren Reflow- und Wellenlöten. Im Reflowlötverfahren werden die Bauelemente in die im Sieb- oder Schablonendruck oder durch Dispensen aufgetragene Lotpaste bestückt und mittels Wärme mit den Kontaktflächen der Leiterplatte verlötet. Um SMDs auch im Wellenlötverfahren mit der Leiterplatte verbinden zu können, werden diese zuvor mit einem Kleber an der Platte fixiert und über Kopf durch die Lötwellen transportiert.

Die elektrisch-mechanische Verbindung kann auch mit Hilfe von *elektrisch leitenden Klebstoffen* hergestellt werden. Diese bestehen zumeist aus Epoxidklebstoffen (seltener Thermoplaste), welche mit plättchen- oder flockenförmigen Leitpigmenten aus Silber, Gold, Nickel, Kupfer oder Graphit mit durchschnittlichen Größen von 2–30µm gefüllt sind (Füllstoffanteile zwischen 70 und 80 Gew.-%; Bild 5) /39, 43, 154/.

Eine weitere Miniaturisierung der Elektronik wird durch die Montage von Nackchips – *Chip On Board* (COB) – ermöglicht. Neben 'Tab Automated Bonding' (TAB) und 'Flip Chip' (FC) wird vor allem die Technik des *Chip and Wire* (C&W) angewendet /40/. Der nackte Chip wird mit Hilfe eines Leitklebers auf dem Substrat befestigt ('die bonding'). Nach dem Aushärten werden sequentiell die Kontaktpaare auf Chip und Leiterplatte miteinander verbunden, indem ein dünner Gold- oder Aluminiumdraht gezogen und auf den Landeflächen verschweißt wird ('wire bonding'). Abschließend wird der einzelne, kontaktierte Chip mit einer Silikonmasse (Glob top) vergossen, die als Schutz gegen Umwelteinflüsse dienen soll /18/.

Steckverbindungen werden oft zur nachträglichen, vereinfachten Montage und Demontage von wärmeempfindlichen oder austauschbaren Bauelementen eingesetzt. Aus Gründen der Lötbarkeit, der Bauteilekosten und einer hohen Flexibilität werden oft auch Steckerleisten

in *Einpreßtechnik* auf der Leiterplatte befestigt. Es werden dabei entweder massive oder elastische Kontaktstifte benutzt, die in metallisierten Bohrungen der Leiterplatte eingedrückt werden (Bild 5) und dadurch den elektrischen Kontakt und die mechanische Stabilität gewährleisten.

Schlußart	Verbind.-element	Fügericht.	Fkt.	Häufigkeit	Randbed.	Einsatz	Anwendung
Kraft-schluß	Reibung		elektr. + mech.	+	Kraft, Fläche, Korrosion	Socket, Fassungen, Einpreßtechn.	Empfindliche BE (Co-, Prozessor, EPROMs, RAMs) Stecker
	Lot		elektr. + mech.	+++	Temperatur, Fläche, Lotwerkstoff, Biegewinkel	SMD, THD	BE für Durchsteckmontage
Form-schluß	Kleben		elektr. + mech.	+	Temperatur, Fläche, Lotwerkstoff, Klebstoff	SMD, COB in Komb. mit Löten v. SMDs	BE für Oberflächenmontage
	Pins, gebogen		mech.	++	Werkstoff, Geometrie, Biegewinkel	In Komb. mit Löten von THD	THD, z.B. Steckverbinder, Steckerleisten, ICs, Kondensatoren
	Schraube		mech.	+	Schraubenform, Ø, Zugänglichkeit, Anordnung, Sicherungselement	Aufnahme größerer Kräfte	Steckverbinder Steckerleisten Kühlkörper Stab. Leisten
Niete		mech.	+	Nietform, Durchmesser, Zugänglichkeit, Anordnung	Aufnahme großer Kräfte	Steckverbinder Steckerleisten Kühlkörper	

Tabelle 1: Analyse in der Elektronik eingesetzter Verbindungstechniken (BE = Bauelement)

Weitere Verbindungstechniken wie *Schrauben* oder *Nieten* dienen ausschließlich der mechanischen Sicherung von Steckverbindern, Schaltern, Kühlkörpern, Kunststoff- oder Metallblenden und einigen aktiven Bauelementen. Die Verbindungen können vor oder nach dem Löten hergestellt werden. Sie unterscheiden sich durch variierende Kopfformen, Längen und Durchmesser. Schrauben werden mit geeigneten Formelementen gesichert oder in der Lötwellen verlötet.

In Tabelle 1 sind die beschriebenen Verbindungstechniken zusammengefaßt, den Verbindungsschlußarten Kraft-, Stoff- und Formschluß zugeordnet und nach den Kriterien Verbindungselement, Fügerichtung, Funktion, Häufigkeit, ihren Randbedingungen und nach den Einsatzgebieten unterschieden. Die Tabelle ist Grundlage detaillierter Demontageprozessanalysen in Kap. 4.

2.1.3 Elektrische Bauelemente

Elektrische Bauelemente werden nach ihrer Funktion in aktive (Transistoren, Thyristoren, integrierte Schaltkreise etc.) und passive Bauelemente (Widerstand, Kondensatoren, Spulen,

Dioden) eingeteilt. Bislang wurden in den Datenblättern nur Informationen über geometrische, elektrische, funktionale und fertigungsbezogene Größen aufgeführt, die zum Aufbau einer funktionierenden Schaltung ausreichen. Durch die recyclingorientierte Produktanalyse gewinnen Materialaspekte zunehmend an Bedeutung, wobei die klassischen Produktdaten in den Hintergrund treten (Bild 6).

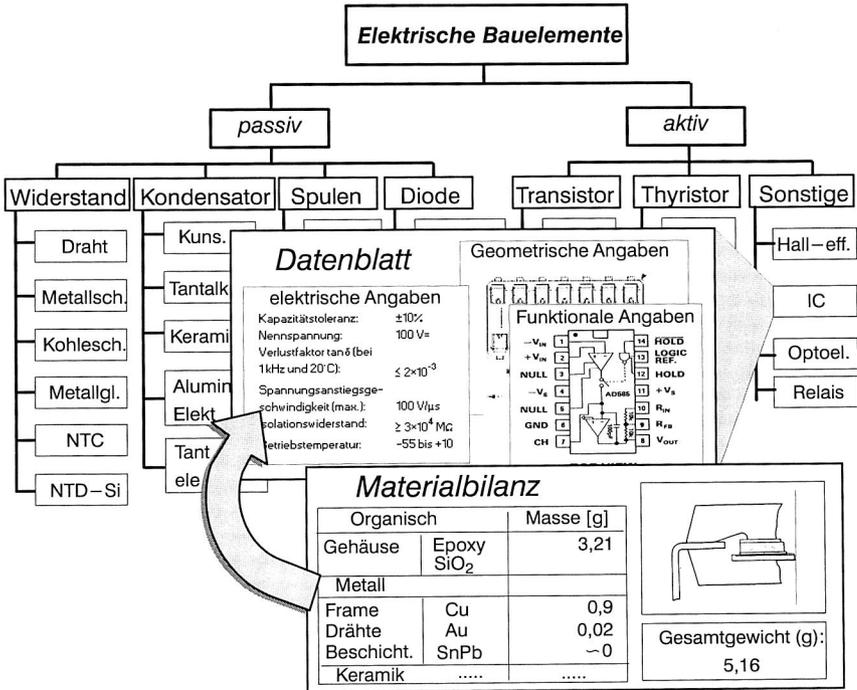


Bild 6: Materialdaten als Erweiterung von Datenblättern elektronischer Bauelemente

Informationen über Inhaltstoffe von Bauelementen sind schwer zu beschaffen. Die Hersteller sind auf diesem Gebiet sehr zurückhaltend. Erst seit kurzem wird an verschiedenen Instituten weltweit versucht, durch analytische Arbeit diese Wissenslücken zu schließen. Ziel dieser Arbeiten ist es, bauteilspezifische Materialbilanzen zur Verfügung zu stellen, die für detaillierte Analysen genutzt werden können.

	<i>El.</i>	<i>Verb.</i>	Anwendung		<i>El.</i>	<i>Verb.</i>	Anwendung
1	<i>Ag</i>		Oberfl.veredelung v. Drähten, Leiterbahnen, Kontakten, Kondensatorbelägen	2	<i>Ag</i>	<i>AgC,</i> <i>AgNi,</i> <i>AgWC</i>	Kontakte
3	<i>Al</i>		Ummantelungen, Elektrodenmat., Drähte, Kondensatoren, R, MOS–Tech.	4	<i>Al</i>	<i>Al₂O₃</i>	Fassungen, Substratmat., Isolierung, Laser, Füllstoff, Elektrolytkondensator
5	<i>As</i>	<i>GaAs</i>	Halbleiter	6	<i>Au</i>		Kontakte, Feinstdrähte, Korrosionsschutz, Sensoren
7	<i>Au</i>	<i>AuNi,</i> <i>AuPd</i>	Kontaktwerkstoffe	8	<i>Be</i>	<i>BeO</i>	Isolierteile, Kühlkörper, Wärmeleitpasten
9	<i>Cd</i>		Schalterkont., Stabilistor u. Farbstoff (rot, gelb) in Kunststoffen, Ni–Cd–Akku	10	<i>Cu</i>		Kontakte, Leiterbahnen, Oberflächenbeschichtung, Widerstand
11	<i>Cu</i>	<i>CuBe,</i> <i>CuCd,</i> <i>CuCr</i>	Kontakte, Kühlkörper, Buchsen, Stecker, Bürsten, Federelemente	12	<i>Fe</i>		Kontakte, Stifte, Gehäuse, Fassungen, Ni–Fe–Akku
13	<i>Fe</i>	<i>FeNi</i>	Bimetall, Manteldrähte	14	<i>Hg</i>		Kippschalter, Gleichrichterdiolen, Relais
15	<i>Ni</i>		Leiter, Relais, Crimp– Lötanschlüsse, Oberflächenveredelung, Ni–XX–Akku	16		<i>NiBe</i>	Kontakte
17	<i>Pb</i>		Lot, Kabelmäntel, Anoden, Additive in Kunststoffen, Glas, Kondensat.	18	<i>Pd</i>		Oberfl.veredelung, Kontakte, Schottkydiode, Dickschichttechn.
19	<i>Pd</i>	<i>PdAg,</i> <i>PdCu</i>	Kontakte	20	<i>Pt</i>		Thermodrähte, Widerstandsdrähte, Oberflächenveredelung
21	<i>Pt</i>	<i>PtIr,</i> <i>PtNi</i>	Kontakte	22	<i>Si</i>		Halbleiter, Dioden, MOS–Technik
23	<i>Si</i>	<i>SiO₂</i>	Quarze, Gläser, Füller	24	<i>Sn</i>		Kontaktmat., Stab. in PVC, Korrosionsschutz, Pigment
25	<i>Sr</i>	<i>SrTiO₃</i>	Dielektrikum	26	<i>Ta</i>		Anode und Dielektrikum b. Ta–Kondensatoren
27	<i>Ti</i>	<i>TiO₂</i>	Dielektrikum, Substratmat., Häusung, Dickschicht	28	<i>Zn</i>		Oberfl.veredelung, Kathoden, Elektrode, LED.

Tabelle 2: Beispiele für Materialien in Bauelementen /159, 147/

Am dänischen Institut DELTA Electronics sind detaillierte Materialbeschreibungen von ca. 100 Bauelementen erarbeitet worden /171/. Am Institut für Anorganische und Analytische Chemie der Friedrich Alexander Universität Erlangen–Nürnberg wurde die Datenbank 'COMA' aufgebaut, die bis heute ebenfalls annähernd 100 Datensätze beinhaltet /13/.

Um im Rahmen dieser Arbeit einen Überblick über häufig eingesetzte Materialien zu geben, wurden diese in Tabelle 2 zusammengefaßt und ihre Anwendungen im Produkt aufgezeigt. Detaillierte Informationen über Bauelemente können den genannten Datenbanken und der Literatur /147/ entnommen werden.

2.2 Abschätzung des Wertstoffgehalts und des Ressourcenpotentials

Zur Bewertung von Recyclingsystemen, wie sie in Kap. 3 durchgeführt wird, sind zunächst die relevanten Kenngrößen festzulegen. Als materialbezogene Größen bieten sich neben Masse und Volumen vor allem der Materialwert und die Verfügbarkeit der Ressourcen an.

Materialwert

Zu dessen Bestimmung ist die gesamte Schaltung unter Nutzung der erwähnten Datenbanken in einer vollständigen massenbezogenen Materialbilanz zu beschreiben, wobei die chemischen Elemente und deren Verbindungen die Bilanzgrößen darstellen. Die Massenangaben der einzelnen Stoffe werden mit den aktuellen Rohstoffwerten multipliziert. Die dazu benötigten Marktpreise lassen sich aus aktuellen Börsenberichten und durch Anfragen bei Rohstoffherstellern zusammenstellen. Die Ergebnisse der Multiplikationen können in einer Tabelle zusammengefaßt und in Diagrammen dargestellt werden (Tabelle 3, Bild 7). Das erstellte Profil des Materialwerts ermöglicht eine marktorientierte Priorisierung der vorrangig zu verwertenden Rohstoffe und einer entsprechenden Ausrichtung der Recyclingtechnologien.

Ressourcenwiedergewinnungspotential (Resource Recovery Potential: RRP)

Im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung technischer Produkte ist es sinnvoll, eine langfristige Abschätzung des Materialwerts durchzuführen. In diesen Zusammenhang wurde der von J.B. Legarth vorgeschlagene Kennwert 'Resource Recovery Potential' (RRP) aufgegriffen /70, 141/. Das RRP setzt sich aus zwei multiplikativ verknüpften Quotienten zusammen.

$$RRP = \sum_i \frac{F_i}{P_i} \times \frac{C_i}{R_i} \sim \sum_i \frac{F_i}{R_i} \quad \text{mit: } F: \text{ Menge der Ressource in einer Tonne Schrott}$$

P: Jährliche Produktion an Grundressourcen
C: Jährlicher Verbrauch an Grundressourcen
R: Weltvorrat der Ressource
i: Zählindex für die Ressource

Im ersten Teil der Formel wird die Menge der zu recycelnden Ressource, die hier einem Stoff aus der Leiterplatte entspricht, ins Verhältnis zur Menge der jährlichen Produktion des entsprechenden Rohstoffs gesetzt. Falls die Recyclingquote gleich der jährlichen Produktion ist, würde sich als Berechnungsergebnis 'eins' ergeben. In der Regel wird dies nie erreicht und erfordert somit das Zuführen neuer Ressourcen in den Materialkreislauf. Der zweite Quotient quantifiziert den Zeitraum der Verfügbarkeit einer Ressource und bringt implizit den Stellenwert der Ressourceneinsparung zum Ausdruck. Dazu wird der jährliche Ressourcenverbrauch mit der globalen Reserve der Ressource ins Verhältnis gesetzt /70, 68, 170/.

Ausgangspunkt der Bestimmung der RRP's eines Produkts ist die Materialbilanz. Die Größen der Massenbilanz werden mit den entsprechenden RRP's gewichtet und tabellarisch zusammengefaßt (Tabelle 3).

Produktbeispiel:

In Tabelle 3 ist die Materialzusammensetzung einer Leiterplatte aufgelistet. Statt ein exemplarisches Produkt auszuwählen, wurde aus verschiedenen Literaturangaben ein komplexes Leiterplattenmaterialgemisch zusammengestellt.

i	El.	Masse [Gew. %]	Wert [\$] pro 1 kg	Wert [\$] pro 1 to	Vorräte [1000 to]	10 ¹⁰ xRRP _i
1	Al	2,8000	1,75	49,0	3,572,000	0.08
2	Cu	14,3000	2,62	374,7	321,000	4.45
3	Fe	4,5000	0,58	26,1	64,648,000	0.01
4	Ni	1,1000	7,29	80,2	48,988	2.25
5	Pb	2,2000	0,87	19,1	70,000	3.14
6	Sn	2,0000	5,83	116,6	5,920	33.8
7	Zn	0,4000	1,17	4,7	144,000	0.28
8	Ag	00639	155,45	93,3	280	22.8
9	Au	0,0566	11.377,74	5688,9	68	83.2
10	Pd	0.0124	5.045,72	625,7	27.2	45.7
11	Ta	0.0192	49,87	9,6	20.5	93.6
12	Sb	0.4500	5,54	24,9	4,500	10.0
13	Co	0.0083	51,04	4,1	4,000	0.20
14	Mo	0.0155	7,6	1,2	7,750	0.20
15	Cd	0.0395	4,08	1,6	535	7.38
16	Be	0.0089	11,70	1,0	200	4.45
17	Hg	0.0009	2,62	0,1	128	0.70
18	Pt	0.0037	13.066,37	483,5	30.5	12.2
19	Ge	0,0016	2.712,44	43,4	–	–
20	Ga	0,0013	2.624,94	34,1	–	–
21	Cr	0,16	7,30	11,7	–	–
22	In	0,0016	875,00	14,0	–	–
23	Ru	0,0016	437,50	7,0	–	–
24	Glasfasern	49,00	3,30	1617,0	∞	0
25	Br	4,00	–	–	–	–
26	Epoxy Füller	19,00	0,50	95,0	∞	0
Summe		100 %		9426,5 \$		324

Tabelle 3: Bestimmung des Materialwertes und des Resource Recover Potentials am Beispielprodukt /70, 68, 170/

Ziel war es, anhand eines für breite Anwendungsbereiche repräsentativen Produkts die beschriebenen Kennzahlen zu bestimmen. In Tabelle 3 sind die Rohstoffpreise eingetragen, dazu die vorhandenen Ressourcenvorräte der meisten Elemente. Zur Berechnung des RRP wurde zu Grunde gelegt, daß der jährliche Ressourcenverbrauch ungefähr gleich zum

Primärverbrauch ist, womit sich die beiden Größen aus der Gleichung herauskürzen. Das RRP berechnet sich dann als Verhältnis zwischen dem eingesetzten Material und der Weltressourcenreserve. Aus den Zahlen wurden der Materialwert sowie das RRP der einzelnen Elemente bestimmt und in die Tabelle aufgenommen

Nach Tab. 3 berechnet sich der Materialwert einer Tonne Leiterplattenschrott zu 9426,5 US\$. Das RRP der gesamten Leiterplatte bestimmt sich als 324 und gibt damit einen deutlichen Hinweis auf knappe Ressourcen. Die Hauptanteilsträger am Gesamtmaterialwert sowie am RRP sind in Bild 7 aufgetragen.

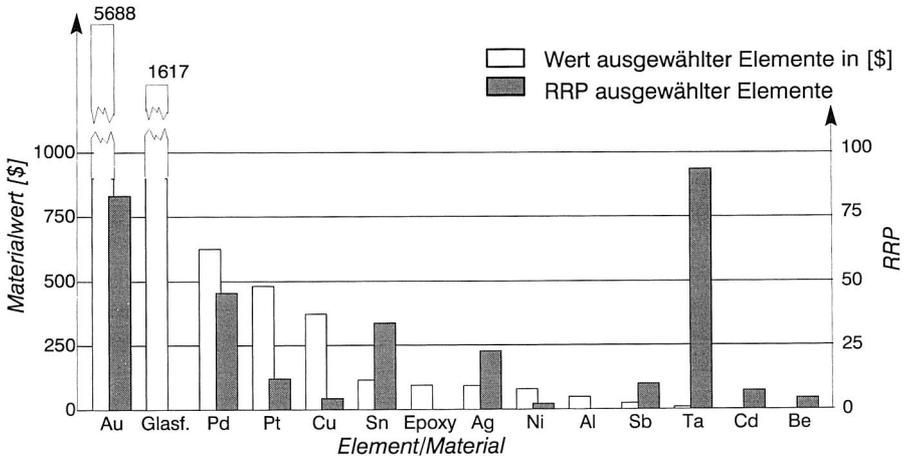


Bild 7: Wert und RRP einiger ausgewählter Elemente der Beispielleiterplatte

Wie zu erwarten erbringt der Goldanteil 60% des Gesamtwerts, wobei das Glasfasermaterial (es wurde der Wert gebrochener BMC–Glasfasern gewählt /143/) mit 17% den zweiten Platz einnimmt. Neben Platin und Palladium ist auch Kupfer, Zinn, Silber und Aluminium wegen der großen Mengenanteile hervorzuheben. Das RRP als Kennzahl der Ressourcenknappheit stellt hingegen Tantal vor die Gruppe der Edelmetalle (Au, Pd, Ag, Pt) und unterstreicht den potentiellen Mangel an Zinn.

Am Berechnungsbeispiel wird deutlich, daß neben den Edelmetallen sinnvollerweise auch Stoffe wie Tantal, Aluminium, Kupfer, Zinn, Cadmium oder Beryllium sowie die Glasfasern aus dem Elektronikschrott wiederzugewinnen und in den Kreislauf zurückzuführen sind.

2.3 Abschätzung des Gefahrstoffpotentials elektronischer Schaltungen

Schadstoffe werden in /147/ als diejenigen Stoffe definiert, die schädigend auf den Menschen und auf die Umwelt wirken. Ihr toxisches Potential hängt von einer Vielzahl von Faktoren wie, z.B. von der Dosis, der qualitativen Wirkung, der Dauer der Exposition, der Anreicherungsfähigkeit des Stoffes, der Einwirkungsform und –ort sowie der Beschaffenheit des Rezipienten ab und ist deshalb zu differenzieren /147/. Das Spektrum variiert zwischen

gesundheitszerstörend bis heilend, wie die Grafik in Bild 8 an den Beispielen Kupfer, Zink, Cadmium und Blei aufzeigt .

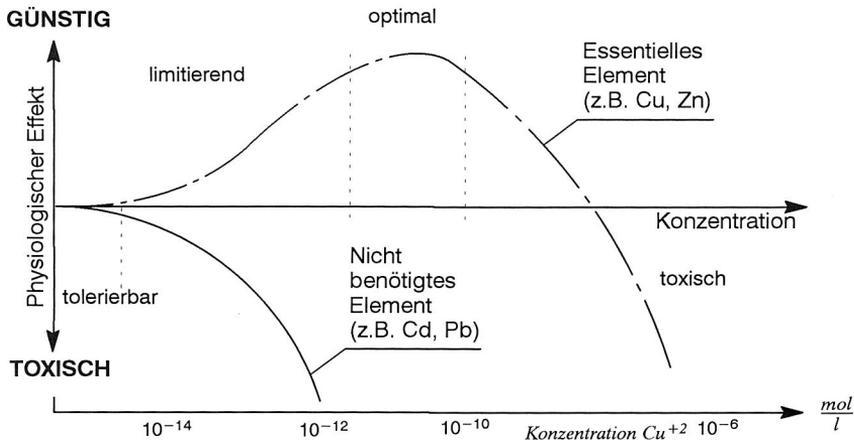


Bild 8: Wirkungskurven der Metalle Cu, Zn, Cd, Pb [147]

Die toxischen Eigenschaften elektronischer Bauelemente werden von Experten seit langem diskutiert. Probleme wie cadmiumhaltige Kontakte an Schaltern, PCB in Kondensatoren oder auch Blei in Zinn-Bleiloten sind allgemein bekannt, technische Lösungen sind realisiert bzw. in Vorbereitung. Eine vollständige wissenschaftliche Analyse des Materialgemisches 'Elektronik' auf dessen toxische Eigenschaften ist jedoch nur in Ansätzen vorhanden [147].

Um im Rahmen dieser Arbeit das toxikologische Potential von Stoffen zu bestimmen, sollen verschiedene gesetzliche Vorschriften herangezogen werden.

Gefährliche Abfälle nach den EU Richtlinien 94/904/EG und 91/689/EWG sowie der Gefahrstoffverordnung [124–126]

Gefährliche Abfälle im Sinne des Art.1 Abs. 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle weisen eines oder mehrere der Gefahrenmerkmale H1 – H14 im Anhang III dieser Richtlinie auf. Die verbale Beschreibung der Eigenschaften H1 – H14 ist dabei identisch mit der Gefahrenbezeichnung nach der deutschen Gefahrstoffverordnung (GefStoffV). In der nationalen Verordnung werden den Gefahrenmerkmalen wie z.B. "gesundheitsschädlich" (H5 nach der EU-Richtlinie) oder "giftig" (H6 nach der EU-Richtlinie) sog. Gefahrensymbole (z.B. "T", "T+") sowie R-Sätze zugeordnet. Die R-Sätze beschreiben dabei die spezifischen Gefahren, die von einem Stoff bzw. Stoffgemisch ausgehen, so z.B. der Satz R23: "Giftig beim Einatmen". Sowohl die Vergabe der Gefahrensymbole als auch die Bezeichnung von Stoffen mit R-Sätzen nach nationalem Gefahrstoffrecht ist dabei auf physikalische (z.B. Flammpunkt)

oder toxikologische Kennwerte (z.B. LC₅₀) bezogen. Die verbindliche Bezeichnung aller handelsüblichen Stoffe sind in sog. Sicherheitsdatenblättern enthalten, die u.a. von den Herstellern für den Umgang und Gebrauch der Stoffe zu erstellen sind. Für Beryllium ist dem entsprechenden Datenblatt beispielsweise die Zuordnung des Gefahrensymbols T+ (sehr giftig, also Klasse H6) und der R-Sätze R49, R25K, R26K, R36/37/38, R4 zu entnehmen.

Um die Heterogenität des Abfalls zu berücksichtigen und eine leichtere Einstufung von Stoffgemischen zu ermöglichen, sind in der Entscheidung des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle 94/904/EG Grenzkonzentrationen für den Gehalt an gefährlichen Stoffen gemäß der Richtlinie 91/689/EWG bzw. der GefStoffV angegeben, ab denen ein Stoffgemisch als "gefährlicher Abfall" klassifiziert wird. Beispiel: Ein Abfall ist dann als "Sondermüll" zu bezeichnen, wenn er z.B. mindestens 0,1% Beryllium als einzigen "sehr giftigen" Stoff enthält.

Hazardous Waste Designation Decree, Bulletin of Acts, Orders Decrees of the Kingdom of the Netherlands 617, 1993 /99/

In Anhang II, Nr.4 dieser Verordnung werden Stoffe und Stoffgemische nach den maximal zulässigen Konzentrationen (ppm) in die Gefahrstoffklassen A, B, C und D eingeteilt. In Tabelle 4 sind die jeweils ersten 10 Materialien der vier Klassen aufgelistet. In Anhang II, Nr. 2 der Verordnung sind weitere Angaben zu finden, wie die Konzentrationen im Stoffgemisch im einzelnen zu bestimmen sind.

Nr	A [50 mg/kg]	B [5.000 mg/kg]	C [20.000 mg/kg]	D [50.000 mg/kg]
1	Sb u. Verbindungen	Cr(III)–Verbindungen	Ammoniak u. Verbind.	Schwefel
2	As u. Verbindungen	Co–Verbindungen	Anorg. Peroxide	Anorg. Säuren
3	Be u. Verbindungen	Cu–Verbindungen	Ba–Verbindungen ohne BaS ₃	Metallbisulphate
4	Cd u. Verbindungen	Pb u. Verbindungen	F–Verbindungen	Oxide u. Hydroxide mit Ausnahmen
5	Cr(VI)–Verbindungen	Mo–Verbindungen	P–Verbindungen mit Ausnahmen	Aliphatische Hydro- kohlenst.
6	Hg u. Verbindungen	Ni–Verbindungen	Bromate	Org. Sauerstoffverb.
7	Se u. Verbindungen	Zn–Verbindungen	Chlorate	Org. Stickstoffverb.
8	Te u. Verbindungen	V–Verbindungen	Aromatische Verbind.	Nitride
9	Tl u. Verbindungen	W–Verbindungen	Org. Si–Verbindung	Hytride
10	Zyanide	Ag–Verbindungen	Org. S–Verbindung	
 A20 B31 C17	

Tabelle 4: Auszug aus der niederländischen Verordnung 'Hazardous Waste Designation Decree' /99/

2.4 Analyse des Wiederverwendungspotentials elektronischer Bauelemente

Wiederverwendbare elektronische Bauelemente sind in der Regel technologisch hochwertige Produkte, deren Neupreis im gehobenen Preisspektrum zu finden ist. Sie müssen standardisierte Schnittstellen aufweisen und allgemein gebräuchliche Funktionen besitzen. Um technologisch nicht zu veralten, dürfen sie eine produktabhängige, im allgemeinen eher kurze Zeitspanne (circa 1–3 Jahre) nicht überschreiten /64/.

In Analysen des Bauteilangebots eines repräsentativen Hersteller wurde die folgenden Produktklassen als gut wiedervermarktbar herausgearbeitet /85/:

- Prozessoren
- EPROMs
- Stecker
- Sockel
- Controller
- SIM & SIP Speicher
- Schalter
- Leisten
- Static & Dynamic RAMs
- TTL-ICs
- Relais
- Quarze

Wie die in Bild 9 dargestellte Umsatzverteilung einer auf Leiterplattenrecycling spezialisierten Firma /60, 97/ zeigt, werden die hauptsächlichen Gewinne durch die Vermarktung eines sehr begrenzten Bauteilspektrums erwirtschaftet. Außerdem ist festzustellen, daß nur maximal ein Drittel der gesamten Umsätze aus dem Erlös des stofflichen Recyclings erwirtschaftet wurde.

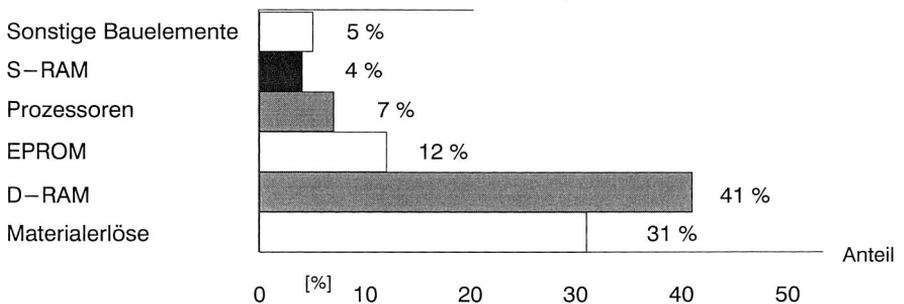


Bild 9: Umsatzverteilung eines Leiterplattenrecyclingbetriebs (1991/1993), nach /85/

Es wird klar, daß die Motivation im Elektronikrecycling nicht allein die Gefahrstoffentfrachtung und Wertstoffgewinnung sein sollte, sondern daß vor allem die ökonomisch interessante und ökologisch vorteilhafte Wiederverwendung von Komponenten mit einzubeziehen ist.

3. Integration der automatisierten Demontage in das Entsorgungssystem elektronischer Baugruppen

Wie in dem vorhergehenden Kapitel deutlich wurde, gilt die elektronische Baugruppe als wichtiger Wertstofflieferant, bietet ein erhebliches Potential zur Wiederverwendung von Bauteilen und beinhaltet andererseits ein erhebliches Gefahrstoffpotential. Die daraus ableitbaren Anforderungen an die Leiterplattenentsorgung sind differenziert. Um ihnen gerecht zu werden, sind eine Reihe leistungsfähiger Recyclingprozesse zu entwickeln, durch deren spezifische Ausrichtungen die verschiedenen Problemkreise gelöst werden sollen. Tatsächlich stehen zum Elektronikrecycling vielerlei Prozesse zur Verfügung, wobei es deren hauptsächliches Ziel ist, den wertstofflichen Anteil edler Metalle zu extrahieren.

Im folgenden soll der Stand der Technik im 'Elektronikschrottreycling' umrissen, die Leistungsfähigkeit der Prozesse bewertet und deren spezielle Ausrichtung bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Verwendung, Verwertung und Gefahrstoffentfrachtung soll daraus eine optimierte Recyclingprozesskette entwickelt werden. Auf dieser Basis wird der Bedarf nach Demontageverfahren festgestellt und geeignete Konzepte entwickelt.

3.1 Strukturierte Analyse relevanter Prozesse zum Elektronikrecycling

Im Recyclingsystem elektronischer Baugruppen stehen eine Vielzahl verschiedener Prozesse zur Verfügung, die fast ausschließlich aus der Bergbautechnik (mechanische Verfahren) und der metallherzeugenden Industrie (z.B. Kupferhütte) abgeleitet sind.

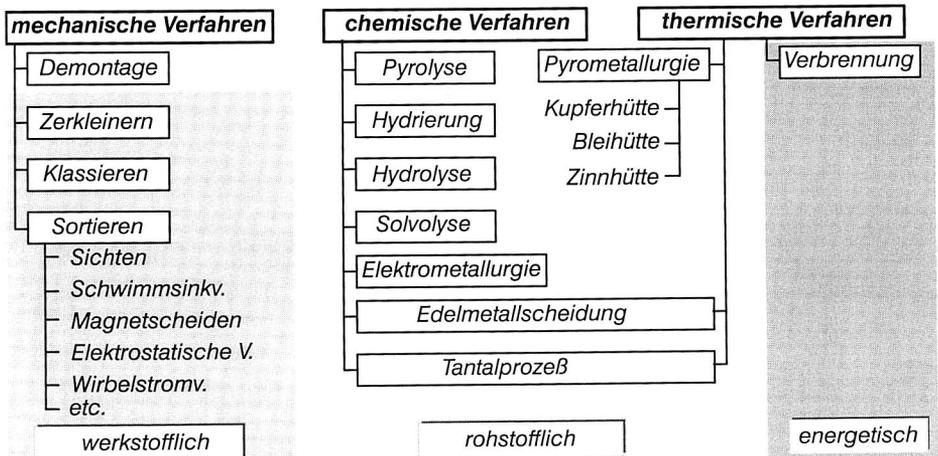


Bild 10: Übersicht und Einordnung der Verfahren im Recyclingsystem elektronischer Baugruppen; aus [5, 74, 137]

Wie ihre einsatzbezogene Herkunft verdeutlicht, ist es das vorrangige Ziel, große Massenströme zu verarbeiten und die darin befindlichen metallischen Ressourcen einer Verwertung

zuzuführen. Die im Leiterplattenrecycling eingesetzten Verfahren sind in Bild 10 in die Klassen mechanische Verfahren mit dem Ziel des werkstofflichen Recyclings, in chemische Verfahren mit dem Ziel des rohstofflichen Recyclings sowie in thermische Verfahren unter der Nutzung des Energieinhalts aufgeteilt. Die Demontage bekleidet wegen der fertigungstechnischen Ausrichtung eine Sonderrolle /137/.

Zur Schwachstellenanalyse im Stand der Technik des Recyclingsystems sollen im folgenden einige zentrale Prozesse detailliert beschrieben werden. Neben dem rein technologischen Wissen soll, um eine werkstoffbezogene Bewertung der Leistungsfähigkeit zu ermöglichen, auch die Effizienz der Prozesse abgeschätzt werden.

3.1.1 Mechanische Aufbereitung

Mechanische Verfahren dienen der Volumenreduzierung, der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche der Materialien, der Auftrennung von Materialverbänden sowie der Sortierung und gegebenenfalls Klassierung der Materialien. In den meisten Prozessen werden mehrere mechanische Verfahren in Kombination eingesetzt /3/.

- Beim *Zerkleinern* werden je nach Anforderung für die Weiterverarbeitung Materialverbände aufgetrennt und Schrotte auf unterschiedliche Korngrößen gebracht. Für diese Verfahrensstufe stehen Schredder, Hammermühlen, Schneidmühlen und Granulatoren zur Verfügung. Bei Schredder und Hammermühlen wird das Aufgabegut infolge von Schlag-, Biege- und Torsionsbeanspruchung zerkleinert. Bei Schneidmühlen und Granulatoren erfolgt die Zerkleinerung durch Schneiden, Reißen und Brechen /3/.
- *Sortieren* und *Klassieren* kann sowohl auf trocken- als auch auf naß-mechanische Weise geschehen. Unter Sortieren versteht man das Trennen eines Partikelgemisches in unterschiedliche Stofffraktionen (z.B. Windsichter, Schwimmsinkanlage, Aero-Zyklone). Als Klassieren bezeichnet man die Trennung von Stoffen in mindestens zwei Größenklassen (z.B. Siebe) /137/.
- Bei der *Trennung* von Metallen und Nichtmetallen werden deren stoffspezifische *magnetische und elektrische Eigenschaften* genutzt. Dazu stehen verschiedene ferromagnetische Verfahren, die Wirbelstromabscheidung, das Hochgradienten-Magnetscheiden (HGMS) und elektrostatische Verfahren zur Verfügung /137/.

Firma	Stoffklasse	Produktion Forschung
NEC, Kawasaki J	Entstückte Leiterplatte	P/F
Fuba, Gittelde D	Entstückte Leiterplatte	P
Daimler Benz, Ulm D	Bestückte Leiterplatte	F
Noell Abfall- und Energietechnik, Würzburg D	Bestückte Leiterplatte	P
Interrecycling, Züssnacht Ch	Bestückte Leiterplatte	P
Grahler, Goslar D	Bestückte Leiterplatte	P

Tabelle 5: Liste der Anlagen zur mechanischen Fraktionierung von Leiterplatten

Zum mechanischen Fraktionieren der Leiterplatten werden unterschiedliche Verfahrensketten, die sich vor allem in der Staffelung der einzelnen Mahl-, Sortier- und Klassierstufen unterscheiden, eingesetzt. In Tab. 5 sind einige Anlagen, deren Stand der industriellen Einführung und deren Einsatzgebiete aufgeführt.

Zur exemplarischen Erläuterung einer mechanischen Fraktionierung von Leiterplatten wird das Verfahren von NEC ausgewählt. Es werden unbestückte Leiterplatten verarbeitet und in die Materialien Kupfer, Glasfasern und Harz fraktioniert.

Verfahren von NEC /52/

Der unbestückte Leiterplattenschrott wird im ersten Prozessschritt durch Schneid- und Scherkräfte zerkleinert. Das Material wird dann einer Feinzerkleinerung zugeführt, welche

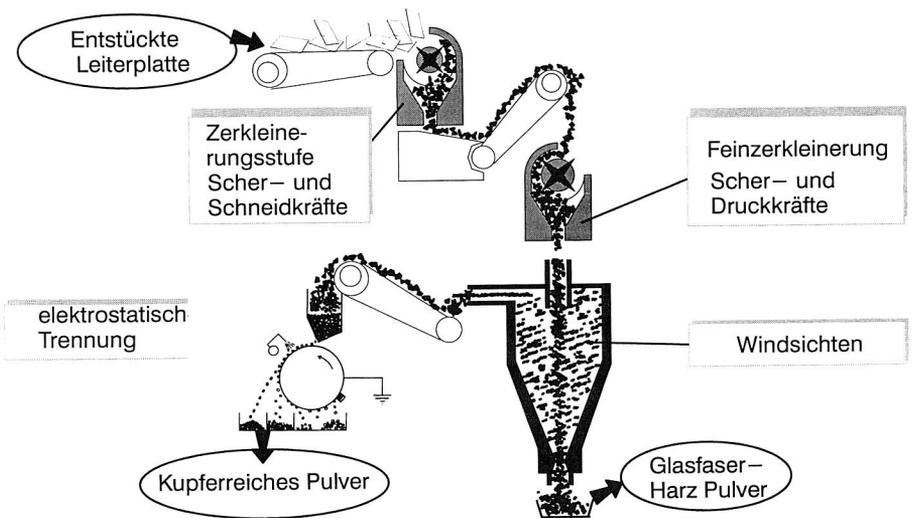


Bild 11: Mechanisches Verfahren von NEC /52/

durch Verdichtung und Scherung einen weiteren Aufschluß ermöglicht. Mit Hilfe eines Windsichters werden große Anteile des Glasfaser-Harzgemisches dem Massenstrom entzogen. Der kupferhaltige Reststrom wird mit Hilfe eines elektrostatischen Verfahrens nochmals getrennt, sodaß sortenreines Kupfer gewonnen wird. Der andere Anteil wird wieder zur Feinpulverisierung zurückgeleitet. Es können bis zu 94% des Kupfers zurückgewonnen werden. Das Glasfaser-Harz Pulver kann als Zusatzwerkstoff bei der Herstellung von Kunststoffen auf Epoxidharzbasis verwendet werden. In Bild 11 ist der Prozeß dargestellt.

3.1.2 Pyro- und elektrometallurgische Verwertung

Pyrometallurgische Verfahren beruhen auf der thermischen Umsetzung von Kunststoffen und dem gleichzeitigen Aufschmelzen der Metalle. Im Leiterplattenrecycling werden zwei

Gruppen unterschieden. Entweder werden neue, auf das Material angepaßte Prozesse entwickelt (VELMELDE–Prozeß, BC–Pyrolyseprozeß) oder die Leiterplatten werden als Zuschlagstoffe in rohstoffliche Verhüttungsprozesse eingebracht. Im folgenden sind die wichtigsten Prozesse beschrieben.

- **Metallgießerei VELMEDE:** In einem feuerfest ausgekleideten Tiegelofen wird vorzerkleinerter Leiterplattenschrott mit Heizöl und Sauerstoff vermischt und verbrannt. Es entstehen im Bad Temperaturen bis zu 1600 °C, die die Metalle schmelzen und die Schlacke auf der metallischen Phase schwimmen lassen. Die Schlacke und die Metalle werden getrennt abgossen, das Metall in Edelmetallscheideanstalten weiter verarbeitet /3/.
- Die **Pyrolyse** ist ein endothermer Prozeß, bei welchem unter indirekter Wärmezufuhr organische Stoffe bei Temperaturen zwischen 500 °C und 700 °C in sauerstoffarmer Atmosphäre thermisch umgesetzt werden. Produkte des Verfahrens sind Gase, Öle und feste Rückstände (Pyrolysekoks, Metalle, Glasfasern, Keramik). Eine auf die Belange des Leiterplattenschrotts angepaßte pyrolytische Anlage wird von der Firma Berlin Consult (BC) entwickelt /42/.
- **Kupferhütte:** Das vorzerkleinerte kupferhaltige Leiterplattenmaterial wird im den Konverter des Kupfergewinnungsprozeß in eine mehr als 1200°C heiße Schmelze eingebracht.

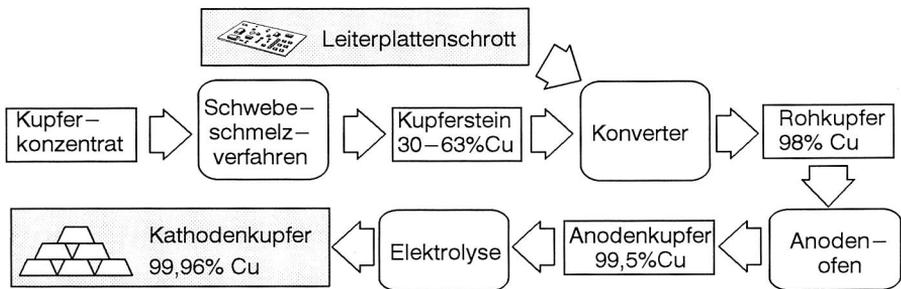


Bild 12: Metallurgische Verfahren einer Kupferhütte (Norddeutsche Affinerie Hamburg) /159/

Dabei zersetzt sich der Kunststoff spontan, Zinn, Blei, Quecksilber, Cadmium, Beryllium und Arsen sind flüchtig, die Eisenanteile werden oxidiert und das Zink wird verschlackt. Das Rohkupfer setzt sich als flüssige Phase am Boden des Converters ab und wird mit den darin enthaltenen Edelmetallen sowie Kobalt, Nickel, Selen und Tellur zur schmelzmetallurgischen Raffination gebracht. Dort werden einige Metalle wie Kobalt, Zink, Blei, Nickel und Zinn getrennt, das verbleibende Anodenkupfer als Anodenmaterial in der elektrischen Raffination zu Reinkupfer weiterverarbeitet /93/. Die Begleitmetalle und Verunreinigungen gehen entweder in Lösung oder verbleiben ungelöst im Anodenschlamm. Nickel, Arsen und Antimon befinden sich im Elektrolyt. Die Edelmetalle, Blei, Zinn, Selen und Tellur sind im Anodenschlamm. Der Metallgehalt des Anodenschlammes beträgt über 80%. Die Aufbereitung dieses Schlammes erfolgt in Edelmetallscheideanstalten. Des Verfahren ist in Abbildung 12 dargestellt.

Neben dem Kupferprozeß finden weitere metallurgische Prozesse als Recyclingprozesse für Leiterplatten Beachtung. Zu nennen sind hier vorrangig der:

- *pyro– bzw. elektrometallurgische Zinnerzeugungsprozeß* und
- der *Bleihherstellungsprozeß*. Als Prozeß zum Leiterplattenrecycling hat er vor allem in Schweden (Boliden Metall AB /70/) Bedeutung erlangt. In der Bleihütte wird der Leiterplattenschrott in den Hochofen gegeben, die meisten Metalle werden im sogenannten Werkblei gebunden, wobei Eisen, Zink und Aluminium durch die Schlacke verloren gehen. Das Werkblei wird in der folgenden Raffination zu dem sog. Raffinatblei verarbeitet, wobei während des Durchlaufs der Prozeßkette große Anteile von Kupfer, Arsen, Zinn, Antimon, Gold, Wismut, Silber, Platin und Palladium gewonnen werden.

3.1.3 Edelmetallscheidung und Tantalgewinnung

Edelmetallscheideanstalten

Im Leiterplattenrecycling bearbeiten Edelmetallscheideanstalten bevorzugt ausgesuchte edelmetallhaltige Baugruppen und edelmetallhaltige Zwischenprodukte aus anderen Recyclingprozessen. Zur Aufbereitung des Materials, dessen Zusammensetzung durch ein Beprobung festgestellt wird, werden je nach Edelmetallen, Edelmetallgehalt und Begleitstoffen unterschiedliche Verfahrenskombinationen eingesetzt. Die für Platinenschrotte typische Aufarbeitung erfolgt über einen Schachtofen. Dort wird der Schrott bei 1000–1200°C mit Bleiglätte (PbO) reduzierend geschmolzen. Die Schmelze gelangt in einen Vorherd, in dem sich die Materialfraktionen Werkblei (metallische Phase mit den Edelmetallen), Kupferstein (CuS) und Schlacke (Oxide) bilden.

Die anfallende Schlacke wird deponiert oder im Straßenbau verwertet. Der Kupferstein wird an Kupferhütten geliefert. Das edelmetallhaltige Werkblei gelangt in einen Treibofen. Dort geht das Blei in einer oxidierenden Atmosphäre bei ca. 1000°C in Bleiglätte über. Dieses Oxid schwimmt auf und wird abgezogen. Die nicht oxidierenden Edelmetalle konzentrieren sich in der metallischen Phase auf, bis eine Edelmetallschmelze zurückbleibt. Diese Schmelze wird zu Anodenblöcken vergossen. Die Bleiglätte wird im Kreislauf geführt und wieder im Schachtofen eingesetzt. Aus den Edelmetall–Anodenblöcken werden in zwei Stufen elektrolytisch Silber und Gold und auf naßchemischen Weg Platinmetalle gewonnen. Mit diesem Verfahren werden über 99% der auf den Platinen vorhandenen Edelmetalle zurückgewonnen /110/.

Tantalherstellungsprozeß

Große Teile der weltweiten Tantalproduktion werden in Tantalkondensatoren verarbeitet. Die Knappheit des Tantals und dessen gezielte Verwendung in Tantalkondensatoren rechtfertigen die detaillierte Betrachtung eines Prozesses zum Recycling von Tantalkondensatoren.

Der tantalhaltige Kondensatorschrott wird dabei in ein Aluminiumbad gegeben, wobei der Kunststoff verbrennt und die Tantal–Sinterkörper aufgrund ihrer hohen Dichte auf den Boden absinken. Das Lot und andere Verunreinigungen, wie z.B. Nickel, werden im Aluminium aufgelöst. Oxide des Elektrolyten schwimmen auf. Die Tantal–Sinterkörper werden durch

Behandlung mit Salzsäure vom anhaftenden Aluminium gereinigt und liegen als pulverförmiger Rohstoff vor /169/.

3.1.4 Manuelle Demontage elektronischer Bauteile

Die Demontage elektronischer Baugruppen wird vor allem zur Separierung gefahrstoffhaltiger und wiederverwendbarer Bauelemente durchgeführt (siehe auch Kapitel 2).

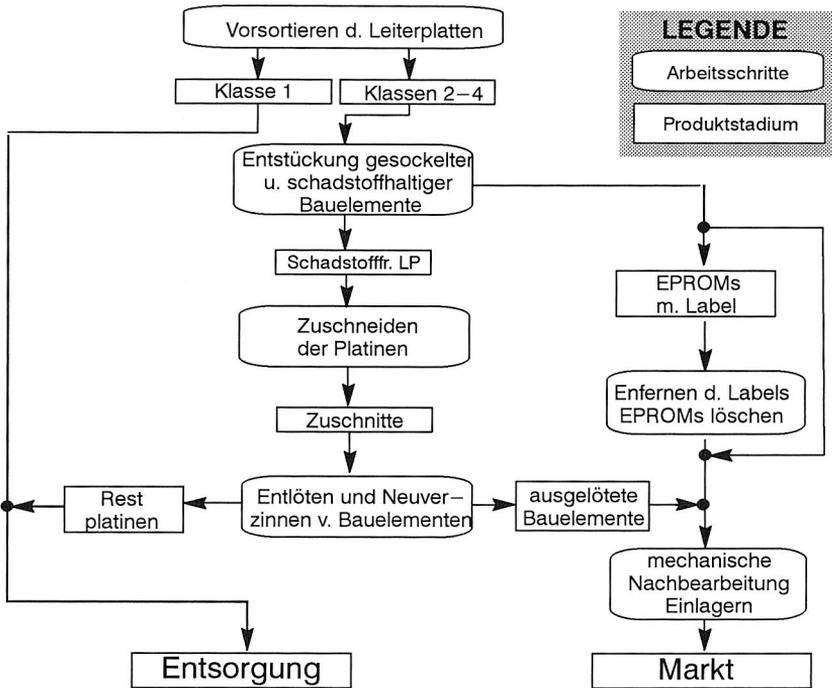


Bild 13: Strukturdiagramm des Ablaufs in der manuellen Demontage elektronischer Bauelemente /85/

Die Leiterplatten werden am Demontagebetrieb zumeist als loses Schüttgut in Gitterboxen angeliefert und hinsichtlich ihrer Bestückung in die folgenden Kategorien eingeteilt /85/:

1. nicht verwendbare Bestückung ohne Schadstoffe,
2. verwendbare Bestückung ohne Schadstoffe,
3. nicht verwendbare Bestückung mit Schadstoffen,
4. verwendbare Bestückung mit Schadstoffen.

Die Leiterplattenchargen durchlaufen die Demontagesequenz, wie sie auch im Ablaufdiagramm in Bild 13 dargestellt ist.

- Schadstoffentfrachtung (Kondensatoren, Ni–Cd–, Li–Batterien), Entstückung von Kühlkörpern (Aluminiumrecycling) und von verwendungsfähigen, gesockelten Bauelementen. Die schadstoffhaltigen Bauelemente und Kühlkörper werden mit handelsüblichen Zangen teilzerstörend getrennt und die Bauelemente in bereitgestellte Transportbehälter abgelegt. Gesockelte Bauelemente werden mit Schraubendrehern entfernt und im nächsten Schritt bearbeitet (Bild 14, rechts).
- Im zweiten Arbeitsschritt werden die entstückten EPROMs gelöscht. Zu diesem Zweck wird das Label, welches zum Schutz des integrierten Schaltkreises gegen Löschen aufgeklebt wurde, mit Hilfe von Aceton entfernt. Die EPROMs werden dann mit UV–Licht gelöscht und in Stichproben deren Funktion getestet.



Bild 14: Manuelle Demontage zur Entstückung und Entlötung von gesockelten und schadstoffbefrachteten elektronischen Bauelementen [60, 85]

- Die aus Arbeitsschritt eins ausgeschleusten Leiterplatten werden nun für das Entstückung durch Entlöten vorbereitet. Dazu werden die interessanten Produktbereiche mittels einer Hebelschere ausgeschnitten und damit auf Lötbadgröße zugeschnitten.
- Im Entlötprozess werden die Leiterplattenzuschnitte mit den besonders wertvollen bzw. gefährstoffhaltigen (z.B. Quecksilberschalter) Bauelementen in Lötbadern aufgelegt. Die Lötstellen werden aufgeschmolzen und die THD–Bauelemente mit Zangen manuell entfernt (Bild 14, links). SMD–Bauelemente werden durch Schlagen der Leiterplatte gegen einen Tisch (Impulseinbringung) entfernt. Die Beinchen der entstückten Bauelemente werden in Lötbadern eingetaucht und neu verzinkt.
- In einem abschließenden Arbeitsschritt werden die Pins der neu verzinkten Bauelemente mit Messingdrahtbürsten bearbeitet, die Funktion in Stichproben geprüft und die Bauelemente eingelagert.

3.2 Methodische Bestimmung der Ressourceneffizienz von Prozessen zum Recycling elektronischer Baugruppen

Ziel der folgenden Analysen ist es, das Wiedergewinnungspotential der beschriebenen Recyclingtechniken zu erfassen. Dazu werden am Beispiel der Musterleiterplatte aus Kap. 2 die Kennzahlen Resource Recovery Potential (RRP), der Recyclinglerlös und die verwerteten Gewichtsanteile bestimmt.

i	Element	Wertstoffpot. [\$/kg]	Kupferprozeß		Bleiprozeß		Zinn pyrolytisch		Edelmetallisch.		Tantalprozeß		NEC Verfahren	
			Wert n. Prozeß		Wert n. Prozeß		Wert n. Prozeß		Wert n. Prozeß		Wert n. Prozeß		Wert n.	
1	Al	49,0					0		0					
2	Cu	374,7	99	370,9	95	355,9	90	337,2	95	355,9				
3	Fe	26,1					0							
4	Ni	80,2	85	68,2	0		0							
5	Pb	19,1	85	16,2	99	18,9	90	17,2						
6	Sn	116,6	80	93,3	90	104,9	99	115,4						
7	Zn	4,7	85	4,0	0		0							
8	Ag	93,3	90	83,9	90	83,9	90	83,9	99	92,4				
9	Au	5688	98	5120	95	5404	95	5404	99	5631				
10	Pd	625,7	90	563,1	90	563,1	90	563,1	95	594,4				
11	Ta	9,6			0		0				99	9,5		
12	Sb	24,9			95	23,7	90	22,4						
13	Co	4,1			0									
14	Mo	1,2			0									
15	Cd	1,6			0									
16	Be	1,0			0									
17	Hg	0,1			0									
18	Pt	483,5	90	435,2	90	435,2	90	435,2	99	478,7				
19	Ge	43,4												
20	Ga	34,1												
21	Cr	11,7												
22	In	14,0												
23	Ru	7,0												
24	Al ₂ O ₃	1617												-90 1455
25	Br	?												
26	EP	95,0												-80 76
Summe		9426		6755		6989		6978		7152		9,5		1531
Gew%		100		18,8		18,1		17,3		13,6		0		59,3
RRP		324		190,3		201,3		203,3		164,7		92,7		0

Tabelle 6: Bestimmung der theoretischen Erlöse, der Masseneffizienz und des Resource Recovery Potentials ausgewählter Recyclingprozesse

Die Recyclingquote beschreibt den prozentualen Anteil eines gewonnenen Materials in Relation zu dem in den Prozeß eingeschleusten Material. Sie quantifiziert damit auch den Materialverlust eines Recyclingprozesses. Theoretisch kann die Recyclingquote für alle in einer Leiterplatte befindlichen Elemente bestimmt (praktisch sind diese Quoten nur für einige Stoffe bekannt) und zu einem sog. Recyclingprozeßvektor zusammengefaßt werden.

Auf Basis der Recyclingquote können nun die Kennzahlen berechnet werden. Sie bestimmen sich aus der Multiplikation des Recyclingprozeßvektors mit den jeweiligen Materialgrößen: Gewichtsanteil, Erlös und RRP der Stoffe. Die errechneten Werte sind dann zur jeweiligen Prozeßkenngröße aufzusummieren. Mit Hilfe der Formel:

$$R_{Pr} = \sum_{i=1}^N (R_{M,i} * E_i)$$

mit: R_{Pr} : Recyclingerlös des Prozesses [\$]
 N : Anzahl der Materialien
 E : Erlös/Kosten auf d. Sekundärrohstoffmarkt [\$]
 R_M : Recyclingquote pro Material

kann z.B. der Recyclingerlös eines Prozesses bestimmt werden. Um diese Berechnungen zu ermöglichen wurden die Recyclingquoten der beschriebenen Prozesse erarbeitet ebenfalls und in Tabelle 6 aufgelistet (in %). Am Beispiel der Modelleiterplatte aus Kap. 2 werden die verschiedenen Kennziffern bestimmt und in Tabelle 6 zusammengefaßt.

3.3 Schwachstellenanalyse der Recyclingkette und Verbesserungspotentiale durch die Demontage elektronischer Schaltungsträger

Wie aus der Analyse der einzelnen Prozesse hervorgeht, werden durch die eingesetzten pyrometallurgischen Verfahren vor allem die metallurgischen Ressourcen des Leiterplattenschrotts verwertet. Dadurch werden 2/3 des Materialwerts und des RRP's wiedergewonnen, der vollständige technologische Aufbau dagegen zerstört und nur 20 % der Masse verwertet. Wichtige Ressourcen werden im Prozeßablauf verschlackt und stehen für eine weitere Verwertung nicht mehr zur Verfügung. Darunter fallen u.a. Eisen, Aluminium, Kunststoffe (v.a. aus den Substratmaterialien), Glasfasern sowie seltene Metalle wie Tantal, Rhodium (z.B. Stecker), Indium und Gallium (z.B. Dioden). Diese Materialien sind zumeist sehr knappe Ressourcen und bilden einen nicht zu vernachlässigenden Wert.

Die mechanischen Trennverfahren dienen als vorbereitende Prozesse zur Verarbeitung in metallurgischen Anlagen. Prinzipiell verursachen sie nur eine geringe Wertschöpfung. Durch das Erschließen des Ressourcenpotentials der Glasfasern durch mechanisches Aufschließen und Abtrennen kann dies durchaus geändert werden. Dies kann, wie die ökonomischen Abschätzungen zeigen, erheblichen Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Verfahrenskette haben. Gelingt es nun das Material mechanisch aufzuschliessen, die Glasfasern zu gewinnen und die metallischen Ressourcen mit maximaler Verwertungsquote zurückzugewinnen, kann der Verwertungserlös und RRP auf über 90% des Materialpotentials und die recycelte Masse auf über 75% gesteigert werden (Bild 15).

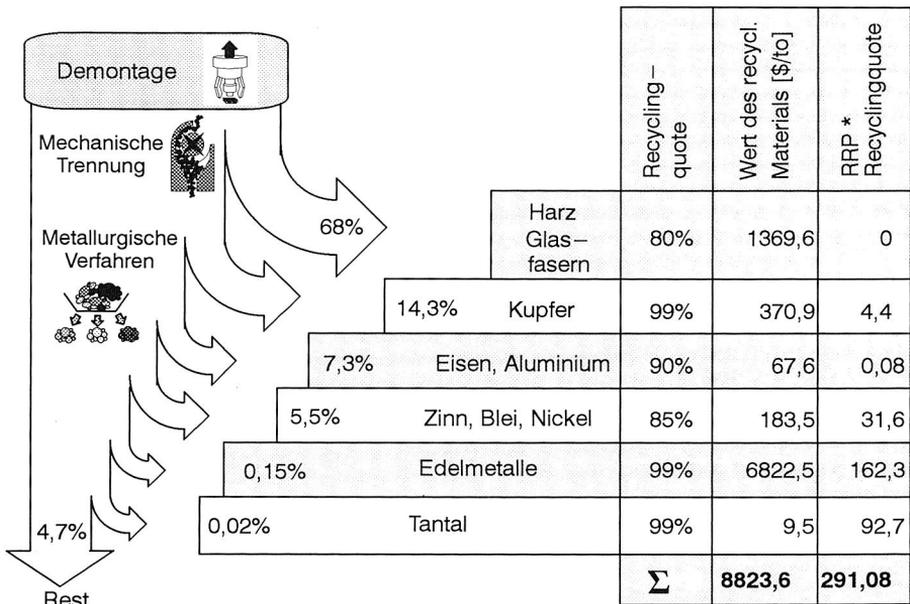


Bild 15: Darstellung der optimalen Recyclingprozesskette im Sankey-Diagramm unter Angabe der Recyclingquoten, des erlösten Materialwertes und des RRP

Dabei wird von einer Verwertung der Edelmetalle Gold, Platin, Palladium und Silber in den Edelmetallhütten sowie Tantal im Tantalrecycling ausgegangen. Die angelieferten Materialgemische müssen vorab aus dem gesamten Materialstrom getrennt und stark angereichert werden.

Die beschriebenen Verfahren setzen implizit eine Schadstofffreiheit voraus, die immer eine manuelle Gefahrstoffentfrachtung bedingt. Während der Demontage ist es für Leiterplatten einiger Produktklassen (Computer, Informationstechnik etc.) sinnvoll, diese auf verwendbare Bauelemente abzusuchen. Wie die Umsatzverteilung des Demontagebetriebs in Kapitel 2 verdeutlicht, beläuft sich der Umsatz wiederverwendbarer Bauelemente auf 200% der Einnahmen aus den Materialerlösen.

In Bild 15 ist die optimale Verfahrenskette nochmals aufgezeigt. Sie besteht aus einer Demontage, in welcher wiederverwendbare, gefahrstoff-, tantal- und edelmetallhaltige Bauelemente getrennt werden und verschiedene mechanische und metallurgische Prozesse. Die mechanischen Prozesse trennen Kupfer, Harz und Glasfaser der Leiterplatte, die metallurgischen Verfahren verwerten die Metallanteile des Restgemisches.

Zusammenfassend stellt sich die folgende Recyclingsequenz als optimal dar:

1. Entfrachtung der gefahrstoffhaltigen Bauelemente.
2. Entstückung der wiederverwendbaren Bauelemente.
3. Entstückung der tantalhaltigen Körper und deren Verwertung im Tantalprozeß.
4. Entstückung der edelmetallhaltigen Bauelemente und deren Verwertung in der Edelmetallscheideanstalt.
5. Trennung der verwertbaren Materialfraktionen:
 - Glasfasern können als Substitute von Neumaterialien in Schichtpresstoffen eingesetzt werden /143/.
 - Aluminiumkörper werden in Aluminiumhütten verarbeitet.
 - Die restliche Bestückung setzt sich hauptsächlich aus kupfer-, zinn- und bleihaltigen Materialgemischen zusammen und wird in einem pyrometallurgischen Prozeß verarbeitet.

Die Entfrachtung, Entstückung und Fraktionierung gewinnt im aufgezeigten Szenarium eine Schlüsselrolle und kann nur durch ein mechanisiertes und automatisiertes Demontagesystem geleistet werden, welches den Stückzahlen der zukünftig zu erwartenden Rückläufe gewachsen ist. Ziel der folgenden Kapitel ist es, ein geeignetes Verfahrenskonzept zu entwickeln.

3.4 Entwicklung von Konzepten zur automatisierten Demontage elektronischer Schaltungsträger

Wie in den vorausgehenden Analysen deutlich wurde, spielt eine effiziente Demontage eine Schlüsselrolle im Recyclingsystem elektronischer Schaltungsträger. Die Demontage erlaubt eine Wiederverwendung funktionaler Einheiten sowie die gezielte Separierung von Gefahrstoffen. Durch eine optimierte Fraktionierung werden über 90% des ökonomischen Potentials und des Ressourcenpotentials des Leiterplattenschrotts wiedergewonnen sowie 95 Gew.% des Materials verwertet.

Um ein tragfähiges Demontagekonzept zu entwickeln, sind aus diesen Vorgaben die systembegrenzenden Rahmenbedingungen zu definieren. Zu berücksichtigen sind dabei vor allem:

- die maximal zulässigen Durchlaufzeiten,
- der Zerstörungsgrad der Bauelemente und der Leiterplatte,
- die thermische und mechanische Belastung der wiederzuverwendenden Bauelemente,
- die zu erwartende Wertschöpfung pro Bauelement,
- die Einsatzflexibilität für Bauelemente und Leiterplatten

- sowie die Anpaßbarkeit der Systeme an neue Entwicklungen in den Bauelement– (z.B. Fine Pitch) und Substratmärkten (3D MID).

	Wiederverwendung	Gefahrstoffentfrachtung	Fraktionierung
Zerstörungsgrad	Verbindungsstelle	Verbindung, (u.U. Beinchen)	Verbindung, (u.U. Beinchen)
Erlaubte Belastung der Bauelemente	gering (ähnlich Lötten)	mittel (abh. von Gefahrstoffen)	hoch
Geforderte Durchlaufzeit	niedrig	hoch	hoch
Wertschöpfung	hoch	gering	gering
Geometr. Flexibilität	gering	groß	groß
Anpaßbarkeit an neue geom. Rahmenbedingungen	möglich	möglich	möglich

Tabelle 7: Gegenüberstellung Demontageziele und der einzuhaltenden Rahmenbedingungen

Die auf die Anlagenkonzeption Einfluß nehmenden Rahmenbedingungen können nun für die grundlegenden Funktionalitäten des Systems analysiert werden, indem Ziele und Rahmenbedingungen in einer Matrix einander gegenüber gestellt werden. Wie in Tabelle 7 dargestellt, werden in der einen Achse die Prozeßziele aufgelistet, in der zweiten die zu beachtenden Rahmenbedingungen erfaßt.

3.4.1 Anlagenkonzept zur Demontage wiederverwendbarer Bauelemente

Wiederverwendbare Bauelemente sind zerstörungsfrei, schonend und unbeschadet aus dem Schaltungsverbund zu lösen. Wegen des hohen Wertschöpfungspotentials bei der Entstückung spezieller Bauelemente sind, relativ zur Leistungsfähigkeit von Hochleistungsbestückern in der Produktion /69/, nur geringe Anforderungen an die Durchlaufzeiten zu stellen. Da wiederverwendbare Bauelemente in der Regel nur in Geräten der Informations-, Automatisierungs – und Kommunikationstechnik zu finden sind, sind an die Flexibilität bzgl. der Leiterplattengröße nur mittlere Anforderungen zu stellen. Wie in Kap. 2 detailliert analysiert, wird nur ein begrenztes Bauelementespektrum entstückt, welches nur geringe Anforderungen an die Systemflexibilität stellt. In Anlehnung an die Bestückung von Leiterplatten mit elektronischen Bauelementen kann eine Demontage von elektronischen Flachbaugruppen nach unterschiedlichen Grundkonzepten erfolgen.

Vergleichbar der Einzelbestückung werden die Bauelemente im Sinne einer Umkehrung des "pick and place"-Prinzips einzeln von der Leiterplatte abgenommen (Bild 16). Während bei der Einzelbestückung ein bestimmtes Bauelement aus einem Magazin entnommen und an einer vorgegebenen Position auf der Leiterplatte abgesetzt wird, muß für eine gezielte Demontage der Typ und die Position des Bauelementes erst ermittelt werden. Für das Entstückten von gelöteten Bauelementen nach diesem Konzept ist eine gezielte Wärmeinbringung erforderlich. Dieses mit einer Reparaturlötung vergleichbare Demontageprinzip entspricht dem 'gezielten' bzw. 'selektiven Entstückten'.

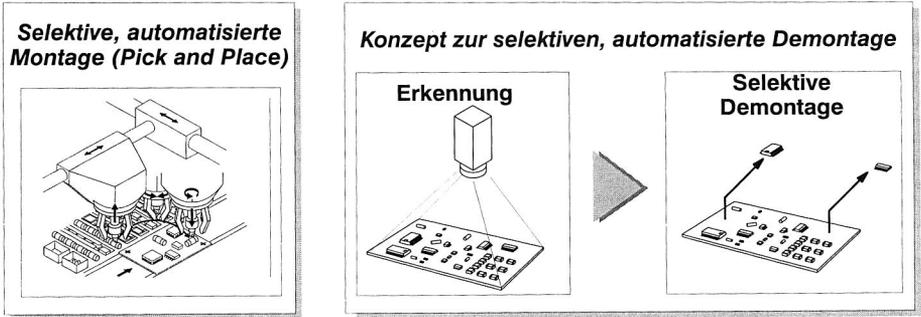


Bild 16: Grobkonzept zur Demontage wiederverwendbarer Bauelemente [29/

3.4.2 Anlagenkonzept zur Gefahrstoffentfrachtung und Wertstofffraktionierung

Angesichts der fast identischen Anforderungsprofile zur Gefahrstoffentfrachtung und Wertstofffraktionierung (Tab. 7) ist eine Verarbeitung im gleichen Anlagenkonzept zu prüfen. Für beide Konzepte ist eine Teilerstörung der verbindenden Bauelementpins zulässig, insoweit eine einfache Fraktionierung nicht gefährdet wird. Im Rahmen dieser Konzeptentwicklung wird davon ausgegangen, daß die Pins als signifikantes Sortiermerkmal gelten, also nicht zerstört werden dürfen. Es sollen daher, wie auch in der selektiven Demontage, vorrangig die stoffschlüssigen Verbindungstechniken getrennt und die Bauelementkörper vollständig entfernt werden. Während des Prozesses können die Bauelemente, da deren Funktion für einen zweites Produktleben nicht angestrebt wird, bis an ihre Grenzen, die sich aus den Verarbeitungsvorschriften ableiten, belastet werden.

Im Gegensatz zur selektiven Demontage sind alle Schaltungsträger auf Gefahrstoffe zu untersuchen und in Materialfraktionen zu trennen. Bei den zu erwartenden Mengen (40.000 to/a /161/) kann man mit hohen Stückzahlen rechnen, die einen sehr hohen Durchsatz bedingen. Wegen der zu erwartenden dezentralen Struktur in der Demontage elektronischer Geräte fallen Leiterplatten in allen Demontagefabriken an.

Um den logistischen Aufwand zu reduzieren, ist eine Verarbeitung in regionalen Demontagezentren empfehlenswert. Dies setzt, um eine breite anlagentechnische Durchdringung zu erzielen, auch geringe Anschaffungskosten der Anlage voraus. Da unterschiedliche Leiterplattenformate zu bearbeiten sind, muß eine maximale Anlagenflexibilität an Leiterplatten- und Bauelementebaupformen vorausgesetzt werden. Dies gilt zugleich auch in Hinblick auf neue Bauelementgehäusetypen, aber vor allem auch auf neue Aufbautechniken. So ist die Möglichkeit vorzusehen, 3D Schaltungsträger (3D MID) zukünftig entstückt zu können.

Im Rahmen einer Großserienfertigung erfolgt häufig eine Simultanbestückung der Leiterplatte mit elektronischen Bauelementen, wobei alle erforderlichen Bauelemente zuvor in einer Vorrichtung positioniert, gemeinsam gegriffen und auf der Leiterplatte abgesetzt werden. Bei dem daraus ableitbaren Demontageprinzip ist es erforderlich, die Lötstellen von allen oder mehreren Bauelementen durch eine flächig wirkende Wärmeinbringung zu

lösen und die Bauelemente gemeinsam abzunehmen. Die Demontage von mehreren oder allen Bauelementen in einem Schritt gewährleistet zwar einen hohen Durchsatz, es muß allerdings dabei ein größeres Beschädigungsrisiko der Bauelemente in Kauf genommen werden (Bild 17).

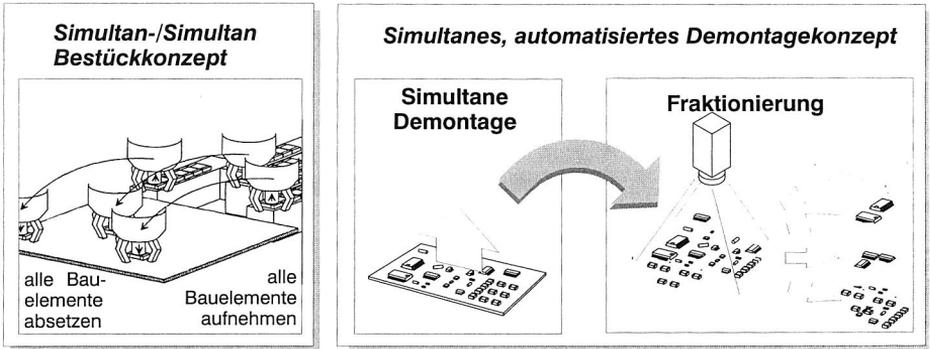


Bild 17: Grobkonzept zur Demontage und Fraktionierung der gefahr- und wertstoffhaltigen Bauelementen [29]

Die demontierten Bauelemente müssen anschließend nach physikalischen bzw. geometrischen Kriterien sortiert werden. Die nachfolgende Sortierung der Bauelemente in die recyclingspezifischen Gruppen ist dabei an die Leistung des Demontagesystems anzupassen. Dieses Demontageprinzip wird als "Demontieren und Sortieren" bezeichnet.

3.4.3 Systemaufbau

Die Menge aller zu bearbeitenden Leiterplatten wird in zwei Ströme aufgeteilt, die entweder nur simultan oder erst selektiv und dann simultan bearbeitet werden sollen. In der deswegen durchzuführenden Vorsortierung kann auch ein manuelles Lösen von kritischen Verbindungen und das Abtrennen von mit Edelmetall beschichteten Leiterplattenzonen (Kammkontakte) mit Hilfe von z.B. Schlagscheren erfolgen.

In der selektiven Demonteeinheit wird als erster Prozessschritt die Erkennung und Gewinnung von Informationen zur späteren Bauelementeidentifikation durchgeführt. Mit Bildverarbeitungsalgorithmen können daraus Entstückungsdaten der als interessant erkannten Bauelemente bestimmt werden. Getrennt werden nur gesteckte und gelötete Verbindungen.

Das simultane Demontagemodul hat die Aufgabe, die Leiterplatte vollständig zu entstückeln. Dazu geeignet sind flächig wirkende Wärmequellen, die auf beiden Seiten der Flachbaugruppe angeordnet sein können. Die Bauelemente werden beim Erreichen der Schmelztemperatur mittels flächig wirkender Kraftbeaufschlagungsprinzipien simultan entfernt. Die Restbestückung kann danach teilzerstörend oder zerstörend getrennt werden.

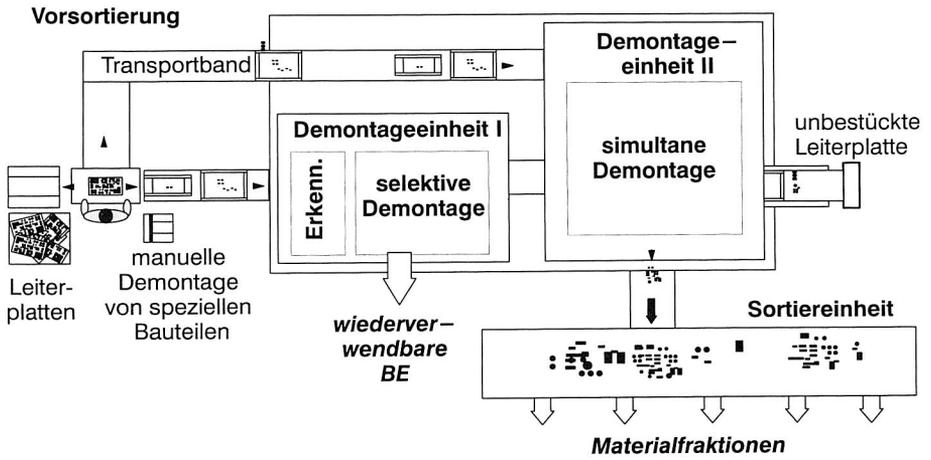


Bild 18: Konzept einer automatisierten Anlage zur Entstückung von Leiterplatten /30/

Die unbeschädigt entstückten Bauelemente werden mit Hilfe von Transportbändern aus der Entlötzzone entfernt und nach einer Vereinzelung mit einer im Rahmen der Arbeiten zu entwickelnden Erkennungseinheit zugeführt, identifiziert und entsprechend ihrer Materialklassenzugehörigkeit sortiert.

4. Analyse des Einflusses elektronischer Verbindungstechniken auf Demontageprozesse

Zur Planung, Detaillierung und Realisierung von Entstücksystemen ist eine systematische Herleitung von Prozeßsequenzen sowie das Erarbeiten von prozeßtechnischen Grundlagen Voraussetzung. Kern der folgenden Betrachtungen soll es deshalb sein, anhand der im zweiten Kapitel charakterisierten Verbindungstechniken geeignete Demontageprozesse methodisch zu generieren. Die Prozeßparameter der aussichtsreichsten Verfahren sind zu bestimmen und deren Interprozeßabhängigkeiten zu quantifizieren. In einer zusammenfassenden Betrachtung der erarbeiteten Kenntnisse werden abschließend die Verfahren für die weiteren Entwicklungen ausgewählt.

4.1 Festlegung möglicher Demontageprozesse und deren Prozeßparameter

In Kapitel 2 wurden die in der Elektronik am häufigsten vertretenen Verbindungstechniken detailliert geschildert. Auf Basis dieser Übersicht sollen mit Hilfe eines morphologischen Kastens (Tab. 8) mögliche Demontageprozesse aufgezeigt und anhand einer qualitativen Vorauswahl geeignete Entstückmechanismen herausgearbeitet werden. Aus Tabelle 1 werden zur Charakterisierung der Verbindungstechniken die Ordnungskriterien 'Schlußart' und 'Verbindungselement' übernommen und in den morphologischen Kasten in der vertikalen Achse eingetragen. Die horizontale Achse gliedert sich nach dem demontagetechnischen Zerstörungsgrad der Prozesse.

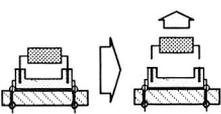
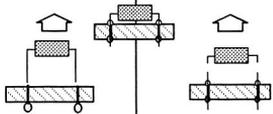
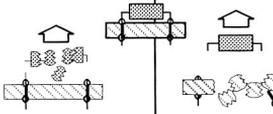
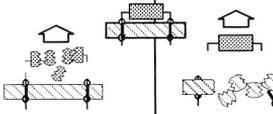
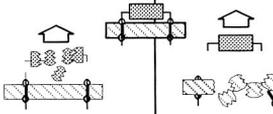
► Grad der Zerstörung		
nicht zerstörend	teilerstörend	zerstörend
 <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Überwinden des Reibschlusses <input type="checkbox"/> Zugkraft <input type="checkbox"/> BE, VT und LP bleiben unbeschädigt 	 <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Aufschmelzen von Lot (zerst.) <input type="checkbox"/> Einsatz von Temperatur <input type="checkbox"/> Zugkraft 	 <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Abscheren der Pins <input type="checkbox"/> LP und VT nicht zerstört <input type="checkbox"/> Scherkraft <input type="checkbox"/> Abheben
		 <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zerstörendes Abheben der BEs <input type="checkbox"/> LP bleibt erhalten <input type="checkbox"/> Trennproz. nach DIN
		 <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zerstören von LP <input type="checkbox"/> Beinchen abschneiden <input type="checkbox"/> Trennprozeß nach DIN

Bild 19: Grad der Zerstörung in der Demontage elektronischer Bauelemente (VT: Verbindungstechnik; LP: Leiterplatte; BE: Bauelemente)

Diese dazu geeigneten Prozesse können aus dem gesamten Spektrum der Trennprozesse nach DIN 8580–3 ausgewählt werden /104/. Darunter fallen z.B. die spanabhebenden Zerteilprozesse Hobeln, Scheren, Schälen, Fräsen und Feilen /105/. Damit kann sowohl die Verbindungstechnik (teilzerstörende Demontage) als auch das Bauelement (zerstörende Demontage) bearbeitet und der Verbund der elektronischen Schaltung aufgelöst werden (siehe auch Bild 19). Die zerstörende Demontage von Leiterplatte oder Bauelement bildet die prozeßtechnische Grenze zu den vollständig zerstörenden mechanischen Trennverfahren, die die gesamte Baugruppe als inhomogenes Materialgemisch verarbeiten (siehe auch mechanische Trennverfahren, Kap 3).

In die einzelnen Felder der Verbindungs–Demontagematrix können nun realisierbare Lösungsprinzipien eingetragen werden, aus denen später die geeignetsten Verfahren auszuwählen sind (siehe auch Kap. 4.6). Diese sind dann miteinander zu kombinieren und führen zum Gesamtkonzept der automatisierten Demontage elektronischer Baugruppen.

Schlußart	Verbind.-element	Demontagemöglichkeiten				Zerstörungsgrad $\leftarrow \rightarrow$	
		nicht zerst.	teilzerstörend			zerstörend	
Kraft-schluß	Reibung	Kraft entgegen der Reibkraft		—		Anschluß-beinchen abschneiden	Bauelemente oder Leiterplatte Span abhebend bearbeiten
	Stoff-schluß	Lot	—	Lot erwärmen u. Zug-Scherkraft	—		
Kleben		—	Kleber erwärmen u. Zug-Scherkraft	Kleber chemisch lösen	Klebstelle abscheren		
Form-schluß	Pins, gebogen	Pins zurück-biegen	—	—	—		
	Schraube	Schraube/Mutter lösen	—	Schraube ausbohren	Mutter oder Schraube abschneiden		
	Niet	—	—	Niet ausbohren	Nietkopf unten oder oben abschneiden		

Tabelle 8: Morphologischer Kasten zur Entwicklung von Demontagestrukturen

Tabelle 8 gibt eine Übersicht der nach heutigen Stand mit vertretbarem Aufwand realisierbaren Prozesskonzepte, die in Abhängigkeit der Demontageaufgabe im folgenden im Detail beschrieben werden:

Reibung:

Zur Demontage von reibschlüssigen Verbindungen müssen Zug – oder Druckkräfte eingeleitet werden, die der Reibkraft entgegenwirken. Die Entstückkräfte müssen die Haftrei-

bung überwinden, die von der Materialpaarung und von den Normalkräften, die sich aus der elastischen Verformung des Fügeelements bestimmen, abhängen.

Lot:

Das auch in der Reparatur eingesetzte Entstückprinzip beruht auf dem Aufschmelzen des Lots und das darauf folgende Trennen der Bauelemente von der Leiterplatte. Es lassen sich jedoch unterschiedliche Demontageprinzipien definieren. Konventionell montierte Bauelemente können nur aus der Bohrung gezogen werden, wo hingegen oberflächenbestückte Bauelemente auch abgeschoren werden können. Das Abscheren der SMDs kann auch ohne den Einfluß von Wärme erfolgen. Dabei ist aber davon auszugehen, daß die Bauelementebeinchen stark verformt werden.

Kleben:

(Leit-)Klebstoffe können prinzipiell thermisch oder chemisch gelöst werden. Zum endgültigen trennen der oberflächenbestückten Bauelemente und ungehäust montierten ICs müssen zusätzlich Zug- oder Scherkräfte eingebracht werden. Wie auch bei Lötverbindungen, können auch Klebstoffe ohne vorheriges thermisches oder chemisches Auflösen abgeschoren werden.

Rückbiegen von Pins:

Zur mechanischen Sicherung von ungelöteten THT Bauelementen beim Transport werden die Enden der durchgesteckten Beinchen umgebogen. Der dadurch erzeugte Formschluß kann beim Herausziehen durch das Rückbiegen der Beinchen reversiert werden. Wegen der verschiedenen Beinchen- und Leiterplattenbohrungsgeometrien sowie unterschiedlicher Werkstoffe ist eine große Varianz der Entstückkräfte pro Pin zu erwarten.

Schrauben / Nieten:

Schrauben können, soweit sie nicht mit irreversibel abtrennbaren Medien gesichert (z.B. Lot), beschädigt oder gealtert sind, wieder geöffnet werden. Im Gegensatz dazu sind Niete formschlüssige Verbindungen, die nur teilzerstörend gelöst werden können. Die selektive Demontage der betroffenen Verbindungstechniken ist im allgemeinen bekannt und soll im weiteren nicht untersucht werden. Hingegen scheint das simultane Lösen der Schrauben und Nieten als interessant, wobei hier vor allem der teilzerstörende Prozeß des Abscherens in Frage kommt.

Abscheren von Beinchen:

Neben dem Abscheren von Schrauben und Nieten ist im allgemeinen das Abscheren von Bauelementebeinchen als vollständig simultane teilzerstörende Lösung zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit werden jedoch nur Anhaltswerte für die zu erwartenden Entstückkräfte gegeben. Detaillierte Untersuchungen sind in /48/ zu finden.

4.2 Rückbiegen von Bauelementepins bei der Entstückung von THD

Die Entstückkräfte bei der Demontage von THD werden durch Adhäsions- und Kohäsionskräfte im Lot sowie durch das Rückbiegen von Bauelementpins verursacht. Wie sich bei der Analyse der Entstückkräfte aufgeschmolzener Lötverbindungen in Kapitel 4.5 zeigen wird,

sind diese Kräfte gering. Bei der Entstückung von THDs bedingen sich die Kräfte vor allem durch die Rückbiegung der Bauelementbeinchen. Zum Prozeßverständnis wurde der Rückbiegevorgang in seinen einzelnen Prozeßphasen fotografiert (Bild 20).

Es wurde dazu eine Laborleiterplatte an einer Bohrungsreihe abgesägt, ein Testbauelement (IC, DIL-Gehäuse) gefügt und die Beinchen im 60° Winkel umgebogen. Dann wurde eine Greifmechanik angesetzt, mit deren Hilfe in mehreren Schritten das Bauelement von der Leiterplatte abgezogen wurde.

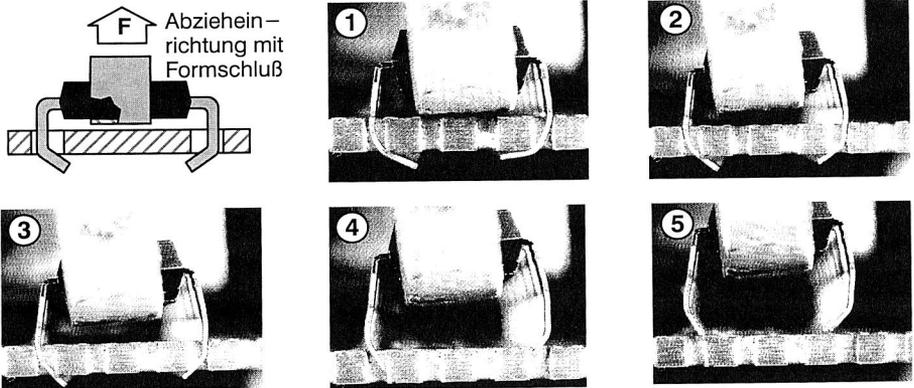


Bild 20: Demontagesequenz beim Rückbiegen von Bauelementepins

Es werden dabei fünf Phasen durchlaufen, wie sie in der Fotosequenz in Bild 20 zu beobachten sind.

1. *Anlegen der Beinchen unterhalb der Leiterplatte:* Es treten keine wesentlichen Entstückkräfte auf.
2. *Federndes Aufspreizen der Beinchen im Bohrungsbereich:* Durch den Kontakt zwischen Bauelementpin und Bohrungsunterkante wird eine Kraft verursacht, die mit Hilfe des kontaktfreien Beinchenabschnitts zum Bauelementgehäuse als Hebelarm ein Biegemoment erzeugt. Das Beinchen wird elastisch aufgebogen, bis der Krümmungsradius die Bohrungswand berührt.
3. *Rückbiegen der Beinchen:* Zwischen der Kontaktstelle des Radius an der Innenwand und dem Pin an der Bohrungsunterkante wird ein Biegeprozeß ermöglicht, der das Aufbiegen des Beinchens bewirkt.
4. *Durchziehen der Beinchen durch die Leiterplattenbohrung:* Das Pinende berührt die Bohrungswände und erzeugt durch die im elastischen, verformten Material gespeicherte Energie Normal- und Reibungskräfte.
5. *Rückfedern der Beinchen.* Die in den Beinchen gespeicherte Energie wird frei.

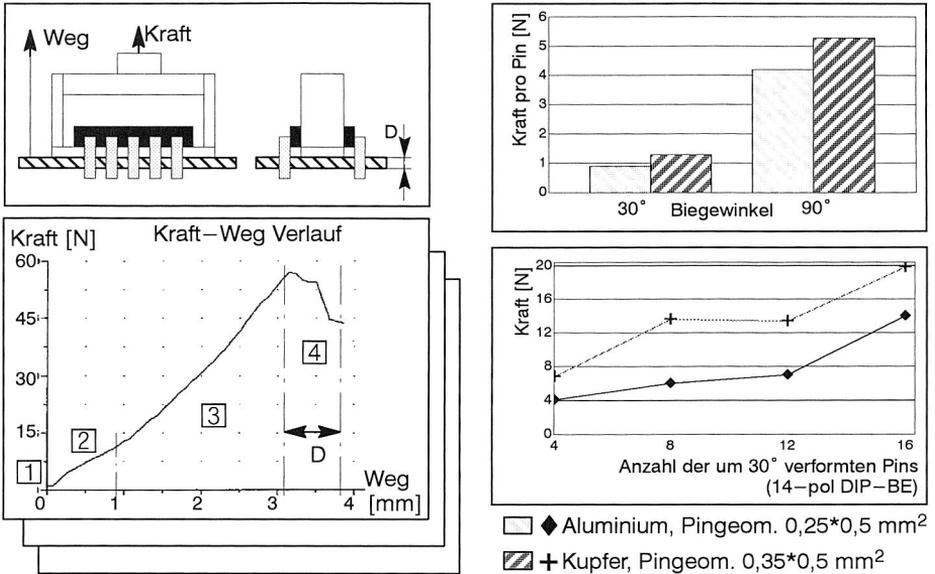


Bild 21: Rückbiegekräfte beim Entstückung durchgesteckter Bauelemente mit umgebogenen Pinenden

Zur Quantifizierung der Entstückkräfte wurden Bauelemente auf Leiterplatten montiert (ohne Lot) und diese auf einer Zugprüfmaschine abgezogen. In Bild 21 ist ein exemplarischer Kraft-Wegverlauf aufgetragen und die einzelnen Entstückphasen aus Bild 20 eingetragen. Die maximale Kraft liegt beim Übergang von Phase 3 zu Phase 4 vor. In Phase 4 werden die Beinchen durch die Leiterplattenbohrungen (Dicke D der Leiterplatte) gezogen. In detaillierten Analysen wurden die Abhängigkeiten der Entstückkräfte vom Biege- und Verformungswinkel, den Beinchenmaterialien und -geometrien herausgearbeitet. Prinzipiell ist festzustellen, daß die Entstückkraft mit dem Biege- und Verformungswinkel und der Anzahl der verformten Pins zunimmt [28].

4.3 Lösekräfte von kraft- (reib-)schlüssigen Verbindungen

Zur Verbindung von Bauelementen mit der Leiterplatte werden eine Vielzahl unterschiedlicher Steck- und Einpreßverbindungen eingesetzt [56, 122, 123, 128]. Im Rahmen dieses Abschnitts sollen insbesondere die Trennkräfte zwischen Bauteil und Leiterplatte am Beispiel des Einpreßstiftes analysiert werden. Steck- und Sockelsysteme hochwertiger ICs werden nicht direkt mit der Leiterplatte verbunden und werden deshalb von der Analyse ausgeschlossen.

Die wesentlichen, den Ein- und Auspreßvorgang bestimmenden Prozeßparameter sind die Reibzahlen zwischen den Oberflächenwerkstoffen (z.B. Zinn-Zinn, Zinn-Gold), die Größen

der Bohrungen, die Leiterplattendicke und des Stifts sowie das elastische Verhalten des Einpreßstifts (Werkstoff, Gestaltung). Die Geometrien in den elastischen Einpreßbereichen variieren zwischen den Herstellern und sollen hier nicht genauer diskutiert werden /128/.

Zur zerstörungsfreien Entstückung von Einpreßstiften ist es wichtig, die maximalen zu erwartenden Kräfte zu erfassen. In Bild 22 ist das Kraft–Weg–Diagramm zur Montage und Demontage eines Tcom–Stifts in einer Multilayerleiterplatte mit 3,2 mm Dicke und 1,04 mm Lochdurchmesser wiedergegeben.

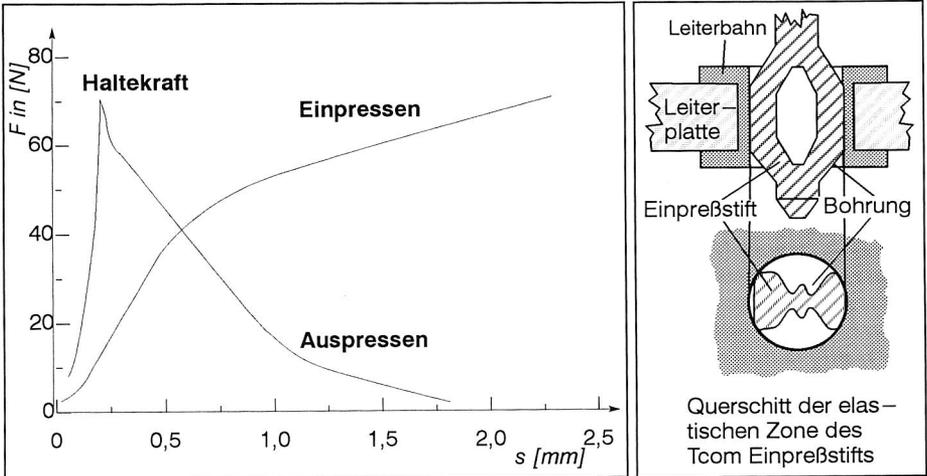


Bild 22: Kraft–Wegdiagramm beim Einpressen bzw. Ausdrücken eines Tcom–Einzelstifts in eine Multilayerleiterplatte (Dicke 3,2mm, Ø1,04mm) /57/

Das Maximum des Kraft–Wege–Diagramms des Auspreßvorgangs wird durch das Überwinden der Haltekraft bestimmt. Wie in der Literatur beschrieben, ist die Haltekraft (bzw. auch die max. Einpreßkraft) stark abhängig von dem Bohrungsdurchmesser in der Leiterplatte. In verschiedenen Messreihen wurde in Abhängigkeit von der Leiterplattendicke und des Lochdurchmessers eine Reduktion um 45 % (Dicke 3,2mm, Vergrößerung des Ø von 0,94mm auf 1,1mm) festgestellt /128/.

4.4 Abscheren von Verbindungselementen

Im Rahmen der teilzerstörenden Demontage besteht die Möglichkeit, die verschiedenen Verbindungselemente zwischen dem Bauelementgehäuse und der Leiterplatte durch Scherschneiden zu lösen. Um Abschätzungen der zu erwartenden Entstückkräfte zu ermöglichen, wurden an Bauelementen verschiedener Geometrien Scherversuche durchgeführt

Zur Messung der Kräfte zum Abscheren der Bauelementbeinchen wurde dazu eine Leiterplatte mit der Rückseite nach oben auf die Arbeitsfläche eines Schertesters aufgespannt und die Enden der durchgesteckten Bauelemente (THD!) abgeschoren. Versuchsaufbau und Ergebnis sind in Bild 23 wiedergegeben. Festzustellen war, daß das Verdrängen des Lots keine nennenswerten Scherkräfte erfordert. Die maximalen Scherkräfte wurden allein durch das Abscheren der Pins verursacht. In Abhängigkeit vom Beinchenmaterial treten beim Abscheren eines Bauelements der Gehäuseform DIL 14 (Pinmaterial: Kupferlegierung; Geometrie: 0,35mm*0,5mm) Kräfte zwischen 45N und 65N auf. Als Durchschnittswert konnte 54N berechnet werden.

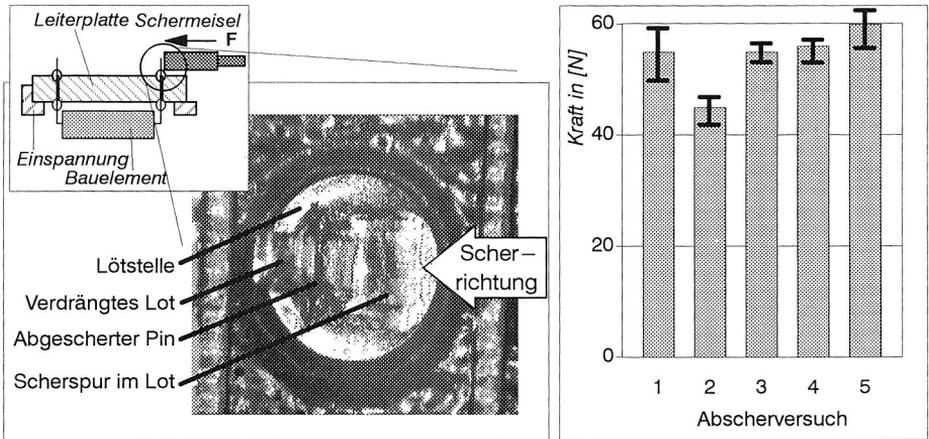


Bild 23: Versuchsaufbau und -ergebnisse zum Abscheren von Bauelementbeinchen /29/

In /48/ werden Versuche zum Abscheren von Schrauben und Nieten beschrieben. Die aufgetretenen Scherkräfte wurden am Beispiel einer M4 Schraube gemessen und beliefen sich auf 5000N.

4.5 Lösen von stoffschlüssigen Verbindungen in Abhängigkeit von der Wärmeinbringung

4.5.1 Aufschmelzen und Entstückten von Lötverbindungen

Die in der Elektronikfertigung eingesetzten Weichlote sind überwiegend naheutektische Legierungen von Zinn und Blei (L–Sn60 Pb40 oder L–Sn63 Pb37), die mit ca. 183°C den niedrigsten Schmelzpunkt aller Zinn–Bleilegierungen besitzen /33, 156, 61/. Durch das Einbringen von Wärme wird die Schmelztemperatur des Lots überschritten und die Lötstelle aufgeweicht.

Um die Prozeßbedingungen vollständig zu beschreiben, müssen die Entstückkräfte (Zug-/ Scherkraft) in Abhängigkeit von der Temperatur im Lot bestimmt werden. In [52] wurden für verschiedene Bauelemente Zugkraft-Temperaturkurven gemessen. Dabei wurden verlötete (Sn/Pb Legierung) THD- und SMD-Bauelemente in eine Zugprüfmaschine eingespannt und der gesamte Aufbau in einer Wärmekammer gekapselt. In den Versuchen wurden die Lötstellen definierten Temperaturverhältnissen ausgesetzt und die Abzugkräfte zum Lösen des Leiterplatten-Bauelementverbunds gemessen (Bild 24).

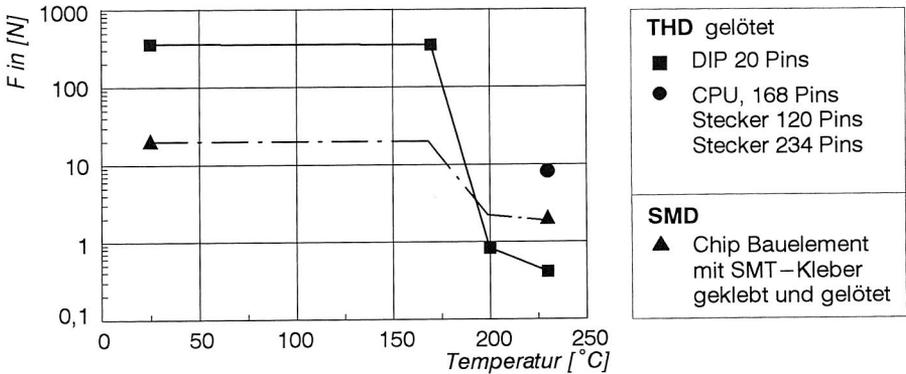


Bild 24: Zugkraft – Temperaturverlauf beim Aufschmelzen beim Entstücken von THT und SMT Bauelementen [52]

Am Beispiel eines DIP Bauelements mit 20 Pins wurden vier Messungen durchgeführt. Bis knapp unterhalb des Schmelzpunktes werden Entstückkräfte um 300N gemessen, die bei dessen Überschreitung auf ca. 1N abfallen. Vergleichend dazu wurde eine Versuchsreihe am Beispiel eines SMD-Chip Bauelements durchgeführt, welches neben der Lötverbindung zusätzlich mit SMD-Kleber an der Leiterplatte fixiert war. Zu beobachten ist ebenfalls ein Abfall der Entstückkräfte von ca. 30N bei Raumtemperatur auf 3N bei 230°C. Die höheren Kräfte oberhalb der Aufschmelztemperatur sind auf das Klebeverhalten des SMD-Klebers zurückzuführen. Die Entstückkräfte bei der Demontage hochpoliger TH Bauelemente (120, 168 und 234 Pins) belaufen sich bei Lottemperaturen von 230°C auf knapp 10N.

4.5.2 Lösekraft-Temperaturbeziehungen bei Leitklebeverbindungen

Über die physikalischen Eigenschaften von Leitklebeverbindungen bei der Demontage lassen sich einige allgemeingültige Aussagen machen. Prinzipiell weisen Epoxidharze eine hohe Klebschichtfestigkeit und eine hohe Wärmebeständigkeit auf. Sie durchlaufen mit steigender Temperatur keine charakteristischen Zustandsbereiche, weshalb die Festigkeitsparameter Zugfestigkeit und E-Modul nur mäßig und weitgehend linear sinken. Erst mit Annäherung an die Zersetzungstemperatur beginnt die irreversible Zerstörung der chemischen Bindungen innerhalb der Makromoleküle. Mit Dauergebrauchstemperaturen von

150°C sowie kurzen Temperaturspitzen von 350°C können Leitklebeverbindungen auf Epoxidharzbasis durchaus belastet werden /39, 129, 154/.

Durch die fast unbeschränkte Variationsmöglichkeiten zwischen Harz, Härter, Zusätzen und Leitpigmenten können verschiedenste Formulierungen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften hergestellt werden, die jedoch aufgrund des chemischen Aufbaus der Polymermatrix allesamt als Epoxidleitklebstoffe bezeichnet werden /39/. Für jeden Kleber muß das spezifische Eigenschaftsprofil erarbeitet werden, welches direkt auf die Parameter im Entstückprozeß Einfluß nimmt.

Aus diesem Grund wurden am Beispiel ausgewählter Klebstoffe verschiedene Meßreihen durchgeführt, um die real auftretenden mechanischen Kenngrößen (Scher- und Zugkräfte) bei Raumtemperatur zu erarbeiten (siehe dazu /76/).

Scherkräfte zum Lösen von leitgeklebten elektrischen Verbindungen

Da Versuche nur mit neuen Klebstoffen durchgeführt werden konnten, wurden, um eine Abschätzung des Langzeitverhaltens der Klebestellen und damit die tatsächlich zu erwartenden Entstückkräfte kennen zu lernen, verschiedene Umweltsimulationstests im Klimaschrank durchgeführt und mit den Ausgangswerten verglichen.

Klebstoff	Harz	Leitpigmente	Partikelgröße	Herst.ang.: Scherkraft [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	Aushärtbeding. [°C/min]	Klebervol. per Pad 1206/SO8 [mm ³]
A	Epoxy, 1Komponente	Silber, 79% (w)	< 15µm	–	2	120/30, 150/10	0,2/ 0,11
B	Epoxy, 2Komponenten	Silber, 80% (w)	ca. 20µm	15,3	3,5	120/15 150/4	0,2/ 0,11
C	Epoxy, 1Komponente	Silber, 70-80 % (w)	< 20µm	10,3	2,1	150/15 160/5	0,12/ 0,11

Tabelle 9: Ausgewählte Leitklebstoffe und deren Verarbeitungsparameter (fett gedruckt) in den Versuchen, siehe auch /76/

Dazu wurden drei Leitklebstoffe mit der in Tabelle 9 dargestellten Formulierung ausgewählt und mit den ebenfalls angegebenen Parametern verarbeitet. Als Testbauelemente wurden Bauelemente des Gehäusetyps 1206 und SO8 verarbeitet. Beide Bauelemente standen nur mit verzinnnten Beinchen zur Verfügung (SnPb). Die Testleiterplatten bestanden aus FR4-Material mit 35µm Kupfer und 2µm Zinn-Bleioberflächenbeschichtung. Mit den gleichen Versuchsrandbedingungen wurden parallel dazu Untersuchungen mit verlöteten Bauelementen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 25 zusammengefaßt.

Aus den Meßergebnissen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Scherkräfte der Verbindungen sind abhängig vom Bauelementtyp und werden neben den mechanischen Eigenschaften der Verbindungsmedien vor allem über die benetzte

und zur Verbindung benutzte Fläche definiert. Am Beispiel des Chipbauelements waren keine nennenswerten Unterschiede der Scherkräfte zwischen Leitklebeverbindung und Lötverbindung zu messen. Die Scherkräfte zum trennen des Gehäuses SO8 waren grundsätzlich erheblich niedriger, wobei ein signifikanter Unterschied der mechanischen Eigenschaften zwischen Kleben und Löten sichtbar wurde.

- Die Umwelttests beeinträchtigten die mechanischen Eigenschaften der Lötstellen. Die Festigkeitsabnahme ist durch Gefügeänderungen zu begründen (Wachstum der intermetallischen Phasen, Ausscheiden von Sekundärarmischkristallen etc. /129). Die Leitklebstoffe hingegen reagierten sehr unterschiedlich auf die unterschiedlichen Beanspruchungen. So ist z.B. am R1206, mit Kleber A geklebt, eine starke Zunahme der Scherkräfte zu verzeichnen, ganz im Gegensatz zu Kleber C, bei welchem die anfangs hervorragenden mechanischen Eigenschaften erheblich abnahmen.

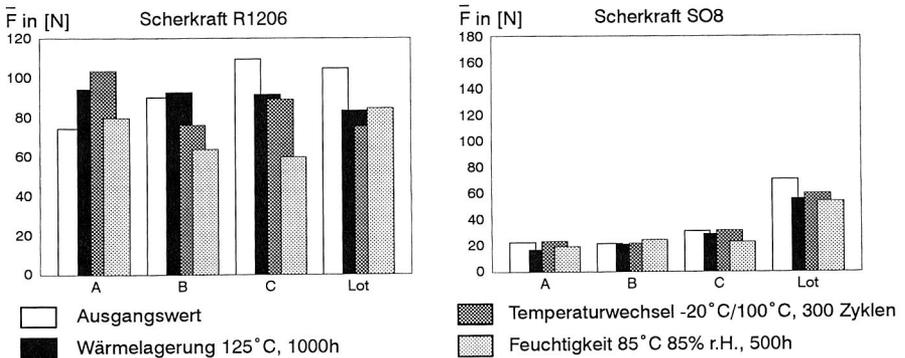


Bild 25: Änderung der Scherkräfte von Leitklebeverbindungen und Lötstellen bei Raumtemperatur vor und nach Umweltsimulationstests [76]

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß Leitklebeverbindungen im Schertest bei Raumtemperatur im Durchschnitt das Scherfestigkeitsniveau von Lötstellen nicht übersteigen bzw. im erheblichen Maße unterschreiten. Klimatische Einflüsse schwächen oder erhöhen die Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Formulierung, direkte Abhängigkeiten sind jedoch nicht erkennbar. Herauszustellen bleibt, daß diese Untersuchungen ohne Einfluß von Temperaturen durchgeführt wurden. Es ist jedoch eine erhebliche Reduktion der Scherfestigkeit und damit eine Minimierung der einzubringenden Entstückkräfte zu erwarten.

4.5.3 Kraft–Temperaturverhältnisse beim Lösen von Bauelementen in C&W–Technik

Die Chip & Wire Technologie (C&W) ist die älteste und mit Abstand am häufigsten eingesetzte COB Technologie. Aus diesem Grund beschränken sich die folgenden Untersuchungen zu den auftretenden Entstückkräften speziell auf C&W. Um den Chip vollständig aus dem Verbund zu lösen, müssen drei Prozessschritte durchgeführt werden:

1. der Glob Top muß aufgelöst werden,

2. die Drähte müssen entfernt werden,
3. der Chip muß demontiert werden.

Lösen des Globtop:

Das Lösen von Globtops auf chemischem oder mechanischem Wege scheint wegen der besonderen Resistenz gegenüber Umweltauswirkungen und mechanischen Belastungen schwierig. Wie in /18/ beschrieben, wurde aus diesen Gründen begonnen, Glob Tops aus thermoplastischem Material zu entwickeln. Diese können dann in einen bestimmten Temperaturbereich aufgeweicht und abgetrennt werden.

Lösen der Drähte:

Die Abreißkräfte der Kontaktdrähte (Durchmesser 25 bzw. 30 μm) werden durch einen Pulltest bestimmt. Dabei wird ein Draht (die Wires sind typischerweise aus AlSi1 oder Au) mit einem Haken erfaßt, an dem mit zunehmender Kraft in definiertem Winkel gezogen wird. Die dabei auftretenden Kräfte sind in Tabelle 10 zusammengefaßt. Zusätzlich wurden die Scherkräfte zum Lösen der Ball-Bondstellen gemessen und ebenfalls in die Tabelle aufgenommen /84/.

Werkstoff	Durchmesser [μm]	Bondkraft [cN]	Bondzeit [ms]	Abreißkraft [mN]	Scherkraft [cN]
Au	25	40	50	80–90	50–60
AlSi1	30	50–70	50	80–120	–

Tabelle 10: Übersicht über Abreiß- und Scherkräfte von Bonddrähten in Abhängigkeit von Werkstoff, Drahtdurchmesser und Bondparameter /84/

Abziehen/-drücken leitgeklebter Chips

Um die Abziehkräfte zu erfassen, wurden mit Hilfe einer Zug-/Druckprüfmaschine (Maximalkraft 10 kN), die zusätzlich mit einer Umluft-Temperaturkammer ausgestattet war, verschiedene Druckversuche durchgeführt. Das mit einem nackten Chip beklebte (Leitkleber, siehe Bild 26) Substrat, welches mittig zum Chip mit einer Bohrung versehen war, wurde dazu kopfüber in eine Halterung eingelegt und mit einem Druckstempel, der durch die Bohrung mit den Chip in Kontakt gebracht wurde, abgedrückt. Die dabei entstehenden Entstückkräfte wurden bei verschiedenen Temperaturniveaus im Bereich zwischen 90– und 150°C gemessen. Dazu wurden die Proben in der Temperaturkammer eine definierte Zeit vorgewärmt, so daß von einer homogenen Aufheizung der Probe ausgegangen werden konnte. Die Meßergebnisse sind in Bild 26 wiedergegeben.

Es lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die vom Hersteller angegebene Glastemperatur des Leitklebers (103°C) konnte durch die lineare Abnahme der Zugkräfte nicht bestätigt werden.
- Die durch den Stempel punktuell eingebrachten Entstückkräfte zerstörten bei höheren Druck die keramischen Bauelemente. So waren Messungen unter 90° nicht möglich.
- Während der Untersuchungen war festzustellen, daß der Leitkleber immer am Chip haftet.

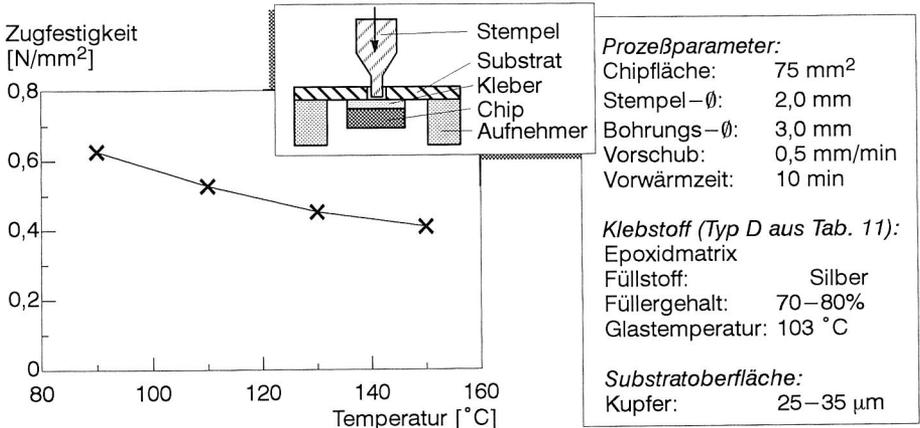


Bild 26: Abdruckkräfte bei der Demontage von leitgeklebten Chips in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

Abscheren leitgeklebter Chips:

In MIL–STD–883 D, Methode 2019.5 wird ein Meßverfahren zur Bestimmung der Scherkraft pro Fläche vorgeschlagen, welches von vielen Leitkleberherstellern als standardisiertes Bezugsverfahren herangezogen wird.

Klebstoff	Harz	Leitpigmente	Glasübergangstemp. [°C]	Herst.ang.: Scherfestigkeit [N/mm ²] bei RT	Aushärtbedingungen [°C/min]	Naßschichtdicke [µm]
D	Epoxy, 1 Komponente	Silber, 79% (w)	103	28	125/135	75
E	Epoxy, 1 Komponente	Silber, 80% (w)	>100	>4	125/45	75
F	Epoxy, 1 Komponente	Silber, 70-80 % (w)	80	7	125/135	70
G	Thermoplast	Silber	25	15	150	125

Tabelle 11: Ausgewählte Leitklebstoffe zur Fixierung von ungehäuteten Chips auf Schaltungsträger und deren Verarbeitungsparameter in den Versuchen

Dabei wird ein auf ein Substrat geklebter Testkörper mit Hilfe eines Schertesters bei Raumtemperatur abgelöst. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Meßmethode gewählt, um die Scherfestigkeit verschiedener Klebstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur zu bestimmen. Als Testkörper wurden Chips gleicher Dimensionen mit unterschiedlichen Klebstoffen auf verkupferte Substrate geklebt und unter Einwirkung verschiedener Temperaturen abgeschoren. Die Formulierungen und wesentlichen Eigenschaften der Kleber können Tabelle 11 entnommen werden, die Meßkurven in Bild 27 geben das Scherverhalten der verschiedenen Klebstoffe unter Temperatureinfluß wieder.

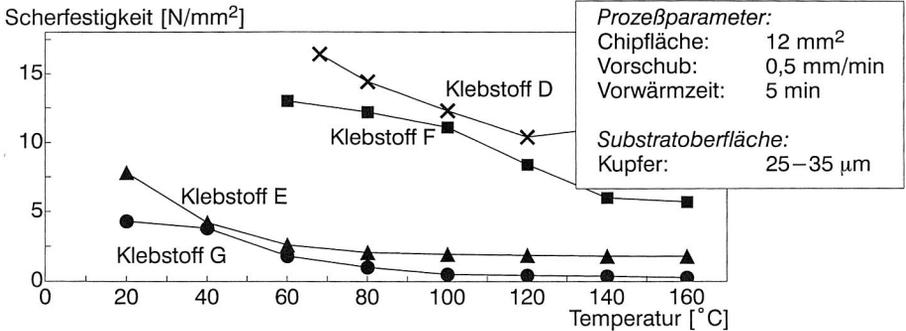


Bild 27: Scherfestigkeit verschiedener Leitklebstoffezur Kontaktierung von Dice auf Substraten in Abhängigkeit von der Entstücktemperatur

Es kann prinzipiell festgestellt werden, daß der thermoplastische Leitklebstoff bei einer hohen Scherfestigkeit bei Raumtemperatur (RT) im gesamten Temperaturbereich die niedrigsten Entstückkräfte aufweist. Besonders zu beachten sind die extrem unterschiedlichen Scherkräfte für duroplastische Leitkleber im gemessenen Temperaturbereich. Die Herstellerangaben bzgl. der Glasübergangstemperatur sind in den Kurven schwer nachzuvollziehen. Es gilt jedoch immer (Ausnahme: Klebstoff D) die Aussage, daß bei zunehmender Temperatur die Scherfestigkeit abnimmt.

4.5.4 Lösekraft–Temperaturbeziehungen bei SMT–Klebestellen

In /72/ wird eine Versuchsreihe vorgestellt, die die Entstückkraft bei der lotrechten Demontage eines nur mit SMD–Klebspunkten fixierten SMD1210 Bauelements beschreibt.

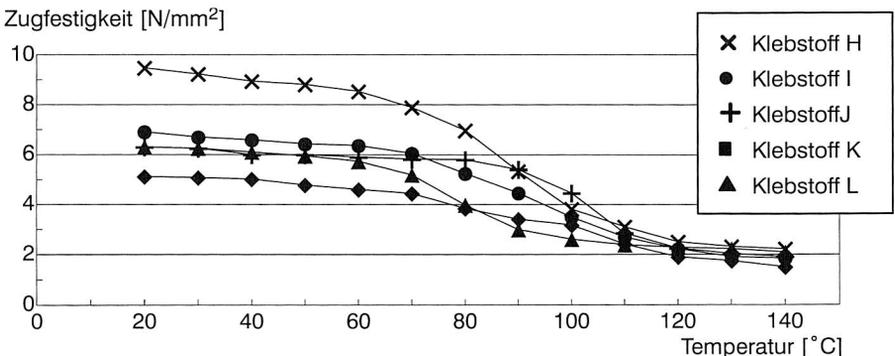


Bild 28: Zugfestigkeit verschiedener SMD–Klebstoffe unter Temperaturbelastung; Bauelementgehäusetyp:1210; SMD–Klebertropfen–Ø: 2,0mm; nach /72/

Die daraus ableitbaren Festigkeitswerte für fünf SMD Klebstoffe in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur sind in Bild 28 zusammengestellt. Für alle Klebstoffe ist deutlich ein Abfall der Zugfestigkeiten unter 3N/mm² bei zunehmendem Temperatureinfluß festzustellen.

4.6 Gegenüberstellung der Demontagekräfte und Diskussion

Die beschriebenen Demontagekraftmessungen sind nicht an einheitlichen Bauteilen in gleichen Versuchsbedingungen bestimmt worden. Die Gründe sind in den verschiedenen Einsatzgebieten der Verbindungstechniken und in der beschränkten Verfügbarkeit der Testmöglichkeiten im Rahmen dieser Arbeiten zu suchen. Um annähernde Vollständigkeit zu erreichen, wurde deswegen auf die Literatur zurückgegriffen und die Ergebnisse geeigneter Meßreihen aufgenommen, die die erhebliche Varianz der Prüfkörper verursachen. Die Vergleichbarkeit der Entstückkonzepte ist dadurch maßgeblich erschwert. Die in Kap. 4.2 ff. zusammengestellten Kenngrößen sind daher eher als Anhaltswerte zur Dimensionierung eines Entstücksystems zu betrachten.

Schlußart	Verbind.-element	Demontagemöglichkeiten				Zerstörungsgrad \rightarrow
		<i>nicht zerst.</i>	<i>teilerstörend</i>		<i>zerstörend</i>	
Kraftschluß	Reibung	Kraft entgegen der Reibkraft		—		Anschlußbeinchen abschneiden
Stoffschluß	Lot	—	Lot erwärmen u. Zugkraft	—	Lötstelle abscheren	
	Kleben	—	Kleber erwärmen u. Scherkraft	Kleber chemisch lösen	Klebstelle abscheren	
Formschluß	Pins, gebogen	Pins aufbiegen	—	—	—	Baulemente oder Leiterplatte Span abhebend bearbeiten
	Schraube	Schraube/Mutter lösen	—	Schraube ausbohren	Mutter oder Schraube abschneiden	
	Niet	—	—	Niet ausbohren	Nietkopf unten oder oben abschneiden	

Tabella 12: Auswahl einer Demontageprozeßstruktur mit Hilfe des morphologischen Kastens (kursiv: ausgewählte Demontageprozesse)

Die Konfiguration der Demontageprozesse eines automatisierten Entstücksystems stützt sich auf den in Kap 4.1 erarbeiteten morphologischen Kasten, der die Vielvalt der zur Verfügung stehenden Demontageprozesse für jede Fügeschlußart zusammenfaßt. In Tab. 12 ist der morphologische Kasten nochmals wiedergegeben, ist aber durch eine Kombination verschiedener Demontageprozesse ergänzt (dick gezeichnete Linie).

Die Auswahl der Prozeßkette beruht auf folgenden Auswahlkriterien:

- Wiederverwendbare Bauelemente und solche, die spezifischen Materialfraktionen zugewiesen sind (Vermeiden der Zerstörung von Sortierkriterien), sollen soweit als möglich zerstörungsfrei entstückt werden.
- THD und SMD sollen mit Hilfe von Wärme und Zugkräften von der Leiterplatte gelöst werden.

- Scherkräfte eignen sich gut zum Trennen von Klebeverbindungen, Schrauben und Nieten. Durch die Einbringung von Wärme reduzieren sich die Entstückkräfte von Klebeverbindungen.

Die im folgenden Kapitel dargestellten Entwicklungen mechanischer Systeme beziehen sich ausschließlich auf die Demontage von THDs und SMDs mit Hilfe von Wärme und Zug- bzw. Scherkräften.

4.7 Wärmeeinbringung zum Lösen von stoffschlüssigen Verbindungstechniken

Zum Aufschmelzen von stoffschlüssigen Verbindungen in der Demontage stehen alle aus der Montage und Reparatur bekannten Verfahren zur Verfügung. Zu unterscheiden ist nach der Art der Wärmezufuhr und nach der Art der Wärmeübertragung.

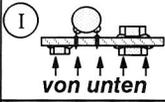
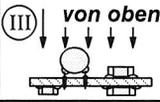
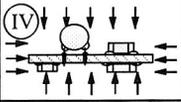
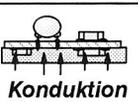
Wärme- übertragung \ Wärme- Zufuhr	(I)  von unten	(II)  selektiv, oben	(III)  von oben	(IV) 
 Strahlung	Infrarotstrahlen	LASER	Infrarotstahler Quarzstrahler	Infrarotstrahlen
 Kondensation	-	-	-	Dampfphase
 Konduktion	Flamme Heizplatte Lötwellen Lötbad	Stempel selektive Lötwellen selektives Lötbad	Bügel	-
 Konvektion	-	Heißgasdüse	Heißluft Heißgas	Heißluft Umluft Heißgas

Bild 29: Reflowlötverfahren für SMD's [33]

In der Löttechnik sind vier Wärmeeinbringungsprinzipien zum Aufschmelzen von Lötstellen bekannt: Wärmetransport durch Strahlung, Kondensation, Kontakt und Konvektion. Die Wärme kann prinzipiell flächig oder selektiv von oben bzw. unten eingebracht werden, oder auch die gesamte Umgebung aufgeheizt werden. In Bild 29 sind die verschiedenen Lötverfahren aus dem Fertigungsbereich eingeordnet. Eine detaillierte Beschreibung ist in /61, 156/ zu finden.

Um die Eignung der Entlötverfahren für die automatisierte Demontage zu bewerten, sind diese anhand zentraler Auswahlkriterien wie: minimale Taktzeiten, schonende Entlötung

(speziell bei selektivem Entstücken), keine Überhitzung der Bauelemente die zum Entzünden der Materialien führen kann zu diskutieren. In Bild 30 sind die Taktzeiten der gebräuchlichsten Verfahren den angestrebten Temperaturniveaus gegenübergestellt. Zu beobachten sind hohe Prozeßzeiten bei Massenlötverfahren wie Infrarot und Dampfphase, denen kurze Taktzeiten bei den Verfahren der selektiven Demontage (LASER, Stempel) gegenüber stehen.

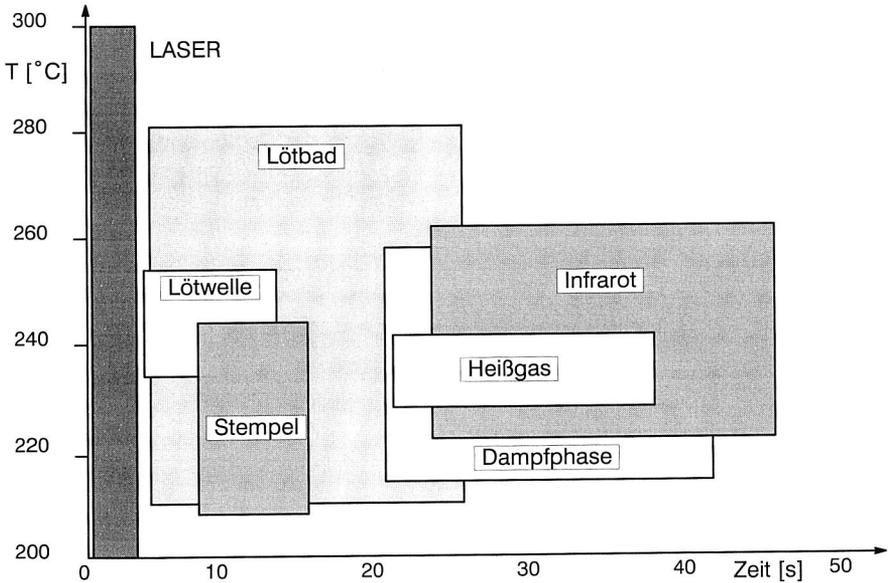


Bild 30: Gegenüberstellung der Prozeßtemperaturen und der Prozeßzeiten von Lötverfahren; nach /61, 72/ und eigenen Messungen

Eine detaillierte und problemspezifische Auswahl geeigneter Wärmeeinbringungsmethoden wird in dem folgenden Kapitel in die jeweilige Gestaltung der selektiven und simultanen Demontageprozesse einbezogen. Dabei finden Prozesse mit kurzer Taktzeit bei selektiven Anwendungen und Prozesse mit erheblich längeren Taktzeiten im Rahmen von simultanen Durchlaufverfahren Einsatz.

5. Systematische Entwicklung automatisierter Entstücksysteme und –prozesse

In den vorhergehenden Kapiteln wurde der Bedarf zur automatisierten Demontage hergeleitet. Es wurde ein Anlagenkonzept vorgestellt, welches sich in:

- die selektive Demontage wiederverwendbarer Bauelemente und
- die simultane Demontage zur werkstofflichen Fraktionierung der Bauelemente

untergliedert. In den folgenden Ausführungen werden die prozeßorientierten Entwicklungen dargestellt. Dazu werden Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, die zu mathematischen Prozeßmodellen führen. Diese werden dann zur optimalen Auslegung der Prozeßparameter sowie zur Dimensionierung der Anlagentechnik herangezogen. In den darauf folgenden Kapiteln werden die im Rahmen des Anlagenkonzepts vorgeschlagenen Identifikationssysteme entwickelt.

5.1 Entwicklung eines Systems zur selektiven Demontage elektronischer Flachbaugruppen

Aufgabe der selektiven Demontage ist es, wiederverwendbare Bauelemente von einer Leiterplatte zu entfernen. Der Schwerpunkt der folgenden Entwicklungen liegt dabei beim Lösen von Lötverbindungen und soll am Beispiel der oberflächenbestückten Bauelemente dargelegt werden. Die im folgenden beschriebene Methodik zur Systementwicklung kann jedoch auch auf weitere Demontageaufgaben im Bereich des Schaltungsträgerrecyclings herangezogen werden.

Um ein Bauelement von einer elektronischen Flachbaugruppe lösen zu können, müssen sowohl die Lagekoordinaten als auch der Drehsinn des zu lösenden Bauelements bekannt sein. Ein Mustererkennungssystem, das diese Aufgabe erfüllt, wird in Kap. 5 entwickelt. Um das jeweilige Bauelement zu entfernen, wird ein Handhabungsgerät mit mindestens vier Freiheitsgraden benötigt. Diese definieren sich als:

- x, y Achse: Positionieren des Bauelements zum Werkzeug,
- Drehachse um 90° : Orientierung des Bauelements zum Werkzeug,
- z–Achse: In und aus dem Eingriff bringen des Werkzeugs.

Neben diesen rein kinematischen Funktionen sind ergänzende Komponenten in das System zu integrieren. Zum Aufschmelzen des Lotes muß Wärme eingebracht werden; das Werkzeug muß das Bauelement greifen können, falls mehrere Werkzeuge benötigt werden, müssen diese gespeichert werden, der anlageninterne Transport sowie die Abführung der demontierten Bauelemente der Leiterplatte müssen ermöglicht werden (Bild 31).

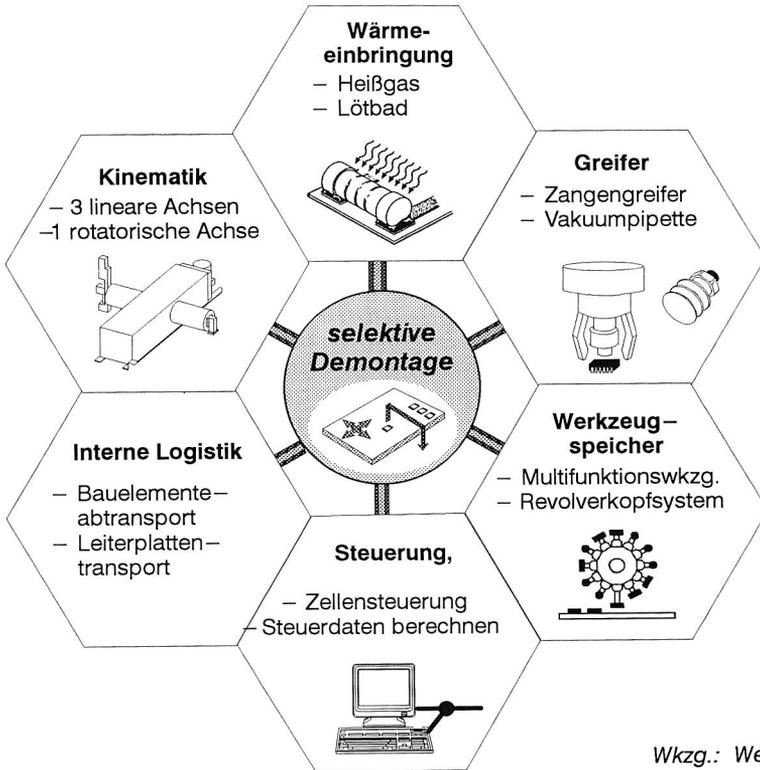


Bild 31: Komponenten einer automatisierten selektiven Demontageanlage zur Entstückung elektronischer Flachbaugruppen

Zusätzlich muß das gesamte System durch eine koordinierende Einheit gesteuert werden. Diese wiederum muß den Entstückdatensatz aus einem bis dato undefinierten Mustererkennungssystem entgegen nehmen und in Steuerbefehle umsetzen können. Im folgenden sollen die einzelnen Komponenten:

- methodische Entwicklung einer Kinematik,
- Wärme-einbringung und Integration mit dem Greifer und
- Steuerung

entwickelt werden.

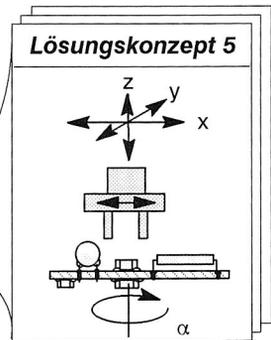
Methodische Auswahl eines kinematischen Konzepts

Zur Erfüllung der gestellten Demontageaufgabe genügen vier Achsen, die beliebig zur Manipulation des Werkzeugs oder des Schaltungsträgers benutzt werden können. Um Werkzeug und Werkstück zueinander richtig auszurichten, gibt es verschiedene Lösungsmög-

lichkeiten. Es können z.B. alle Achsen zur Handhabung des Schaltungsträgers verwendet werden, wobei der Greifer nicht bewegt wird. Dasselbe gilt auch für eine vollständig vertauschte Aufgabenteilung. Es gibt theoretisch sechzehn (2^4) Lösungen um die vier Achsen zur Handhabung von Werkzeug oder Werkstück zu kombinieren. Sie ergeben sich aus den folgenden kombinatorischen Möglichkeiten:

- Positionieren der Leiterplatte oder des Greifers.
- Bewegung des Greifers oder der Leiterplatte in z–Richtung.
- Orientierung der Leiterplatte oder des Greifers.

	Positionieren		Z–Hub		Orientierung	
	Greifer	LP	Greifer	LP	Greifer	LP
1	x		x		x	
2		x	x		x	
3	x			x	x	
4		x		x	x	
5	x		x			x
6		x	x			x
7	x			x	x	
8		x		x		x



x: in Kombination ausgewählt

Bild 32: Systematische Auswahl von kinematischen Konzepten in der selektiven Demontage

Bei der detaillierten Auswahl wurden Lösungen mit verteilten x–y Positioniereinheiten schon vorab aus den Lösungskatalog herausgenommen, da sich daraus offensichtlich keine entscheidenden Vorteile ableiten lassen (siehe auch Systeme in der Bestücktechnik /7 138/). Der Lösungsraum reduziert sich dadurch auf $2^3 = 8$ Möglichkeiten.

Zur Ableitung geeigneter Konzepte darf jedoch nicht allein die Kinematik in Betracht gezogen werden, sondern auch die Möglichkeiten der Wärmeeinbringung. Dies begründet auch die nur eingeschränkten Möglichkeiten zur Adaption von Systemlösungen aus der Montage elektronischer Bauelemente, wo Bauelemente in hoher Stückzahl und Genauigkeit auf die Oberfläche gesetzt werden, das Verlöten durch Wärmeeinbringung jedoch als nachgeschalteter Prozessschritt erfolgt.

Möglichkeiten der Integration der Wärmeeinbringung in einen Entstückgreifer

Ein wichtiger Aspekt in der Entwicklung selektiver Demontagezellen für Flachbaugruppen ist die zeitparallele Einbringung von Wärme und Entstückkräften. Dies gewinnt an Relevanz durch die Erkenntnis, daß aufgeschmolzene Lötstellen, sobald die Wärmezufuhr gestoppt wird, sehr schnell erhitzen und die Bauelemente somit nicht mehr zerstörungsfrei demonstert werden können. Um dies zu vermeiden, muß die Lötstelle solange aufgeschmolzen

bleiben, bis das Bauelement entfernt wurde. Dies erfordert die integrierte Entwicklung von Wärmeeinbringungs- und Greifsystemen.

Auswahl des Wärmeeinbringungssystems

Zur Einbringung von Wärme stehen die in Kap. 4 dargestellten Verfahren zur Verfügung. Von Interesse sind hier zum einen die Verfahren mit eingeschränktem Wirkungsbereich (Bild 30, Spalte II) als auch die Verfahren, deren Wirkungsbereich unterhalb der Leiterplatte liegt (Bild 30, Spalte I). Zur Diskussion der verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten wird aus jedem Matrixfeld exemplarisch ein Wärmeeinbringungsverfahren ausgewählt und in Tabelle 13 übernommen. Dort werden die Verfahren anhand der Kriterien realisierbare Taktzeit, Kontakt mit dem Bauelement (Konfrontationszeit), Medienverbrauch und Verschmutzung von Bauelement oder Leiterplatte bewertet. Zusätzlich werden die Greifmöglichkeiten bzw. deren Behinderungen in die Tabelle mit einbezogen.

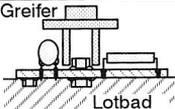
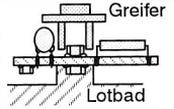
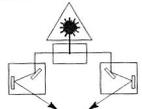
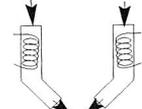
	Wärmequelle unterhalb der LP		Wärmequelle oberhalb der LP	
	simultanes Aufschmelzen im Lotbad	selektives Aufschmelzen im Lotbad	LASER	Heißgas
				
Taktzeit	+	+	++	0
Erhitzung v. BE	-	+	+	+
Medienverbrauch	-	0	+	+
Verschmutzung	-	0	++	++
Bewegungsfreiheit z. Greifen	++	++	0	0
Zusätzliche Kinematik	zusätzliche Hubachse zum Be- und Entschicken des Lötbad		Aufwendiges Spiegelsystem	in Abhängigkeit von Auslegung
Realisierungsaufwand	0	0	-	++
Realisierungsansätze		/109/	/72/	/38/

Tabelle 13: Systematische Bewertung und Auswahl von Entlötverfahren (++ sehr gut, + gut, 0 ausreichend, - schlecht, -- sehr schlecht)

Wie der Tabelle 13 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die verschiedenen Verfahren in ihrer Konzeption und dadurch auch in ihren spezifischen Eigenschaften erheblich. Jedes der Verfahren weist Vorteile auf, die in Abhängigkeit von der Zielsetzung deren Einsatz sinnvoll scheinen lassen. Ziel der hier beschriebenen Entwicklungen ist es vor allem die Durchgängigkeit eines automatisierten Systems zur Demontage von Leiterplatten aufzuzei-

gen und weniger komplexe, teure Systeme zu generieren. Aus diesen Grund wurde das schon in der Reparatur von Leiterplatten bewährte Konzept der Wärmeeinbringung durch Heißluft gewählt und Überlegungen zur Integration eines mechanischen Greifsystems durchgeführt, die im folgenden dargestellt wird.

Integration von Heißgas und Greifer

Als Greifsysteme kommen die aus der Montage bekannten Vakuumpipetten und form- oder reibschlüssige Greifsysteme in die engere Auswahl. In Versuchen wurde nachgewiesen, daß unter Beachtung der spezifischen Auslegungskriterien (Vakuum/Fläche; Reibschluß/Reibpartner) von allen Systemen die geforderten Kräfte zur Entstückung von SMD's aufgebracht werden. In Bild 33 sind einige Ansätze aufgezeigt, wie ein integriertes Heißgas-Greifsystem gestaltet sein kann.

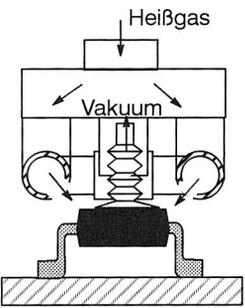
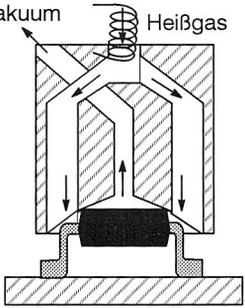
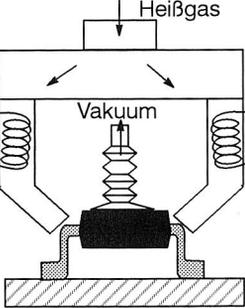
Eine flexible Düse	Mehrere starre Düsen	Pendelnde Düse
		
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel verschiebbar, • ein Werkzeug • Ausladende Konstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Starr • Schlanke Konstruktion • Werkzeugreservoir 	<ul style="list-style-type: none"> • Langsam, da selektives Erwärmen • Einfach zu realisieren • Hoher Steuerungsaufwand

Bild 33: Möglichkeiten zur Integration von Greifmechanismen und Wärmezufuhr

Konzept 1 beruht auf einem flexibel verstellbaren Düsensystem, aus welchem durch seitlich geschlitzte Rohre das Gas austritt und zu den Lötstellen strömt. Wegen der integrierten Mechanik wirkt der Aufbau eher volumnös und kann unter Umständen Kollisionen mit benachbarten Bauelementen verursachen /38/.

Konzept 2 basiert auf einem starren Düsensystem, durch welches das Gas sehr gezielt auf die Bauelemente ausströmt. Im Mittelteil ist eine großflächige Vakuumpipette integriert. Nachteilig wirkt sich die relative Unflexibilität gegenüber variierenden Bauelementgeometrien aus. Es muß also ein beschränkter Satz von Entlötwerkzeugen in einem Werkzeuglager zur Verfügung stehen /121/.

Konzept 3 besteht aus einem Düsenpaar, das entlang der Bauelementlötstellen pendelt und dadurch sequentiell die Lötstellen erhitzt. Die optimale Auslegung ist in /72/ be-

schrieben. Durch das Pendeln werden die Auslötzeiten verlängert. Der Steueraufwand eines solchen Systems ist ebenfalls größer.

Zum Aufbau eines Entstücksystems wurde auf Konzept 2 zurückgegriffen. Eine definierte Anzahl von Entlötwerkzeugen wird in einem Revolverlager zur Verfügung gestellt. Zur detaillierten Gestaltung der Heißgassystems sei auf die Untersuchungen in /72/ verwiesen.

Beispielhafte Realisierung eines selektiven Leiterplattenentstücksystems

Zur Realisierung des sequentiellen Entstücksystems wurde als mechanisches Grundgerüst ein teilautomatisierter Reparaturtisch gewählt, der den Anforderungen entsprechend erweitert wurde. Zum Entlöten stehen zwölf kombinierte Heißgasdüsen–Vakuumpipetten zur Verfügung, die an einem Revolverrundkopf angeordnet sind. Anhand einer Analysesoftware (Kapitel 6) kann das geeignete Werkzeug bestimmt und an die Werkstückeingriffposition gedreht werden. Zum Entlöten wird der Revolver pneumatisch vollständig abgesenkt.

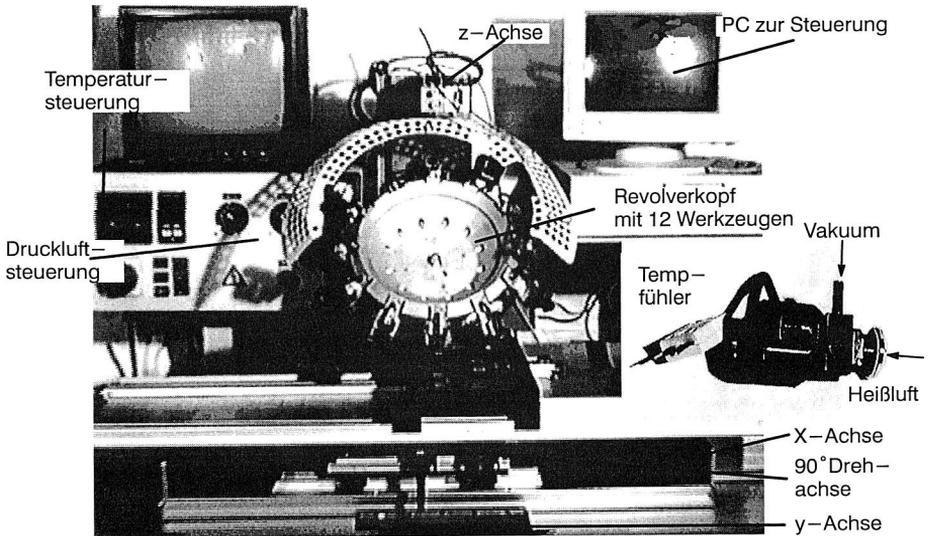


Bild 34: Darstellung des realisierten sequentiellen Demontagesystems

Vorher wird mit Hilfe des 3 achsigen Positioniersystems (x- und y-Linearachsen, 90° Schwenkachse (Schrittmotoren)) das zu entlötende Bauelement an die, aus der Analyse bekannten Position verfahren. Nachdem der Heißgasgreifer in Eingriff gekommen ist, werden durch ausströmende Heißluft (ca. 500°C) die Lötstellen aufgeschmolzen. Während des Aufschmelzprozesses wird das Vakuum des integrierten Greifers aktiviert und somit ein Kraftschluß erzeugt. Indem die pneumatische Absenkung des Revolvorkopfs deaktiviert wird, wird durch eine integrierte Rückstellfeder eine Zugkraft auf das Bauelement übertragen. Nach dem Aufschmelzen wird dadurch das Bauelement ohne zusätzliche sensorische Überwachung entstückt. Das Bauelement wird dann auf ein Transportband abgelegt und

aus dem Prozeßraum transportiert. Danach kann das nächste Werkzeug in die Entstückposition gefahren und über dem nächsten Bauelement positioniert werden.

Zur Steuerung des in Bild 34 dargestellten mechanischen Aufbaus zur selektiven Bauelementeentstückung wurde ein angepaßtes Steuerungskonzept entwickelt und realisiert. Die Grundstruktur ist in Bild 35 dargestellt. Das Konzept basiert auf dem Zusammenspiel vierer Einheiten (X, Y Achsensteuerung, Simatic, Löttemperaturregler, PC) die wiederum entsprechende Signale an die funktionalen Einheiten senden.

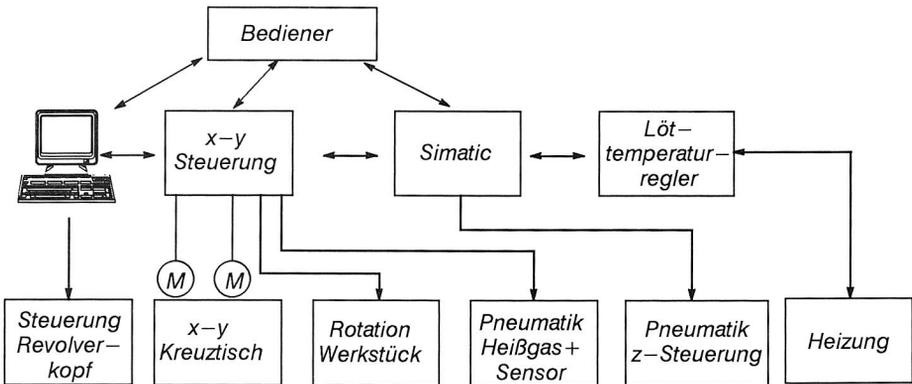


Bild 35: Konzept zur Steuerung der selektiven Demontagezelle

5.2 Verfahren zur simultanen Demontage elektronischer Bauelemente

Simultane Demontageverfahren in der Elektronik haben zum Ziel, alle Bauelemente zeitparallel von der Leiterplatte zu entfernen. Dazu wurden verschiedene Entwicklungen betrieben, z.B.:

1. das simultane Abscheren der Bauelementpins /48/,
2. das Umspritzen der Bauelemente mit Schaum mit anschließenden simultanen Greifen und Abheben aller Bauelemente durch den formschlüssigen Verbund /100/ sowie
3. das Einbringen eines Impulses (schlagende Beanspruchung) mit dem Effekt, durch Massenträgheit Bauelemente zu entfernen /28, 52/.

Die erwähnten Verfahren haben jedoch verschiedene Nachteile. Das scherend wirkende Verfahren zerstört wichtige Sortiermerkmale der Bauelemente. Es werden unter Umständen die Bauelementkörper, zumindest aber die zur Identifikation interessanten Merkmale verändert oder zerstört. Ein Nachweis der Wirkungsweise und Realisierbarkeit des formschlüssigen Schaumgreifers ist nicht erbracht. Ihm haftet das Problem der Verschmutzung der Fraktionen durch den Schaum sowie der immense Verbrauch des Hilfsstoffes an. Das letztgenannte Verfahren liegt zwar als Patent vor und wurde auch schon in einer Anlage reali-

siert, Aussagen über dessen Durchsatz und Effizienz sind jedoch nicht bekannt und aus Gründen des Verfahrensprinzips als gering anzusetzen.

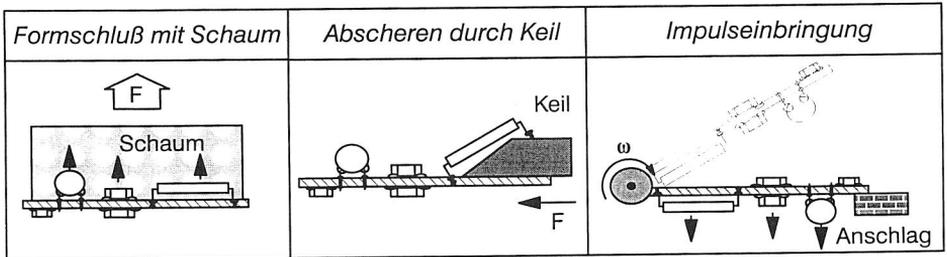


Bild 36: Konzepte zur simulatenen Demontage elektronischer Bauelemente

Aus den genannten Verfahren lassen sich jedoch die Prinzipien simultaner Demontageverfahren erkennen. Sie beruhen hauptsächlich auf der Entwicklung simultaner Greiftechniken, der Ausnutzung der Massenträgheit bzw. der Erdanziehung ('Entleeren einer Kiste durch Auskippen') oder durch spanabhebende Demontageverfahren.

Ziel der folgenden Entwicklungen soll nun sein, auf Basis der genannten Prozeßprinzipien Untersuchungen durchzuführen, um neue Demontageprozesse zu entwickeln. Es werden jedoch keine zerstörenden Demontageverfahren angestrebt, da diese wegen der genannten Gründe keinen erfolgsversprechenden Lösungsansatz bieten. Hingegen werden unter Nutzung der Massenträgheit sowie durch Ausnützen simultaner Greiftechniken zwei neue Prozesse erforscht.

In den folgenden Kapiteln werden zu diesen Zweck einfache Versuchsanlagen aufgebaut, anhand deren die wesentlichen Prozeßparameter untersucht werden sollen. Die gewonnenen Erkenntnisse führen zu Prozeßmodellen, die eine Berechnung der optimalen Einstellung der Prozesse zulassen. Die berechneten Ergebnisse werden in weiteren Versuchen bestätigt und führen zu Anlagenkonzepten.

5.3 Prozeß zur simultanen Demontage elektronischer Schaltungsträger mit Hilfe von Vibrationen

Durch die gezielte Einbringung von Impulsen in die Flachbaugruppe können Kräfte erzeugt werden, die zur Leiterplattenentstückung führen können. Das Prinzip beruht auf dem physikalischen Prinzip der Impulserhaltung sowie der Massenträgheit. Die Prozeßparameter sind:

- die Richtung der Impulseinbringung bzw. der daraus resultierenden Entstückkraft,
- die Größe des Impulses,
- die verlustarme Umsetzung des Impulses in Entstückkräfte.

Analyse des Prozesses zur Demontage durch Vibrationen

Die im Rahmen dieser Entwicklung nutzbaren Impulse sind der Entstückkraft entgegengesetzt. Es wurden erste Erfahrungen mit der Einbringung von Impulsen auf die Leiterplatte und der einhergehenden Erzeugung von Entstückkräften unter Ausnutzung der Massenträgheit gemacht.

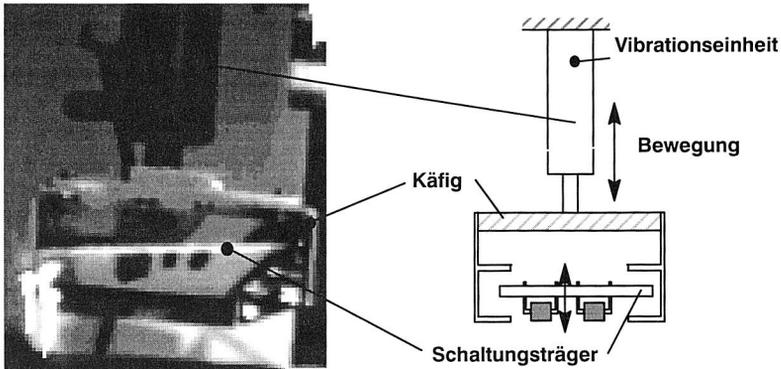


Bild 37: Vibrationsschwinger zur simultanen Entstückung von elektrischen Schaltungsträgern

Dazu wurde der in Bild 37 skizzierte Versuchsaufbau realisiert. Die Leiterplatte wird lose in den Käfig eingelegt, der wiederum an einen pneumatischen Vibrationskolben montiert ist. Andere Vibrationsprinzipien sind, soweit sie eine genügend große Amplitude aufweisen, ebenfalls geeignet. Durch die Beaufschlagung von Druckluft (bis zu 8 bar) schwingt der Kolben in Abhängigkeit der Masse mit varrierender Frequenz (bis zu 30 Hz). Zur Analyse der Bewegung wurde der Entstückprozeß mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Bild 38 gibt eine Vibrationssequenz wieder.

Die Leiterplatte kann den Kolben- und Käfigbewegungen nicht folgen, bewegt sich phasenverschoben zur Käfigbewegung und wird dadurch impulsartigen Schlägen ausgesetzt. In den Bildern ist deutlich zu sehen, daß die Leiterplatte gegen die Anschläge geschleudert wird und mit dem Auftreffen an den unteren Schienen die zur Entstückung beitragenden Kräfte (Massenträgheit) erzeugt werden. Mit Hilfe verschiedenen Analyseverfahren (Beschleunigungssensor, Hochgeschwindigkeitskamera) konnten Bremsbeschleunigungen um 20 g bestimmt werden. Die Entstückkräfte sind so groß, daß in Versuchen (nicht festgelötete) Bauelemente in Durchstecktechnik mit um 45° gebogenen Beinchen ohne größere Probleme entstückt wurden (siehe auch Kamerasequenz in Bild 38).

Zur Prozeßoptimierung werden im folgenden die Bewegungsgleichungen bestimmt und unter Berücksichtigung der mathematischen Randbedingungen die optimalen Schienenabstände berechnet.

Die Leiterplattenbewegung läßt sich in die folgenden Prozeßschritte einteilen:

1. Die Leiterplatte liegt auf dem unteren Rahmen auf und wird in gleichem Maße wie der Rahmen beschleunigt
2. Sie hebt ab, die Geschwindigkeit ist gleich der Rahmengeschwindigkeit.
3. Sie tritt in Kontakt zur oberen Schiene (Impuls!) und wird von dieser nach unten beschleunigt.
4. Die Leiterplatte hebt ab und trifft nach einem senkrechten Fall auf die untere Schiene (Entstückimpuls!)

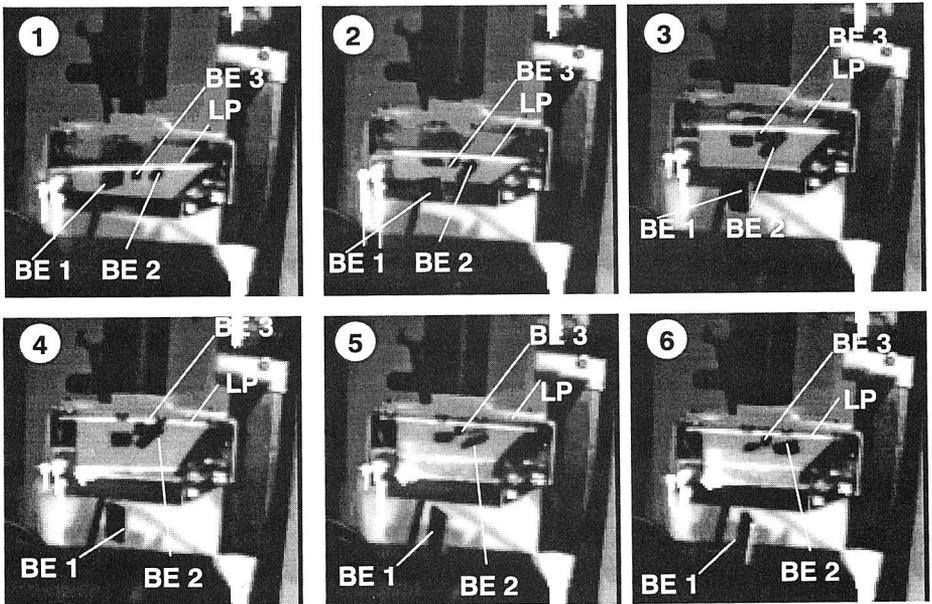


Bild 38: Simultane Entstückung mit Hilfe von Vibrationen, Aufnahme einer Entstücksequenz mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera (BE: Bauelemente; LP: Leiterplatte)

Prozeßmodell der Vibrationsdemontage

Aus der Bewegungsanalyse des vorhergehenden Kapitels sind die wesentlichen Kontakte zwischen Leiterplatte und Käfig ableitbar. Dies sind die Beschleunigungs- bzw. Abhebe-phasen der Leiterplatte von den Käfigschienen und die Auftreffmomente bei welchen die gewünschten Entstückkräfte durch schlagartige Impulse erzeugt werden. Die Bewegung des Käfigs kann als harmonische Schwingung im Weg/Zeitdiagramm aufgetragen werden (Bild 39). Die Bewegungsgleichung des Rahmens lautet:

$$x(t) = -A_K * \cos(\omega t) + a$$

Die Phasen zwischen Abwurf der Leiterplatte und Auftreffen sollen im folgenden als Wurf 1 bzw. 2 bezeichnet werden (Bild 39).

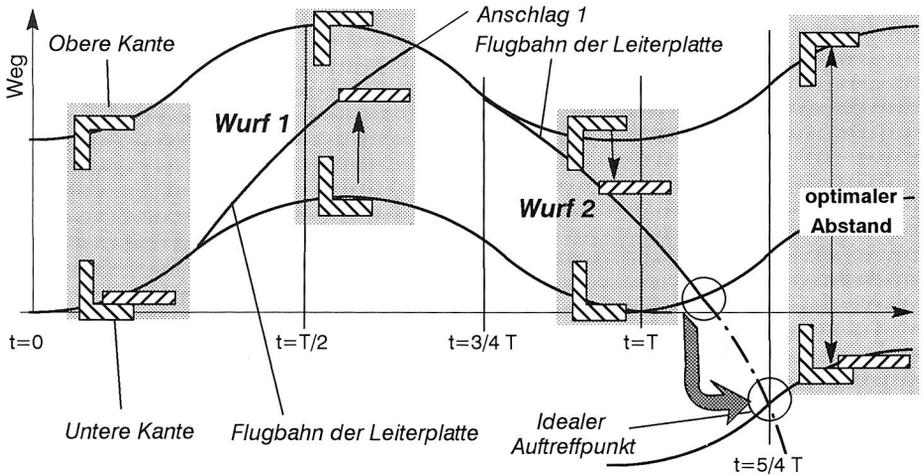


Bild 39: Weg/Zeitdiagramm zur Analyse und Optimierung des Bewegungsablaufs in der simultanen Leiterplattenentstückung mit Hilfe eines schwingenden Systems

Die Leiterplatte liegt bei Beginn von Wurf 1 auf dem unteren Rahmen auf und bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit v_0 . Nachdem die Leiterplatte abgeworfen wurde, wird die Wurfbewegung durch die Erdanziehung gebremst. Es gilt die Gleichung:

$$x_{LP}(t) = A_K \omega \sin(\omega t) t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (4.1)$$

In der zweiten Wurfphase wird die Leiterplatte ebenfalls mit v_0 abgeworfen, es wirkt die Schwerkraft jedoch beschleunigend. Es gilt die Gleichung:

$$x_{LP}(t) = -A_K \omega \sin(\omega t) t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (4.2)$$

Die bestimmende Größe des Vibrationsentstückprozesses ist der Impuls, der sich durch das Produkt aus der Masse der Leiterplatte m und deren Geschwindigkeit v bestimmt. Die gewünschten Entstückkräfte entstehen bei den Stoßvorgängen. Die physikalische Beziehung lautet: $F * \Delta t = m * \Delta v$. Es geht daraus hervor, daß neben der Massen- und Druckberührzeitänderung Δt nur die Geschwindigkeitsänderung Δv die Entstückkraft beeinflussen. Die Masse sowie die Druckberührzeit sind bei der Entstückung unverändert. Es bleibt als einziger variabler Parameter, die Geschwindigkeitsänderung zu maximieren.

Die Entstückkraft ist dann maximal, wenn die Leiterplatte in Wurf 2 mit maximaler Geschwindigkeit auf die untere Käfigkante trifft, die sich entgegengesetzt zur Leiterplatte, mit maxi-

maler Geschwindigkeit bewegt. In Bild 39 ist der ideale Auftreffpunkt (Wendepunkt) eingezeichnet. Durch Gleichsetzen der Bewegungsgleichungen von Leiterplatte und Käfigunterkante kann der optimale Abstand a zwischen Ober- und Unterkante berechnet werden.

$$a = \{A_K \omega \sin(\omega \frac{T}{4} t)\} t_{LP} - g t_{LP}^2 + A_K \cos(\omega t) \quad (4.3)$$

Die Auftreffbedingung eines optimalen Stoßes ($t=T/4$) wird in Formel 4.3 eingesetzt und vereinfacht. Daraus ergibt sich (mit $\omega=2\pi f$):

$$a_{opt2} = -A_K 2 \pi f \frac{T}{4} - g \frac{T}{2} = -A_K \pi - g \frac{T}{2} \quad (4.4)$$

Zu beachten ist hier die Einhaltung der zweiten Randbedingung, die besagt, daß die Leiterplatte durch die obere Kante maximal beschleunigt wird. Dies geschieht, indem die Leiterplatte vor dem Wendepunkt $t=3/4 T$ in Kontakt zum Käfig gebracht und dabei eine starke entgegengesetzte Beschleunigung eingebracht wird. Unter Benutzung der Bewegungsgleichung der Leiterplatte im Wurf 1 und der entsprechenden Käfigbewegungsgleichung ergibt sich die entsprechende Berechnungsformel für den optimalen Abstand als:

$$a_{opt1} = A_K 2 \pi f \frac{T}{2} - g \left(\frac{T}{2}\right)^2 = A_K \pi - g \left(\frac{T}{2}\right)^2 = A_K \pi - g \left(\frac{1}{2f}\right)^2 \quad (4.5)$$

Es ist nun festzustellen, daß a_{opt1} immer kleiner als a_{opt2} sein wird. Eine Bestimmung des optimalen Abstands im Wurf 2 würde zu der Situation führen, daß die Leiterplatte nicht optimal durch die obere Kante beschleunigt würde. Folglich muß das System durch die Gleichung (4.5) dimensioniert werden.

Auslegung eines Vibrationsentstückers

Wie Gleichung 4.5. verdeutlicht, wird der optimale Abstand durch die Amplitude und die Frequenz des Schwingensystems beeinflusst. Ein Grenzwert für eine sinnvolle Einstellung ist gegeben, falls $f \rightarrow \infty$. Der Abstand wird dann nur noch durch die Amplitude des Schwingensystems beeinflusst. Im Versuchsaufbau zur Prozeßanalyse wurde ein pneumatischer Schwinger eingesetzt, der bei 8 bar mit 30 Hz schwingt und eine Amplitude von 11,5 mm hat. Es kann daraus die optimale Einstellung von 36,13 mm berechnet werden, die auch in Versuchen bestätigt wurde.

5.4 Entwicklung eines simultanen Entstückprozesses durch den Einsatz von Entstückbürsten

Ziel ist es, einen Greifmechanismus zu entwickeln, der bei mehreren bzw. allen Bauelementen einer Leiterplatte gleichzeitig in Eingriff gebracht werden kann. Dabei sollen nicht nur SM Bauelemente, sondern vorrangig auch THDs entstückt werden, deren Entstückung erheblich höhere Demontagekräfte erfordert.

Wie schon im vorhergehenden Kapitel werden Wärmeeinbringung und Kräfteinbringung voneinander getrennt betrachtet. Die Ergebnisse der prinzipiellen Untersuchungen zum Aufschmelzen der Lötstellen gelten natürlich auch für die folgenden Prozeßuntersuchungen.

In einer im Vorfeld durchgeführten Analyse verschiedener Demontageprinzipien erschien die Nutzung von Bürsten zum Abheben der Bauelemente am geeignetsten. Dabei wird die Bürste so positioniert, daß die Borsten die Leiterplattenoberfläche berühren oder in geringem Abstand dazu stehen. Die Bürste ist rotationssymmetrisch und wird von einem Motor mit großem Drehmoment angetrieben. Um eine vollständige Entstückung zu ermöglichen, müssen Bürste und Leiterplatte relativ zueinander bewegt werden. Dies geschieht durch eine lineare Bewegung der Bürste oder der Leiterplatte. Es wird davon ausgegangen, daß die Bürste mindestens die Breite der Leiterplatte hat.

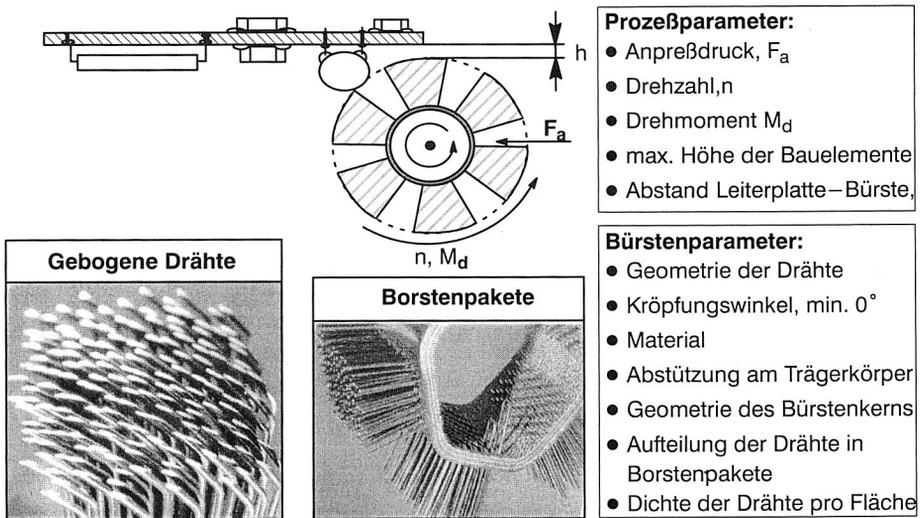


Bild 40: Prozeß- und Bürstengeometrieparameter zur Bürstenentstückung; Darstellung der besonderen Bürstengeometrien: Kröpfung, Versatz von Borstenpaketen

Rotationssymmetrische Bürsten sind in den verschiedensten Ausfertigungen auf dem Markt zu finden. Wesentliche Unterschiede ergeben sich durch das Drahtmaterial (E-Modul), durch die Unterteilung der Borsten in Pakete sowie deren Abstand zueinander, durch den Durchmesser und die Länge der Drähte, den Kröpfungswinkel am Drahtende (0° entspricht einer geraden Borste), die Geometrie des Bürstenkerns, die Abstützung der Borsten im Bürstenkern und den Anstellwinkel der Borsten zur Normalen auf der Oberfläche des Bürstenkerns. Bürsten werden in sehr hohen Stückzahlen gefertigt und verkauft, Sonderanfertigungen zu Testzwecken sind deshalb schwer zu beschaffen. In Vorversuchen wurden deshalb verschiedene konventionelle Produkte getestet und zwei Bürsten für detaillierte Prozeßuntersuchungen ausgewählt. Im folgenden sind die Ergebnisse von Untersuchungen

dargestellt, die Hilfestellung zur Einstellung der Prozeßparameter geben. Durch die beschränkte Auswahl alternative geeigneter Systeme und die dadurch eingeschränkten Möglichkeiten, Bürstengeometrien sinnvoll zu variieren, können nur Gestaltungshinweise jedoch keine gesicherten Aussagen zur optimalen geometrischen Ausgestaltung der Bürste gegeben werden.

Bestimmung der optimalen Prozeßparameter und Bürstengeometrie beim Bürstenentstücken

Zur Bestimmung der Prozeßparameter Anpreßdruck, Drehzahl, Vorzugsrichtung der Bauelemente zur Bürste und Abstand der Leiterplatte zur Bürste wurde ein Versuchsstand aufgebaut wie in Bild 41 dargestellt. Es wurde ein Metallklotz (Höhe und Breite entsprechen den Dimensionen eines DIL Bauelements) in einem definierten Abstand (typischer Abstand eines Bauelements zur Leiterplatte) zu einer Metallplatte (Leiterplattenoberfläche) drehend gelagert an einer Kante des Klotzes aufgehängt. Der definierte Abstand Klotz/Leiterplatte wird zusätzlich durch einen fest eingespannten Draht gewährleistet. Dieser Draht wird durch eine Bohrung in der Platte berührungslos durchgeführt und ist mit einem starr montierten Drucksensor verbunden. Tritt nun die Bürste in Eingriff, wird der Klotz angehoben und über den Draht eine Kraft auf den Sensor eingebracht. Die mit dem Aufbau gemessene Kraft entspricht der Summe aller am Körper wirkenden Kräfte. Die Kraft am Eingriffspunkt der Bürste entspricht der Hälfte der gemessenen Kräfte. In den folgenden Untersuchungen wird die mit der Druckmeßdose gemessene Kraft angegeben.

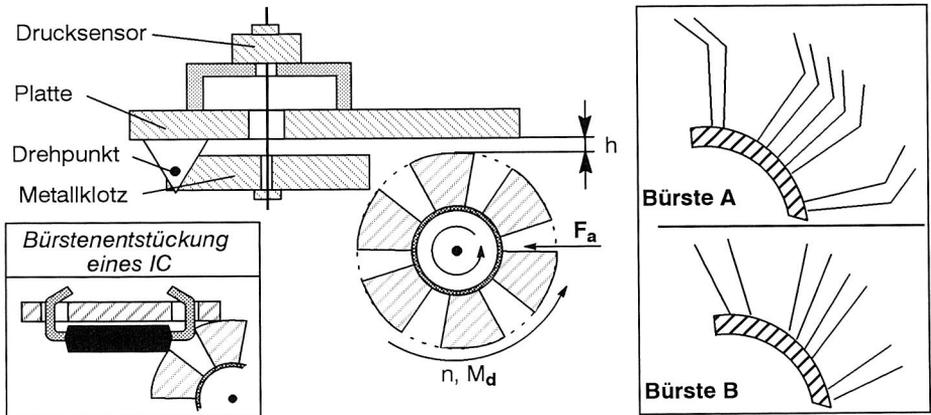


Bild 41: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zugkräfte von Bürsten bei der Entstückung elektronischer Bauelemente (exemplarisch IC)

Im Rahmen der Versuche wurden zwei Bürsten verwendet, die sich prinzipiell durch die Gestaltung der Borsten unterscheiden. Bürste A ist mit Borsten bestückt, deren Enden (3,5mm der Gesamtlänge von 22mm) um 30° gekröpft sind. Die Drähte der Bürste B hingegen sind um 11° zur Bürstenkörperoberfläche angestellt und nicht gekröpft. Beide Bürsten

besitzen sechs gleiche Borstenpakete, die je 60° des Umfangs (185mm) umschließen. Die Dichte der Borsten in den Segmenten ($D_A > D_B$), die Drahtdurchmesser ($d_A < d_B$) sowie die Drahtlänge ($l_A > l_B$) sind unterschiedlich.

Prozeßparameter

Die Bürsten werden nun unter Variation der Prozeßparameter:

- Abstand zwischen Leiterplatte und Bürste
- Drehzahl
- Anpreßdruck

in Eingriff gebracht. Die Meßergebnisse wurden in die in Bild 42 dargestellten Entstückkraft/ Drehzahldiagramme übertragen

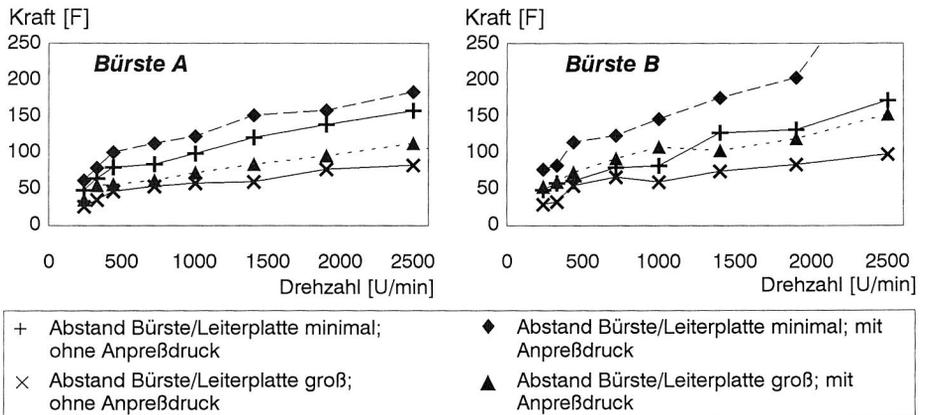


Bild 42: Beziehung zwischen Entstückkraft und Drehzahl beim Bürstenentstücken unter Variation von Prozeßparametern

Es zeigt sich, daß unabhängig von der Bürstenform die Entstückkräfte mit der Drehzahl der Bürste steigen. Einen entscheidenden Einfluß auf den Entstückerfolg wird durch den Anpreßdruck der Vorschubeinheit ausgeübt. Geringer Vorschub erzeugt geringe Kräfte, die sich mit zunehmender Vorschubkraft vergrößern. Auch wird das Entstückergebnis am besten ausfallen, wenn die Borstenenden knapp an die Leiterplattenoberfläche ansteht. Ein zu großer Abstand kann zum Abfräsen des Bauelementgehäuses führen. Schließlich ist anzumerken, daß die Bürste quer zu den Bauelementen stehen sollte, um damit eine optimale Angriffskante und geringe Drehmomente zu bieten.

Bürstengeometrie

Die Bürste ist, wie schon in Bild 40 dargestellt, durch eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter beschrieben. Prinzipiell hängt der Erfolg einer Bürstenentstückung von der Steifigkeit

des gesamten Aufbaus ab. Dieser setzt sich aus der federnden Einspannung der Drähte am Stützkörper, der Federsteifigkeit des einzelnen Drahtes und der internen Abstützung in den einzelnen Borstenpaketen zusammen. Um eine vereinfachte Abschätzung der Bürstengeometrie zuzulassen, wird davon ausgegangen, daß die Bürsten starr in den Kern eingebettet sind. Eine einzelne Borste kann dann als einseitig fest eingespannter Biegebalken mit der Länge l angenommen werden, der bei Berührung mit dem Bauelement mit der Kraft F belastet wird. Die Durchbiegung am Punkt B ergibt sich zu:

$$y_m = \frac{F * l^3}{3 * E * I}$$

und damit die Formel zur Bestimmung der Federsteifigkeit eines Drahts:

$$c = \frac{F}{y_m} = \frac{3 * E * I}{l^3} = \frac{3}{64} * \frac{2 * E * d^4}{l^3}$$

Beim Einsetzen der Kennwerte der beiden Bürsten berechnen sich die folgenden Werte:

$$c_A = 0,046 \text{ N/mm} ; c_B = 0,509 \text{ N/mm.}$$

Es ist festzustellen, daß die Materialwahl (E-Modul) sowie die geometrischen Eigenschaften des Drahts wie z.B. seine Länge (in der dritten Potenz) und sein Durchmesser (vierte Potenz) einen erheblichen Einfluß auf die Federsteifigkeit und somit auf das Entstückergebnis haben.

Die Drahtlänge wird durch die maximale Höhe der zu demontierenden Bauelemente festgelegt. Durch die Vergrößerung des Bürstenkerns wird der Prozeßeingriffspunkt vom Drehpunkt verschoben, die Drähte können dadurch jedoch kurz und sehr steif gehalten werden. Er muß jedoch so dimensioniert werden, daß er über die Bauelemente geführt werden kann und die Drähte unbeschadet umgebogen werden können.

Auswahlkriterien zur idealen Segmentierung auf Basis wissenschaftlicher Untersuchungen können nicht gegeben werden, da nur eine Segmentierung zu Versuchen zur Verfügung stand. Prinzipiell sind Bürsten mit Freiwinkeln im Drahtbereich gut zur Bürstenentstückung geeignet. Dasselbe gilt auch für die gekröpfte Bürstenversion. Wie Versuche bewiesen haben, können mit ihr bei der Wahl eines dünnen, langen Drahts THDs entstückt werden. Obwohl die Kräfte insgesamt niedriger sind, bewegen sie sich auf einem Niveau, welches erheblich über dem durch die berechnete Federsteifigkeit bestimmten hinaus geht. Es kann folglich angenommen werden, daß eine Federkröpfung erhebliche Prozeßverbesserungen bringt.

6. Entwicklung von Werkzeugen zur prozeßintegrierten Klassifikation elektrischer Bauelemente im automatisierten Demontagesystem

6.1 Allgemeiner Aufbau von Klassifikationssystemen

Das in Kap. 3 entwickelte Rahmenkonzept zur automatisierten Demontage elektronischer Flachbaugruppen weist im Hinblick auf die Mustererkennung folgende Problemstellungen auf:

- Erkennung wiederverwendbarer Bauelemente auf der gesamten Schaltung und
- Sortierung einzelner Bauelemente in Materialfraktionen.

Als Muster wird in /89/ ein Ausschnitt oder Teilaspekt der Umwelt oder auch ein physikalischer Vorgang, der funktional in einem ein-, zwei- oder mehrdimensionalen Raum beschreibbar ist, bezeichnet. Die Mustererkennung umfaßt daher alle Maßnahmen zur automatisierten Verarbeitung beliebig vorliegender Muster und wird in die Aufgaben der Klassifizierung von Objekten oder Mustern und in die Analyse derselben unterteilt.

Die Musterklassifikation erlaubt es, jedes Muster als Ganzes einer Klasse zuzuordnen. Um dies zu ermöglichen, müssen geeignete Merkmale zur Verarbeitung aus den Mustern extrahierbar sein. Die Erkennung komplexer Muster kann auch durch eine Trennung der Muster in Teilmuster und durch die Beschreibung der Zuordnungen und Beziehungen zueinander erfolgen. Es wird dabei versucht, die Struktur des Musters zu verarbeiten. Diese Verfahren sind Teilbereichen der Musteranalyse zuzuordnen. Die Abstraktion der Muster ist jeweils problemorientiert festzulegen.

Klassifikation von Mustern

Zur Klassifikation von Mustern sind die folgenden Aufgaben auszuführen:

- Die Muster sind durch Aufnahmegeräte in eine für die Verarbeitung geeignete Form zu bringen.
- Aus einer Stichprobe sind für die einzelnen Klassen charakteristische Eigenschaften zu gewinnen.
- Es sind Mustermerkmale zu finden, die ein Muster gut beschreiben und eine Unterscheidung zwischen den Klassen zulassen.
- Aufgrund von neuen Mustern ist die Klassifizierung zu überprüfen.

Der Aufbau eines klassifizierenden Systems bestimmt sich vor allem durch die Anforderungen an die Flexibilität und die Anpaßbarkeit des Systems an geänderte Rahmenbedingungen der Erkennungsaufgabe. Dadurch lassen sich verschiedene Strukturen klassifizierender Systeme definieren:

- Die Klassifikationsaufgabe ist festgelegt:

Es wird ein Systemaufbau ausgewählt, der geeignete Aufnahmen der Muster erzeugt. Die Informationen werden durch eine Verarbeitungsstufe in vorher definierte Merkmale umgewandelt und stehen als Merkmalvektor, dessen Komponenten die Werte der Merkmale sind, der Entscheidungsstufe zur Verfügung. Dort wird die eigentliche Klassifizierung durchgeführt, d.h. die Merkmale werden durch einen Vergleich mit den vorhandenen Klassendefinitionen entsprechend zugeordnet.

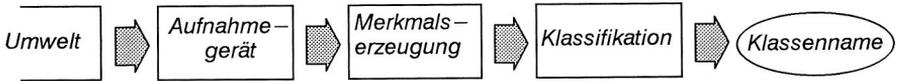


Bild 43: Modell eines festdimensionierten Klassifizierungssystems (nach /89/)

- Eigenschaften der Muster ändern sich; die Stichprobenanzahl ist unzureichend:

Die Anforderungen an das System bedingen eine Erweiterung des Systems um eine Lernstufe. Sie hat die Aufgabe, in einer Lern- oder Trainingsphase aus bekannten Mustern die Klassencharakteristika zu ermitteln und die so gefundenen klassifizierenden Parameter der Entscheidungsstufe zu übermitteln.

In der Lernphase werden dem System klassifizierte Muster zur Verfügung gestellt. Die Musterinformationen werden zu einem Merkmalvektor umgerechnet und der vorgegebenen Klasse zugewiesen. Die lernende Struktur hat hierbei die Aufgabe, die vorab klassifizierten Muster zu verarbeiten und im lernenden System problemspezifische Zuweisungen zu generieren. Durch den Einsatz z.B. Neuronaler Netze (NN) wird dies ermöglicht.

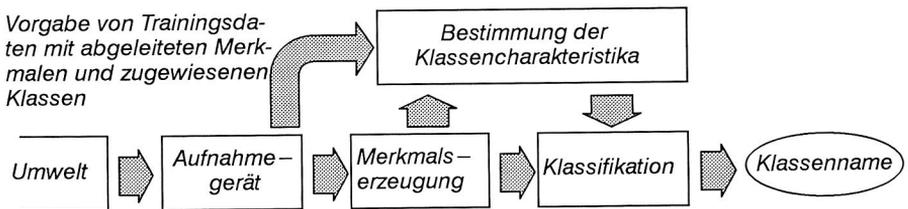


Bild 44: Modell eines lernenden Klassifizierungssystems (nach /89/)

Analyse komplexer Muster

Zur Analyse von Mustern müssen die folgenden vier Aufgaben durchgeführt werden:

- Ein geeignetes Aufnahmesystems muß ausgewählt werden.
- Das Musters muß aufgrund von Stichproben in einfache Muster und deren Beziehungen aufgeteilt werden.
- Eine Beschreibungssprache (Grammatik) muß entwickelt werden.
- Mit Hilfe der Grammatik müssen komplexe neue Muster analysiert werden.

Zur Auswahl der einfachen Muster werden in der Regel heuristisch intuitive Methoden angewendet. Dabei sind einfache Beziehungsregeln und Grundsymbole zu definieren, die die komplexen Systeme wiedergeben. Vorverarbeitungsmaßnahmen dienen auch hier dazu, Störungen zu eliminieren und bestimmte Teile der Muster hervorzuheben. Die modellhafte Struktur ist in Bild 45 wiedergegeben.

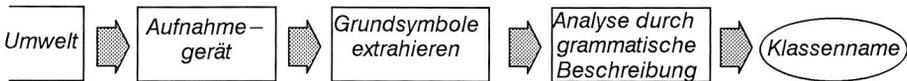


Bild 45: Modell eines Systems zur Analyse komplexer Muster (nach /89/)

In der gesamten Mustererkennung ist ein besonderes Augenmerk auf die geschickte Auswahl des Aufnahmege­räts zu legen. Dadurch kann der Aufwand zur Vorverarbeitung und Informationsreduktion während der eigentlichen Klassifikation erheblich reduziert werden. Wichtig ist dabei auch das intuitive Erkennen potentieller Lösungsansätze und eine Abschätzung der verursachten Kosten und Folgekosten für den Einsatz komplexer Rechen­technik.

6.2 Auswahl eines Sensorprinzips zur Klassifikation wiederverwendbarer Bauelemente

Das Konzept der automatisierten selektiven Entstückung von Leiterplatten hat zum Ziel, wiederverwendbare Bauelemente schonend aus dem Schaltungsverbund zu lösen.

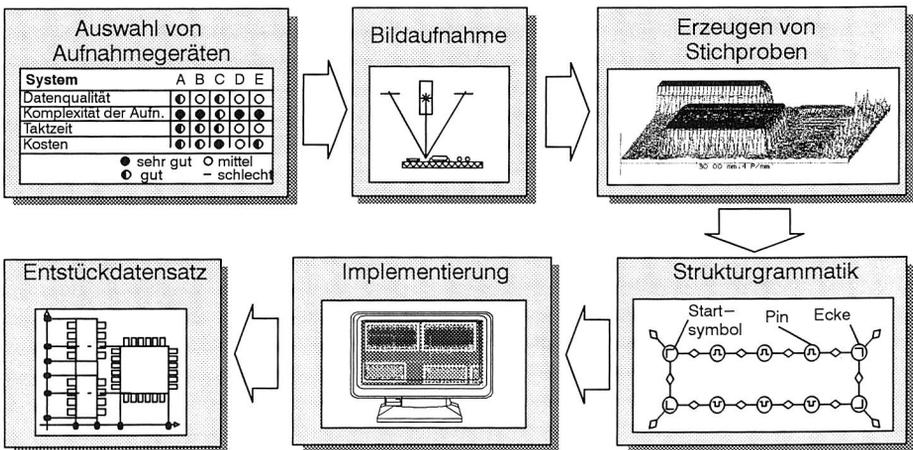


Bild 46: Aufbau eines Systems zum automatisierten Erzeugen von Datensätzen zur Entstückung wiederverwendbarer Bauelemente

Um die Bauelemente zu demontieren, muß mit Hilfe eines Erkennungs- und Analysesystems ein Entstückdatensatz generiert werden, der ein Handhabungsgerät mit relevanten Daten unterstützt.

Als erstes muß dazu das für eine Entstückung in Frage kommende Bauelementspektrum analysiert und eine geeignete Stichprobe sowie die passende Aufnahmetechnik ausgewählt werden. Darauf aufbauend sind Merkmale bzw. Strukturen zu finden, die rechnerunterstützt analysiert werden können. In Kap 6.3 werden mit Hilfe der Methoden der Musteranalyse geeignete Grundsymbole abgeleitet und deren strukturelle Zusammenhänge mit Hilfe einer Grammatik beschrieben. Das Analysekonzept wird mit Hilfe von Parsingstrategien beschrieben und die prototypenhafte Implementierung vorgestellt (Bild 46).

6.2.1 Entwicklung eines Konzepts zur Klassifikation selektiv zu demontierender elektrischer Bauelemente

Die zu demontierenden Bauelemente definieren sich aus dem Markt für wiederverwendbare Bauelemente. Wie die Analysen aus Kap. 2 ergaben, sind dies vor allem Speicherbausteine (Statistic-RAMS, Dynamic-RAMS, EPROMS) und Prozessoren. Die handelsüblichen Gehäusebauformen der auszusortierenden ICs lassen in der Regel keine zuverlässige Typen- und Funktionszuordnung zu. Prozessoren werden z.B. in den Gehäuseformen DIP, PGA, SO oder PLCC, S- und D-RAMS in den Gehäusen DIP, SO, PLCC oder auch als ZIG-ZAG geliefert. Allein die Anzahl der Beinchen und die Bestimmung der Gehäusemerkmale gibt grobe Anhaltswerte zur Klassifikation des IC-Typs.

Eine Erkennung der Gehäusebeschriftung, die sich bei ICs immer auf der Bauelementoberseite befindet, erscheint unerlässlich. Um dies zu realisieren sind verschiedene Konzepte möglich (Bild 47):

1. Visuelle Schrifterkennung und manuelle Markierung der Bauelemente durch den Bediener mit Hilfe Farbe oder eines Digitalisierungsstift mit anschließender automatisierter Entstückdatengewinnung.
2. Bestimmung der Entstückdaten der potentiell zu entstückenden Bauelemente, visuelle Begutachtung und Reduktion der Auswahl.
3. Bestimmung der Entstückdaten der potentiell zu entstückenden Bauelemente, automatisierte Schrifterkennung und Reduktion der Auswahl.

Die automatisierte Erkennung von Schriften z.B. auf Bauelementgehäusen basierend auf Grauwertbilder ist technisch gelöst. In der Literatur werden dazu lernende Systeme (v.a. Neuronale Netze verschiedener Topologien /z.B. 88/) eingesetzt, die eine fehlerfreie Bestimmung der Schriftzeichen ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit soll auf dieses Problem nicht eingegangen werden, aber ergänzend auf die Arbeiten in /85/ verwiesen werden. Um jedoch im Rahmen dieser Arbeiten ein technologisch durchgängiges Problemlösung zu erarbeiten, wird Konzept 2 gewählt. Es besteht durch seine technische Einfachheit (visualisieren von Schrift mit Hilfe einer Kamera) und das Potential, durch eine automatisierte Schrifterkennung problemlos erweitert werden zu können.

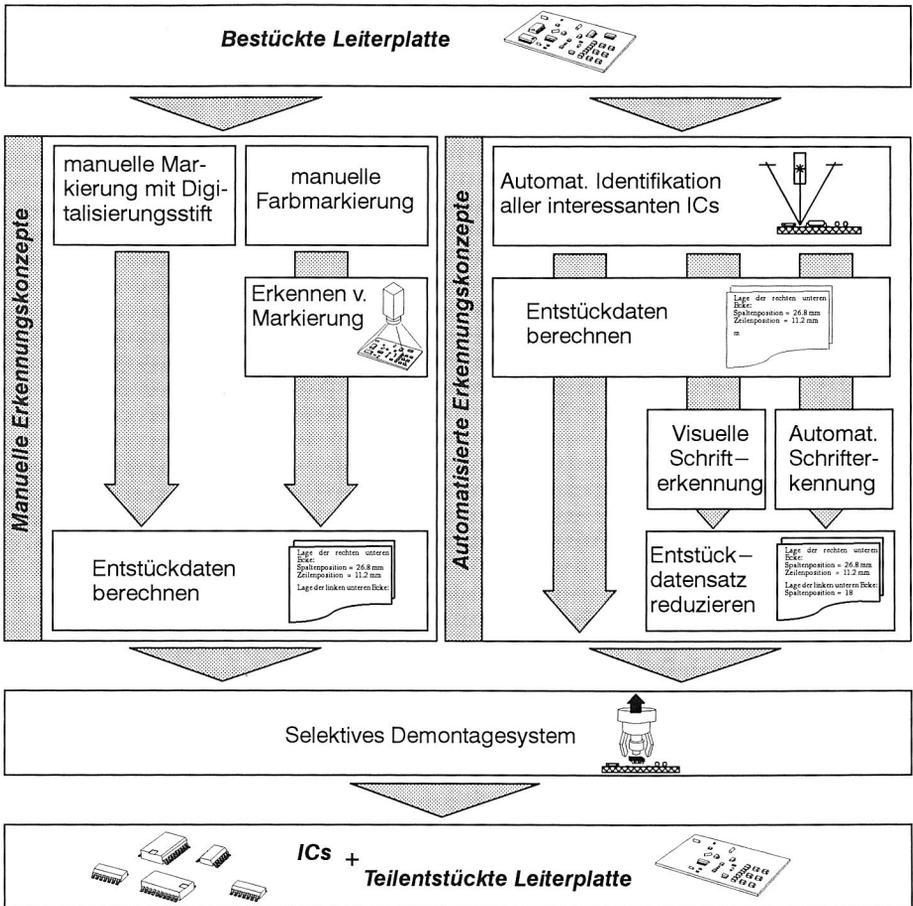


Bild 47: Konzepte zur Identifikation selektiv zu entstückender Bauelemente

Kernaufgabe des Erkennungssystems soll, wie schon dargestellt, die Bestimmung des Bauelementtyps (Beinchenanzahl, Fläche und Seitenlänge) sowie die Berechnung der Entstückkoordinaten und der Bauelementorientierung sein.

6.2.2 Systematische Auswahl eines geometrieffassenden optischen Meßverfahrens

Die optimale Erfassung von Objekten ist ein wesentlicher Beitrag zur effizienten Erkennung und Klassifizierung von Mustern. Unterschiedliche Erfassungskonzepte ermöglichen die Gewinnung verschieden nutzbarer Daten des gleichen Objekts. Ziel der Sensorauswahl ist es, bei der Erfassung der Objekte möglichst viele klassifizierungsrelevante Informationen und möglichst wenige redundante oder irrelevante Informationen zu gewinnen. Um diese

Aufgabe zu erfüllen, wird im folgenden das Spektrum positionbestimmender Verfahren aufgezeigt und vielversprechende Ansätze im Detail betrachtet.

Zur Bestimmung von Position und Form geometrischer Körper kommen verschiedene physikalische Effekte zum Einsatz die grundlegend in tiefenbildgebende Verfahren (3 D) und zweidimensional bildgebende Verfahren (2 D) unterschieden werden sollen.

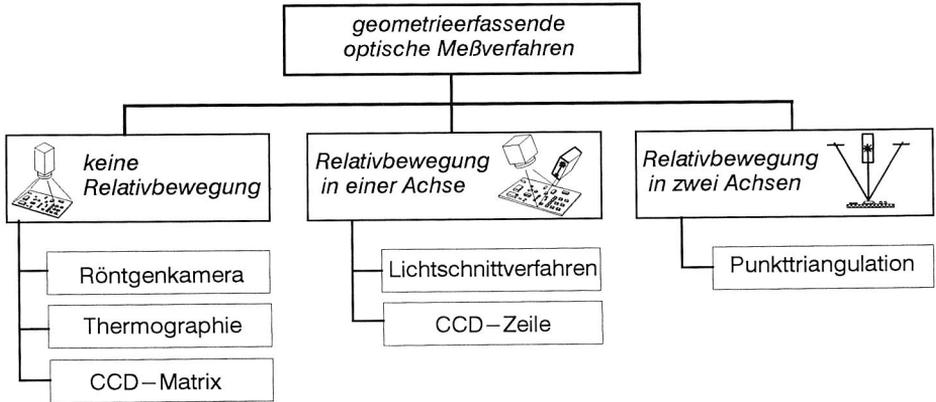


Bild 48: Übersicht von optischen Sensorverfahren zum Erzeugen von Geometriedaten

Die Meßprinzipien zum Erzeugen von 3 D Bildern beruhen zumeist auf Stereo- (z.B. /59/), Triangulations-, Fokussierungs- und Echomeßverfahren sowie Laserinterferometrie /58/. Flächige Bilder werden mit Hilfe von Bildverarbeitungssystemen erzeugt, deren Aufnahmemeinheit auf Basis von Photodiodenzellen oder -arrays beruht /131/. Dabei können Lichtschnitt-, Grauwert-, Röntgen- und thermographische Bilder aufgenommen werden.

Wegen der beschränkten oder zu groben Meßbereiche und dem z.T. erheblichen technischen Aufwand sind Fokussierungs-, Stereo- und Echomeßverfahren sowie Laserinterferometrie für die Bearbeitung dieser Aufgabe nicht geeignet. Im folgenden sollen die verbleibenden Verfahren knapp beschrieben, der Stand der Technik dargestellt und die Auswertbarkeit der Informationen analysiert werden.

Punktriangulation

Eine punktförmige Lichtquelle (in der Regel Laser) erzeugt auf der Oberfläche eines Objekts einen Lichtfleck. Die Reflektion des Flecks wird mit einer zur Lichtquelle definiert positionierten CCD Zeile aufgenommen. Über die festgelegten geometrischen Bedingungen sowie über die gemessene Winkelbeziehung zum Objekt kann der Abstand bestimmt werden. Durch die optische Abtastung im definierten Raster kann ein Höhenprofil gemessen werden. Meßfehler entstehen bei der Messung von scharfen Kanten (Abschattung) und durch stark unterschiedliches Reflexionsverhalten verschiedener Oberflächen (z.B. spiegelnd zu matt) /131/.

□ Stand der Technik:

Die Auflösung beläuft sich von 2 µm bis zu 0,2 mm und der Meßbereich von 5 bis zu 500 mm. Das Aufnahmeraster ist in Abhängigkeit von der Verfahrenseinheit. Bei entsprechender Auslegung von Verfahrenseinheiten und Detektoren können Abtastraten (Meßpunkte pro sek.) bis zu 2 MHz und Abtastgeschwindigkeiten bis zu 4000 mm/s /103/ erreicht werden.

□ Anwendungspotential:

Zur Erfassung von gebrauchten elektronischen Bauelementen ist ein angepaßtes Sensorsystem zu konstruieren. Erfahrungen können dabei aus der Qualitätssicherung elektronischer Bauelemente übernommen werden /103/. Die reduzierten Anforderungen bzgl. der Auflösung des Meßrasters und der Auflösung in der Meßachse lassen einen vereinfachten Systemaufbau zu. Es muß einen sehr steilen Triangulationswinkel erlauben, der Abschattungseffekte bei z.B. sehr eng zusammenstehenden Bauelementen vermeidet.

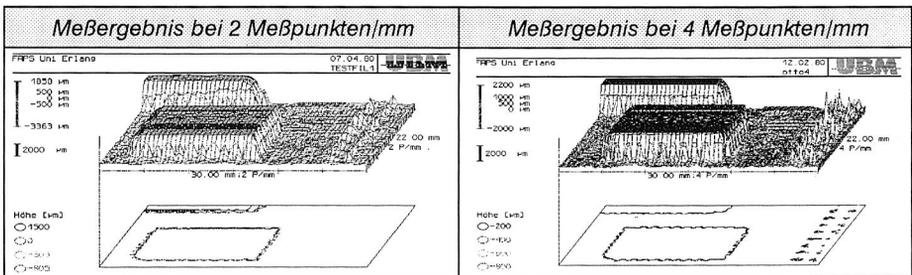


Bild 49: Darstellung zweier Höhenprofile und der abgeleiteten Kantenprofile eines ICs welche mit Hilfe von Punktriangulation unter Variation der Auflösung erzeugt wurden

Zur Abschätzung der Bearbeitungszeit ist davon auszugehen, daß Bauelemente mit einer Beinchenbreite von 0,4mm zu entstücken sind. Die Erfassung der Leiterplatte mit nur 4 Meßpunkten pro mm reicht aus, um jedes Bauelement zu messen. Diese Aussage wurde durch exemplarische Messungen bestätigt (Bild 49).

Lichtschnittverfahren

Das Lichtschnittverfahren stellt eine Weiterentwicklung der punktwisen Triangulation dar. Anders als bei der punktwisen Triangulation wird der Laserstrahl durch eine Zylinderlinse oder durch einen Schwenkspiegel zu einer Linie aufgeweitet. Diese projizierte Linie wird entsprechend dem Höhenprofil der Oberfläche verzerrt und durch eine CCD-Matrixkamera unter einem definierten Triangulationswinkel aufgenommen /131/. Zur Erstellung wird das Objekt relativ zum Sensor bewegt, wobei eine Vielzahl von Höhenlinien aufgenommen und ausgewertet werden. Nachteilig ist hier jedoch die fest definierte Aufnahmebreite bei vorgegebener Auflösung und die nicht regelbare Bestrahlungsintensität im Lichtschnitt. Weiterhin ist die Auflösung einer Matrixkamera im allgemeinen geringer als die einer Zeile (siehe Lasertriangulation). Dadurch ist die Auflösung pro Lichtschnitt festgelegt und die Genauigkeit eingeschränkt.

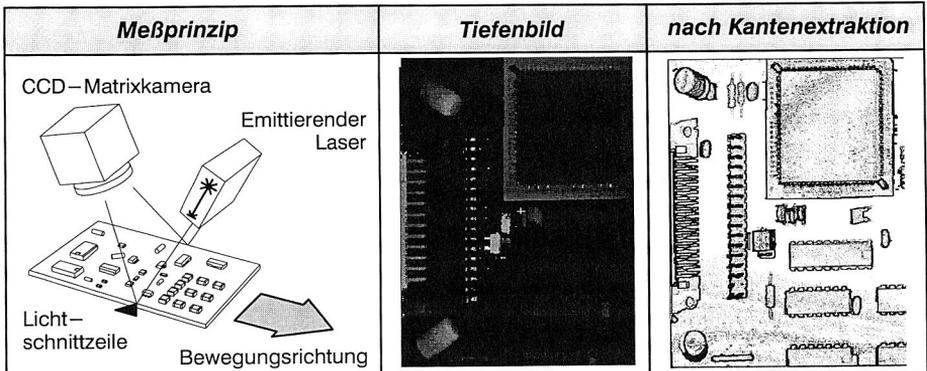


Bild 50: Funktionsprinzip und Meßergebnis des Lichtschnittverfahrens

□ Stand der Technik:

Die Auflösung beläuft sich zwischen 10 µm und 1 mm. Standard CCD-Detektoren mit 512*512 Array bzw. 512*768 Array können ca. 25 Bilder pro Sekunde erzeugen /131/.

□ Anwendungspotential:

Um Abschattungseffekte zu vermeiden ist auch hier ein geringer Triangulationswinkel zu wählen. Da komplette Meßlinien aufgenommen werden und deswegen die Möglichkeit zum Ausregeln von Reflexionsdifferenzen fehlt, sind erhebliche Störungen zu erwarten. Durch die max. Arraybreite von 768 Punkten und durch die Annahme von 4 Meßpunkten/mm läßt sich die max. Meßbreite auf 192mm festlegen. Durch die Erweiterung durch einen zweiten Sensor kann diese verdoppelt werden. Die vorgegebene Auflösung von 4 Punkten/mm und die Aufnahmegeschwindigkeit von 25 Bilder/sek ergibt eine Meßgeschwindigkeit von 6mm/sek.

Um die Eignung des Meßsystems zu verifizieren, wurden am Beispiel einer Leiterplatte verschiedene Aufnahmen gemacht. In Bild 50 ist das Meßprinzip, eine exemplarische Aufnahme (Grauwerte entsprechen Höhen) und das Ergebnis einer nachgeschalteten Kantenextraktion dargestellt. Das Höhenbild ist jederzeit für eine Weiterverarbeitung geeignet.

Strukturierte Beleuchtung

Die Meßverfahren mit strukturierter Beleuchtung basieren auf dem Prinzip des Lichtschnittverfahrens. Durch die gleichzeitige Projektion mehrerer Meßlinien (z.B. ein feines Streifenmuster) auf die Oberfläche des Objekts und deren zeitgleiche Aufnahme mit z.B. CCD-Matrixdetektoren wird das Oberflächenprofil des Objekts mit einer geringen Anzahl von Aufnahmen erfaßt und ausgewertet. Große Schwierigkeiten bereitet jedoch die Zuordnung der Linien.

Eine erhebliche Verbesserung bietet die Methode des codierten Lichtansatzes, bei der in einer bestimmten Reihenfolge codierte Streifenmuster (n Streifenmuster) auf die Oberfläche projiziert werden. Die Streifenmuster ermöglichen die Unterscheidung von $2n$ unterschiedli-

chen Profillinien, die sich jeweils durch eine Hell–Dunkel–Stufe auszeichnen. In /106/ wird ein System vorgestellt, mit welchen 7 bzw. 8 Streifenmuster (320 bzw. 640 Linien) projiziert werden. Durch die Auswertung können entsprechend der Auflösung einer Standard CCD–Matrixkamera 512 *512 Meßwerte erfaßt werden. Die Genauigkeit in der Tiefenrichtung variiert zwischen 0,05 und 0,1% des Meßbereichs. Die Aufnahme eines Tiefendatenbilds mit diesem System erfolgt in weniger als 3 Sekunden /107/.

□ Eignung in der Anwendung:

Durch die systembedingten Eigenschaften ist zwar eine sehr schnelle Messung möglich, welche jedoch mit einer Beschränkung der Auflösung auf 512*512 Meßpunkte einher geht. Dies ergibt bei der geforderten Auflösung von 4 Meßpunkten/mm einen Meßbereich von lediglich 128mm*128mm. Um dieses Manko auszugleichen, können verschiedene Maßnahmen wie z.B. das Vorzerkleinern der Leiterplatte oder das bereichsweise Erfassen der Leiterplatte ergriffen werden.

□ Informationsgehalt:

Abgesehen von einzelnen Fehlmessungen oder Abschattungseffekten enthält das Tiefenbild einer bestückten Leiterplatte alle 3–D Koordinaten der darauf befindlichen Bauelemente und ist damit zur Erkennung geeignet.

Gewinnung von 2–dimensionalen Bildern mit Hilfe verschiedener physikalischer Effekte

Grauwertbild

Grauwertbilder werden mit Hilfe von CCD Matrixkameras oder CCD Zeilen erzeugt. Um eine Aufnahme mit einer Matrix zu erzeugen, wird das Objekt unter einer geeigneten Beleuchtung positioniert und durch den CCD–Sensor abgebildet.

Großen Einfluß auf die Qualität und den gewünschten Informationsinhalt fällt der Auswahl der Beleuchtung zu. Zur Erfassung von Formmerkmalen ist es sinnvoll, die Beleuchtung so zu wählen, daß die Konturen der Bauelemente kontrastreich dargestellt werden, während Helligkeits– und Farbunterschiede der Bauelemente möglichst verschwinden. So bietet es sich an, Aufnahmen mit gerichtetem Auflicht zu erzeugen. Dabei werden die Kanten der Bauelemente durch Schlagschatten hervorgehoben. Die optimale Beleuchtung müßte in diesem Fall mit vier entsprechend ausgerichteten Lichtquellen erzeugt werden. Um Überschneidungen zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, die vier Lichtquellen in zeitlicher Abfolge zu zünden und vier Aufnahmen zu erzeugen.

Ähnlich kann auch bei Aufnahmen mit einer CCD Zeile verfahren werden. Hier muß jedoch das Objekt relativ zur Zeile bewegt werden. Diese kinematische Verschiebung kann jedoch auch mit der Funktion des Materialflusses, soweit die Genauigkeit mit den Anforderungen an eine Aufnahme übereinstimmt, kombiniert werden.

- Stand der Technik:
CCD Matrixkameras besitzen i.d.R. eine Standardauflösung von 512*512 Meßpunkten, wobei sich auch Flächensensoren mit bis zu 2048*2048 Meßpixeln auf dem Markt befinden. CCD–Zeilen hingegen sind mit bis zu 6000 Meßpunkten erhältlich /131/.
- Eignung für die Aufgabe:
Beim Einsatz einer Standard CCD–Matrixkamera beschränkt sich der Meßbereich, analog zum Verfahren des strukturierten Lichts, auf 128mm*128mm und ist zur Erfassung einer vollständigen Leiterplatte zu klein. Zur Lösung des Problems können Ansätze wie bei den Verfahren mit codiertem Lichtansatz Anwendung finden. Beim Einsatz von Zeilensensoren hingegen entstehen keine Dimensionsprobleme. Die Auflösung in Bewegungsrichtung wird durch die Bildfrequenz (bis zu 10.000 Zeilen/sek) bestimmt. Bei der geforderten Auflösung sind theoretisch 2.500 mm/sek möglich, was eine Taktzeit von unter einer Sekunde bedeuten würde. Die einzelnen Zeilen würden im nächsten Rechenschritt zu einer gesamten Matrix zusammengefügt und ständen dann, gleichwertig zu Aufnahmen mit einer CCD–Matrix, zur Verfügung.
- Informationsgehalt der Aufnahmen:
Mit Hilfe von CCD–Aufnahmen wird ein Objekt anhand des von ihm reflektierten Lichts erfaßt. Dabei werden Informationen über Farbgebung und Reflexion der Oberflächen sowie über die Oberflächenbeschaffenheit selbst erzeugt. Diese lassen sich jedoch nicht ohne weiteres voneinander trennen, sondern bilden ein komplexes Gemisch. So kann eine als Kante deutbare Information auch durch einen Farb– oder Oberflächenbeschaffenheitswechsels verursacht werden. Infolge dessen ist die so erzeugte Bildinformation nur sehr schwer für die gestellte Aufgabe nutzbar.

Thermographie

Infrarotbilder stellen die emittierte Wärmestrahlung von Objekten dar. Bei bekannten Emissionsverhältnissen kann somit die Temperatur für jeden Bildpunkt ermittelt werden. Typische thermographische Kameras arbeiten mit einer Auslösung von 256*256 Bildpixeln und können ein Bild in weniger als einer Sekunde erzeugen. Diese können mit bekannten Bildverarbeitungsalgorithmen weiter verarbeitet werden.

Der Einsatz einer Thermokamera in diesem Aufgabenfeld ist jedoch an eine vollflächige Erwärmung gebunden, die bei einer simultanen Demontage u.U. durch den Einsatz großflächiger Lotbäder ermöglicht würde. Die Leiterplatte muß dabei in ein Lotbad eingelegt werden, die Erwärmung kann dann mit der Kamera aufgenommen werden (Bild 51). Durch den direkten Kontakt zwischen Lotbad und Leiterplatte wird diese sehr schnell erhitzt, während die Bauelemente auf der Oberfläche nur langsam erhitzt werden. Der dadurch entstandene Wärmekontrast kann aufgenommen und zur Klassifikation benutzt werden. Ein Beispiel ist in Bild 51 zu sehen. Hier wurde die Aufnahme nach 4 Sekunden gemacht.

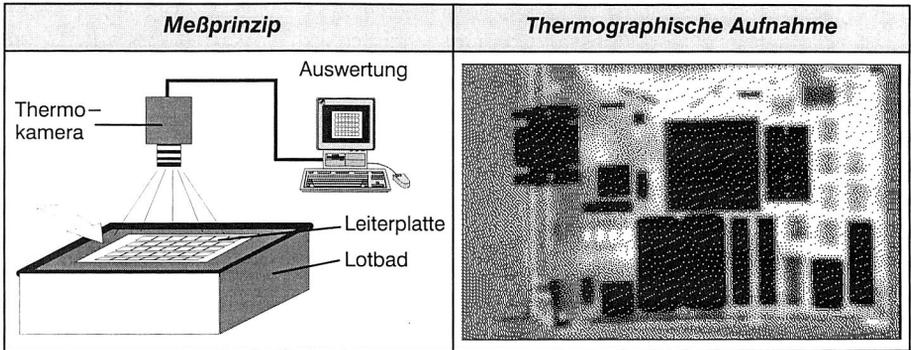


Bild 51: Versuchsaufbau zum Erzeugen thermographischer Aufnahmen von im Lötbad erhitzter Leiterplatten

□ Informationsgehalt:

Aufnahmen mit Infrarotkameras können als Durchlichtverfahren verstanden werden, welches die Bauelementkonturen wiedergibt. Wie in Bild 51 deutlich wird, kann nur der grobe Umriß der Objekte erkannt werden, wobei die Beinchen nicht erkennbar sind (sind auf Lötbadtemperatur erwärmt). Die Trennschärfe reicht jedoch nicht immer aus, um eng nebeneinanderliegende Bauelemente optisch aufzulösen. Durch das Verfahren wird eine erhebliche Datenreduktion durchgeführt, die im Endeffekt aber nur eine Klassifizierung sehr voluminöser rechteckiger Geometrien als Bauelemente zuläßt, wobei es dabei zu Verwechslungen mit z.B. Kühlkörpern (rechteckig, große Wärmekapazität, keine Beinchen erkennbar) kommen kann.

Röntgenbilder

Das Prinzip der Röntgenverfahren beruht auf der Absorption von Röntgenstrahlen in verschiedenen Materialien. Dabei emittiert eine Röntgenröhre Strahlen, die das Werkstück durchdringen und auf einem Schirm als Intensitätsprofil der noch auftreffenden Röntgenstrahlen aufgezeichnet werden, die wiederum von einer CCD-Kamera als Grauwertbild aufgenommen werden (Bild 52). Dabei kann durch die Variation der Beschleunigungsspannung der Strahlenkanone der Kontrast des zu erzeugenden Bildes optimal auf das Objekt abgestimmt werden.

□ Stand der Technik

Vergleichbare Systeme werden in der Qualitätsicherung eingesetzt und entsprechen bzgl. der Aufnahmegeschwindigkeit und Auflösung der Leistungsfähigkeit der eingesetzte CCD Arrays (siehe auch Grauwertbild). Zur Verarbeitung können konventionelle Bildverarbeitungssysteme eingesetzt werden.

□ Informationsgehalt

Da vor allem Metalle Röntgenstrahlen absorbieren, zeigt das Röntgenbild lediglich das Abbild der metallischen Komponenten einer Leiterplatte. Dabei nimmt die Intensität der aufge-

fangenen Strahlung mit der Dicke des durchleuchteten Materials ab. Vor allem diese Art der Muster scheint für die Klassifikation integrierter Schaltkreise als geeignet, auch in Hinblick neuer Packagingtechnologien (PGA, BGA), deren elektrische Kontakte bei der Draufsicht nicht zu erkennen sind. Wird eine Leiterplatte durchstrahlt, so stellen die senkrecht dazu stehenden Beinchen sowie die Lötmenisken einen sehr großen Absorptionswiderstand dar, der Anzahl, Raster und Typ der Beinchen gut sichtbar werden läßt. Außerdem können die durchstrahlten Leadframes und deren signifikantes Muster zur Erkennung genutzt werden. Allerdings werden auch andere Metallkomponenten aufgezeichnet, wie z.B. Kühlkörper, Metallgehäuse oder auch Sockel. Letztere stellen ein weiteres Problem dar, da hier eine Überlagerung der ICs mit anderen Mustern erzielt wird. Weiterhin können sich auch Probleme bei der Zuordnung der Raster zum Bauelement ergeben, da das Gehäuse als integrierender Bestandteil nicht abgebildet wird. Aber auch hier zeichnet sich durch die Kombination von CCD und Röntgenaufnahme eine Lösung ab, die jedoch mit erheblichen Aufwand verbunden wäre.

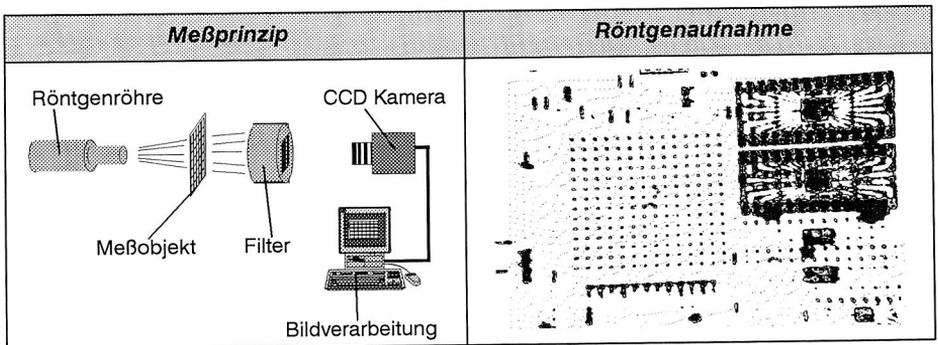


Bild 52: Versuchsaufbau zum Erzeugen von Röntgenaufnahmen von Leiterplatten

6.2.3 Auswahl des Meßprinzips zur Informationsgewinnung über Leiterplatten

In Tab. 14 werden die beschriebenen Verfahren gegenübergestellt und nach den Kriterien Informationsart, Nutzbarkeit und Auswertbarkeit der Informationen, lateraler Meßbereich, zusätzliche kinematische Einheiten, Auflösung in Meßrichtung, Dauer der Erfassung und die Investitionskosten bewertet.

Wegen der prinzipiellen Einsetzbarkeit des auszuwählenden Meßverfahrens hat die Qualität der verfügbaren Informationen (auch Auflösung in Höhenrichtung) und deren Auswertbarkeit höchste Priorität. Die Dauer der Erfassung und der darauf folgenden Klassifikation darf maximal den mechanischen Demontagezeiten incl. der Prozeßnebenzeiten entsprechen. Die Aspekte der Meßbereiche der zur Erfassung benötigten kinematischen Einheiten können durch technische Lösungen überwunden werden, würden jedoch in einigen Fällen die Investitionskosten erheblich steigern.

Verfahren	Punkttri- angulation	Licht- schnittverf.	Cod. Licht- ansatz	CCD- Zeile	CCD- Matrix	Röntgen- system	Thermka- mera
Informa- tionsart	Tiefenbild			2D Bild		Röntgen- bild	Infrarot- bild
Nutzbare Infos	++			0		0	-
Auswert- barkeit	++			-		+	++
Meßberei- che horiz./ vert. [mm]	∞	128-192/ ∞	128-129/ 128	bis 1500/ ∞	128-12 9/128	128-129/ 128	variabel
Benötigte Kinematik	2 Achsen	1 Achse	-	1 Achse	-	-	-
Erfas- sungszeit	--	0	+	++	++	++	++
Invest.	-	+	+	+	++	--	-

Tabelle 14: Zusammenstellung von Merkmalen geometrieefassender Meßsysteme (++ sehr gut, + gut, 0 ausreichend, - schlecht, -- sehr schlecht)

Als Ergebnis der Untersuchung bieten sich vor allem wegen der hohen Güte der zur Verfügung gestellten Informationen die Auswertung von Tiefenbildern an. Dies ist auch vor dem Hintergrund von Kollisionskontrollen zu sehen, die durch die Höheninformation erst möglich werden. Durch die Integrationsfähigkeit des Lichtschnittverfahrens in den Materialfluß scheint vor allem dieses Prinzip sehr geeignet.

6.3 Konzeption und Realisierung eines Mustererkennungssystems zur Erzeugung von Entstückdatensätzen

Die auf der Basis von Triangulationstechniken erzeugten Tiefenbilder vollständig bestückter Leiterplatten sind daraufhin zu untersuchen, welche wiederverwendbaren Bauelementtypen sich wo auf der Leiterplatte befinden. Die Bauelementtypen und deren Entstückkoordinaten sind als Entstückdatensatz an die Steuerung des Demontagesystems zu übermitteln, welche sie dann in eine Demontagesequenz übersetzt. Zur Bearbeitung dieser Aufgabe stehen die in Kap. 6.1 dargestellten Methoden zur Mustererkennung und -analyse zur Verfügung.

Die Bildverarbeitung muß hinsichtlich der zu erwartenden Vielfalt neuer Gehäuseformen sowie der sich ständig verändernden Absatzmärkte sehr flexibel gestaltet sein. Trotzdem muß auch auf eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit geachtet werden. Unter Annahme einer zu verarbeitenden Leiterplatte der Dimension 120mm*300mm, einer Bildaufnahmezeit von ca. 1 min mit Lichtschnittverfahren und einer Entstückzeit von ca. 50s im Lötbad bzw. 5 min mit Heißgas bei insgesamt 5 zu entlötenden Bauelementen stehen folglich max. 4 min zur Informationsauswertung zur Verfügung. Lange Verarbeitungszeiten wirken sich kritisch auf die Auslastung der angeschlossenen Demontagezelle(n) aus.

Besondere Anforderungen an die Verarbeitungssicherheit stellen zusätzlich die u.U. schon beschädigt oder verschmutzt angelieferten Leiterplatten. Der Bildverarbeitungsalgorithmus muß daher sehr fehlertolerant aufgebaut sein.

6.3.1 Syntaktische Methoden zur Musteranalyse und Klassifikation

Betrachtet man die zu analysierenden bzw. zu klassifizierenden Gehäuseformen, so fallen folgende Eigenschaften auf:

1. Es gibt nur einige wenige Grundtypen (DIP, SO, PLCC, PQFP),
2. Konkrete Gehäuseformen entstehen durch Variation der Grundtypen mittels:
 - Wiederholung von Grundstrukturen wie Anschlußbeinchen,
 - Veränderung von Abständen (z.B. Abmessungen der Gehäusegrundkörper),
3. Die Bauelemente orientieren sich in der Regel an einer 90° bzw. 180° – Ausrichtung (vertikale und horizontale Grundorientierung),
4. Alle Gehäusetypen lassen sich durch wenige, charakteristische Merkmale beschreiben (Ecken, Kanten, Beinchen, ...).

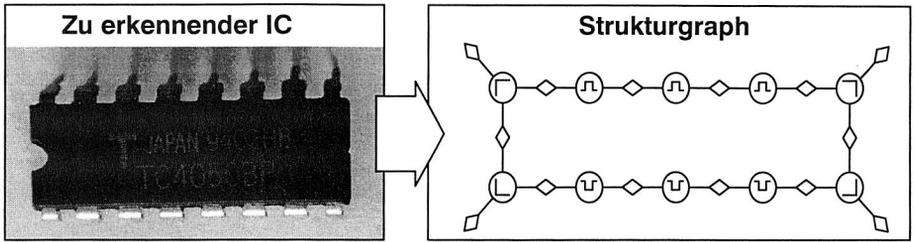
Zur Analyse derart gestalteter Objekte sind sogenannte syntaktische Musteranalyse- und Klassifikationsverfahren besonders geeignet. Sie beschreiben Objekte durch eine (kleine) Anzahl von Grundobjekten (terminale Symbole), die durch Regeln (Produktionen) zu größeren Objekten zusammengefaßt werden (Grammatik). Eine geschickte Formulierung der Regeln einer Grammatik erlaubt auch das Definieren von Wiederholungen und Variationen von Objektstrukturen, so daß oftmals eine kompakte Beschreibung von Objekt-Grundtypen genügt.

Die eigentliche Analyse- bzw. Klassifikationsaufgabe wird dann durch Ableitungsalgorithmen (Parser) bewerkstelligt. Sie werden für einen bestimmten Grammatiktyp formuliert und erhalten als Parameter Objektbeschreibungen in Form von Regeln, terminalen Symbolen usw.. Damit können konkrete Objektbeschreibungen in einem Muster abgeleitet werden.

Die Vorteile syntaktischer Ansätze für die Aufgabenstellung liegen neben der einfachen Beschreibung bestimmter Objekttypen und der flexiblen, aber dennoch engen Verknüpfung von Objektbeschreibung und Ableitungsstrategie des Parsers in der Tatsache, daß nur definierte Objekte "gesucht" werden und keine aufwendige initiale Segmentierung des Eingangsbildes notwendig ist.

6.3.2 Definition und Systematik von Strukturgrammatiken

Die wesentliche Idee zur Definition von Strukturgrammatiken liegt in der Repräsentation von Objekten durch Grundmerkmale, die durch Nachbarschaftsbildung in einer für das Objekt charakteristischen Struktur angeordnet sind.



Symbole:

Bo Beinchen oben
 Bu Beinchen unten
 E Ecke
 —◇— Anschlußknoten

Bild 53: Objektmodellierung durch einen terminalen Strukturgraphen

In Bild 53 wird ein IC-Gehäuse durch charakteristische Merkmale wie 'Ecken' und 'Beinchen oben' bzw. 'Beinchen unten' abgebildet. Das Objekt wird repräsentiert durch einen terminalen Strukturgraphen, der aus terminalen Symbolknoten (Kreise) und daran anknüpfende Verbindungs- bzw. Anschlußknoten (Rauten) besteht. Seine terminalen Symbolknoten sind mit Symbolen beschriftet, die jeweils ein charakteristisches Merkmal des Objekts darstellen. Über die Anschlußknoten der terminalen Symbolknoten werden Verbindungen zu Nachbarknoten hergestellt, die in ihrer Gesamtheit die Objektstruktur widerspiegeln. Ein Anschlußknoten kann dabei mit höchstens zwei Symbolknoten verbunden sein.

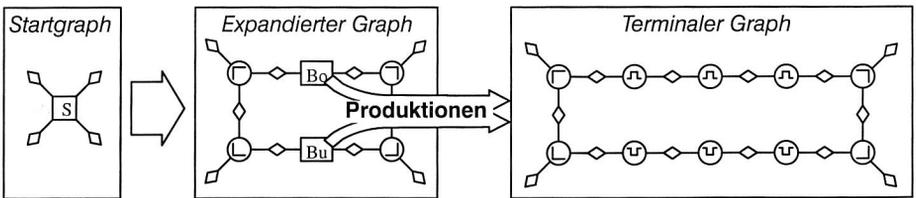


Bild 54: Abstraktion durch Zusammenfassen von Teilstrukturgraphen zu Nichtterminalknoten

In einzelnen Abstraktionsschritten werden – wie in Bild 54 beispielhaft gezeigt – Teile eines Strukturgraphen zusammengefaßt und durch einen Nichtterminalknoten (Rechteck) mit nichtterminaler Symbolbeschriftung im "übergeordneten" Strukturgraphen ersetzt. An der Spitze des Abstraktionsprozesses steht ein nur aus einem Nichtterminalknoten bestehender "Startgraph". Diese Vorgehensweise erlaubt das Wiederverwenden von Teilgraphen in unterschiedlichen Strukturgraphen an verschiedenen Stellen. Somit sind nach dem Baukastenprinzip einfache und übersichtliche Objektmodellierungen möglich. Durch das Einführen von Rekursion und Alternativenbildung kann eine zusätzliche Kompaktifizierung erreicht werden.

Die Produktionen einer Beispielgrammatik sind in Bild 55 aufgeführt. Sie bestehen aus einer linken und einer rechten Seite. Bei Strukturgrammatiken ist die linke Seite ein Strukturgraph, der nur einen Nichtterminalknoten enthält, die rechte Seite ein Strukturgraph, der mindestens so viele Randknoten (= Anschlußknoten mit nur einem Symbolknoten als Nachbarn) hat wie die linke Seite Anschlußknoten aufweist. Sie sind durch die (injektive) Zuordnung von Anschlußknoten der linken Seite zu Randknoten der rechten Seite verknüpft. Da mehrere Produktionen die "gleiche" (isomorphe) linke Seite aufweisen können, ist auch das Formulieren von Alternativen und von Rekursionen möglich.

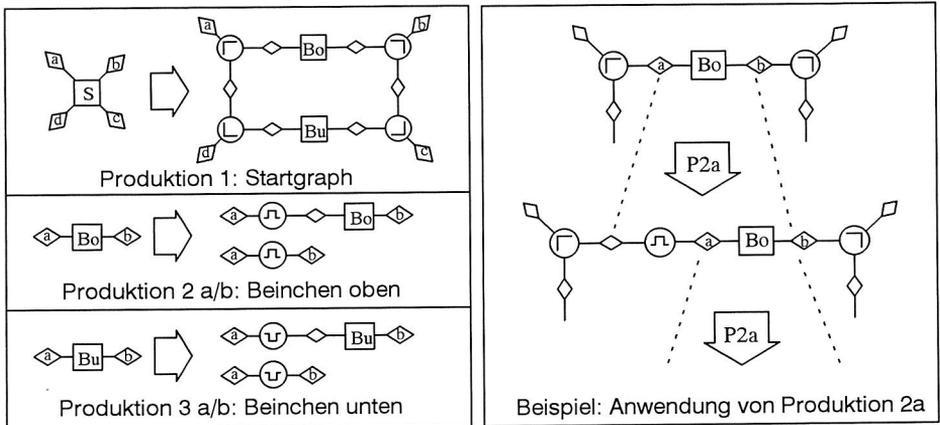


Bild 55: Beispielgrammatik zur Beschreibung eines DIL – Gehäuses mit variabler Beinchenanzahl

Beispiel (Bild 55): Die Transformation eines Strukturgraphen ist eine Teilableitung eines Ausschnitts eines Strukturgraphen (obere Beinchenreihe) unter Verwendung der Produktion P2a (Bild 55 rechts). Jeder Ableitungsschritt ist dadurch gekennzeichnet, daß ein Nichtterminalknoten, der mit der linken Seite einer Produktion übereinstimmt, aus dem umgebenden Strukturgraphen ausgeschnitten und durch die rechte Seite der Produktion ersetzt wird. Die Lage der Anschlußknoten bleibt dabei unverändert.

6.3.3 Entwicklung eines Parsers für Strukturgrammatiken

Zur Durchführung der vorher beschriebenen Musteranalysemethode muß ein Ableitungsalgorithmus (sog. Parser) entworfen werden, der Startgraphen einer Strukturgrammatik in terminale Strukturgraphen übersetzt. Ziel einer Ableitung ist das Auffinden eines zum erkennenden Objekt passenden Strukturgraphen durch sukzessives Anwenden von Produktionen der gegebenen Strukturgrammatik.

Grundidee des Parsers ist eine Top-down-Ableitung beginnend beim Startgraphen durch schrittweises hinzunehmen von Symbolknoten, die zu bereits abgeleiteten Symbolknoten benachbart sind. Ist der zu addierende Symbolknoten nichtterminal, so werden alle darauf

anwendbaren Produktionen bestimmt und alle durch Anwendung der Produktionen entstehenden neuen Strukturgraphen berechnet (Expansion). Mit einem der Strukturgraphen wird dann die Fortsetzung der Ableitung versucht. Im Fall gewählter terminaler Symbolknoten wird die Ableitbarkeit des Terminalsymbols geprüft (Vorhandensein des entsprechenden Objektmerkmals). Bei Nichtableitbarkeit wird der betrachtete Strukturgraph und die dazu führende Ableitung verworfen. Mit einem alternativen Strukturgraphen wird der Ableitungsversuch wiederholt, bis ein passender terminaler Strukturgraph gefunden wurde oder es keine alternativen Fortsetzungen mehr gibt.

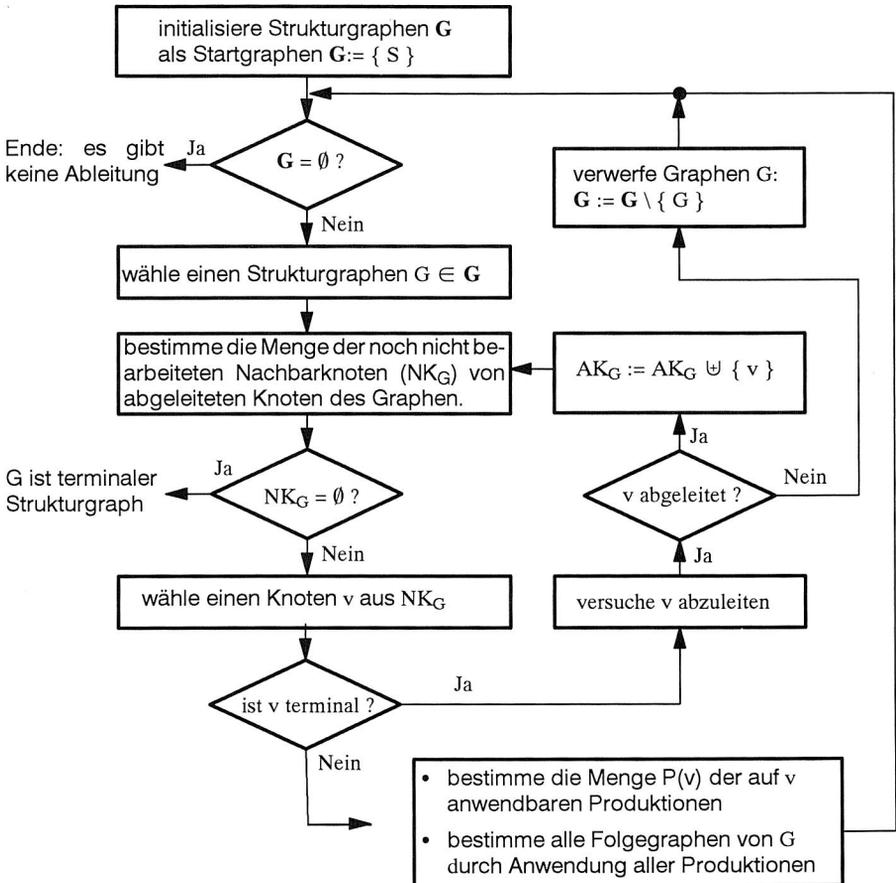


Bild 56: Algorithmus zur Ableitung terminaler Strukturgraphen

Der beschriebene Algorithmus ist in Bild 56 als Flußdiagramm dargestellt. Dabei steht \mathbf{G} für die Menge der bisher erzeugten Strukturgraphen, deren Ableitung potentiell fortgesetzt

werden kann, AK_G für die Menge der bereits abgeleiteten (terminalen) Symbolknoten eines Strukturgraphen G und NK_G für die Menge der zum abgeleiteten Symbolknoten benachbarten, aber noch nicht abgeleiteten Symbolknoten.

Durch den rekursiven Durchlauf des beschriebenen Algorithmus können, in Abhängigkeit von der zugelassenen Produktion eine sehr große Anzahl aufeinanderfolgender Berechnungsschritte benötigt werden. Um die damit einhergehende lange Laufzeit des Berechnungsvorgangs zu reduzieren und um die Erkennungsqualität trotzdem hoch zu halten, sind Strategien einzuführen, die das Parsing der Struktur optimieren.

6.3.4 Parserstrategien und Attributverarbeitung

Erkennung terminaler Symbolknoten

Ziel der Erkennung terminaler Symbolknoten ist die Feststellung, ob in einem Musterausschnitt (z.B. Bildausschnitt) ein vorgegebenes terminales Symbol vorliegt. Aufgrund von Meßfehlern, verwendeten Klassifikationsverfahren und möglicherweise vorliegenden Störungen, wird die Entscheidung nicht (immer) eindeutig sein, sondern mit einer gewissen Erkennungswahrscheinlichkeit p_t einhergehen. Für das weitere Vorgehen bieten sich zwei Verfahren an:

- *Breitensuche:*
Die Erkennungswahrscheinlichkeit p_t fließt unverändert in den Analyseprozeß ein. Diese Methode hat den Nachteil, daß alle möglichen Ableitungen konstruiert und bewertet werden müssen. Am Ende fällt die Entscheidung für die wahrscheinlichste Ableitung und den damit verbundenen wahrscheinlichsten terminalen Strukturgraphen. Sie liefert damit zwar die sichersten Entscheidungen, jedoch auf Kosten eines sehr großen Berechnungsaufwands.
- *Tiefensuche:*
Mit einer lokalen Schwelloperation wird eine Entscheidung herbeigeführt. Eine Ableitung wird bei diesem Verfahren bereits als gescheitert betrachtet, wenn nur ein Terminalsymbol nicht erkannt werden kann. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist sehr hoch, da 'unsichere' Ableitungen möglichst bald aussortiert werden. Außerdem müssen immer nur endlich viele Ableitungen betrachtet werden, da ein Muster als Bedingung nur aus endlich vielen Terminalsymbolen besteht. Jedoch führen schon kleine Störungen des Eingangssignals dazu, daß ein Objekt nicht mehr erkannt wird.

Das Problem kann in Anlehnung an Algorithmen der Informationstheorie /162/ mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsbeziehungen und den daraus ableitbaren, am häufigsten auftretenden Entscheidungsreihenfolgen bearbeitet werden können. Durch Einführung einer Gewichtungsfunktion für Symbolknoten, die zum Beispiel für ein Objekt die wahrscheinlichere bzw. charakteristischere Terminalsymbole bevorzugt, kann eine Reihenfolge festgelegt werden. Bei der Tiefensuche kann durch die Gewichtung der anwendbaren Produktionen eine Suchreihenfolge etabliert werden.

Robuste Erkennung durch Fehlermodellierung

Bei der letztgenannten Parserstrategie verursachen trotz gewichteter Ableitungen schon kleine Störungen eine sinkende Erkennungsquote. Dieser Nachteil läßt sich ausgleichen, indem 'Störstellen' gesondert behandelt werden.

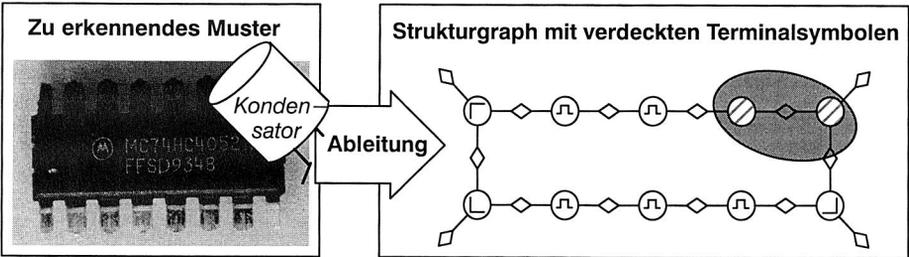


Bild 57: Beispiel für eine fehlerbehaftete Erkennungsaufgabe: der schräggestehende Kondensator verdeckt den zu erkennenden IC

Für diese als Fehlermodellierung bezeichnete Vorgehensweise bieten sich folgende Ansätze an:

1. Die potentiell auftretenden Fehler werden durch entsprechende Produktionen und Terminalsymbole modelliert, wobei diese Art der Fehlermodellierung sehr aufwendig zu implementieren ist und sehr unflexibel auf nicht vorherzusehende Störungen reagieren kann.
2. Modellierung nach dem 'Look-ahead-Modell':
Bei dieser Art der Verarbeitung reagiert der Parser in besonderer Art und Weise auf auftretende Fehler. Kann ein Terminalknoten nicht abgeleitet werden, dann wird er probenhalber durch einen Fehlerknoten ersetzt, mit dem eine Fortsetzung der Ableitung versucht wird. Oftmals genügt das Einfügen eines einzelnen Fehlerknotens nicht. Für die Gesamtableitung ergibt sich somit die Problematik 'richtige' von 'falschen' Ableitungen zu unterscheiden.

Um richtige Ableitungen zu erreichen, können an die Ableitbarkeit eines Fehlerknotens zusätzliche Bedingungen geknüpft werden:

- Eine vorgegebene obere Schranke für die Anzahl von Fehlerknoten darf (pro Objekt) nicht überschritten werden.
- Fehlerknoten werden zusätzlich gewichtet; die Gewichtssumme (pro Objekt) darf eine vorgegebene Obergrenze nicht überschreiten. (Beispiel: Beinchen sind weniger gewichtet als Ecken.)
- An die Stelle des Fehlerknotens dürfen gewisse zusätzliche (andere) Terminalsymbole nicht auftreten. (Beispiel: Ein Fehlerknoten für ein Anschlußbeinchen darf nur abgeleitet werden, wenn an dieser Stelle keine Ecke gefunden werden kann.)

Dynamisches 'Look-ahead-Modell'

Das dynamische 'Look-ahead-Modell' geht davon aus, daß eine Ableitung um so wahrscheinlicher ist, je mehr terminale Symbole bereits erkannt worden sind, und läßt entsprechend größere Störstellen zu.

- Ein erfolgreich abgeleitetes Terminalsymbol spricht für die favorisierte Ableitung. Die Fehlerschranke wird um eine für das Terminalsymbol definierte Anzahl von "Fehlerpunkten" angehoben, um größere Störstellen zu erlauben.
- Kann ein Terminalsymbol nicht abgeleitet werden, so wird überprüft, ob die Fehlerschranke über dem Gewicht des Terminalsymbols liegt. Wenn dies der Fall ist, wird ein Fehlerknoten abgeleitet, der gleichzeitig die Fehlerschranke um eine für das Terminalsymbol definierte Anzahl von "Fehlerpunkten" reduziert. Ist die Fehlerschranke zu klein, dann wird die aktuelle Ableitung verworfen.

Die bisherige Definition von Strukturgraphen und Strukturgrammatiken läßt einige wichtige Fragen offen:

- In welchen Musterausschnitten soll nach den Terminalsymbolen eines Objekts gesucht werden, insbesondere, wenn bereits Objektteile abgeleitet sind?
- Wie werden Objektvarianten modelliert bzw. erkannt, die sich nur in einigen Größenparametern, nicht aber in ihrer Struktur, unterscheiden?
- Wie wird die konkrete Position bzw. Lage eines Objekts im Muster beschrieben?
- Können Zusatzattribute wie die Anzahl von Anschlußbeinchen berechnet werden?

Erweiterung der Parserstrategien um eine Attributverarbeitung

Zur Beantwortung der Fragen müssen ergänzende Informationen zur Verarbeitung zugezogen werden und als Attributierung in der Strukturgrammatik verankert werden.

Lageattribute zur variablen Beschreibung gleicher Strukturen

Sie sollen die Lage eines Terminalsymbols innerhalb eines zu analysierenden Musters angeben. Im zweidimensionalen Fall wird die Lage eines Terminalsymbols durch die x- und y-Position eines definierten Referenzpunktes (z.B. Schwerpunkt) festgelegt. Entscheidend für die konkrete Ausprägung einer Objektstruktur ist die Lage der Terminalsymbole zueinander. In einem attributierten Strukturgraphen wird sie durch die knotenbezogene Relationen $R_{va,b}$ modelliert, die den Kanten zwischen Terminal- und Anschlußknoten zugeordnet sind.

Bei der Verknüpfung der Terminalknoten müssen nun auch unterschiedliche Lagerrelationen berücksichtigt werden. Dies führt zu einem erhöhten Bearbeitungsaufwand, ermöglicht aber die flexible Anpassung der Grammatik an unterschiedliche (auch neue) Geometrien. Es wird dadurch ermöglicht, unterschiedliche Ausprägungen gleicher Strukturen zu modellieren.

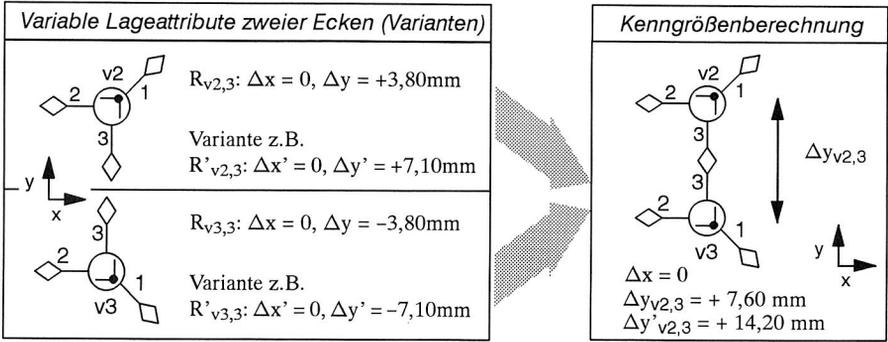


Bild 58: Variable Lageattributierung von Ecken und deren Zusammenführung in Strukturgrammatiken zur Bestimmung der geometrischen Kennwerte des Musters

Suche von Startgraphen und der benachbarten Terminalknoten

Ein Analysevorgang zur Suche von Terminalknoten beruht auf der Auswertung der Lageattribute und den damit festgelegten Suchräumen. Sobald die Menge der erlaubten Lageattribute für einen Anschlußknoten bekannt ist, kann die Menge der möglichen Lageattribute für einen benachbarten Terminalknoten v berechnet werden. Der "Suchraum" für das Terminalsymbol von v ist somit berechnet.

Für den Startgraphen kann so auch der Musterschnitt festgelegt werden, in dem die Suche nach dem ersten Terminalsymbol ("hot spot") stattfindet. Dazu werden als Lagerelationen für die Randknoten des Startgraphen die Lage nicht verändernde Identitätsrelationen festgelegt. Die Lagemenge eines Randknotens ist dann zugleich die Suchmenge des damit verbundenen Terminalknotens.

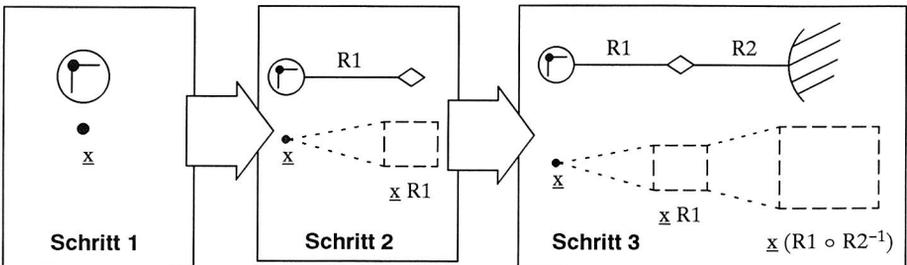


Bild 59: Ableitung des ausgewählten, benachbarten Terminalknotens

Wenn ein Terminalknoten und damit seine Lageattribute gefunden wurden, muß auch die Lage-Suchmenge für einen benachbarten, für die Ableitung ausgewählten Terminalknoten berechnet werden. Hierzu sind drei Schritte notwendig:

1. Die Lageattribute des gefundenen Terminalknotens müssen bestimmt werden.
2. Die Menge der erlaubten Lageattribute für den gemeinsamen Anschlußknoten müssen als Relationenbild der Lageattribute \underline{x} berechnet werden.
3. Der Suchraum des abzuleitenden Terminalknotens als relationales Urbild der Anschlußknotenmenge muß berechnet werden.

Man beachte, daß der berechnete Suchraum von beiden Terminalknoten abhängig ist, da beide Kantenrelationen R1 und R2 eingehen. Bei einem alternativ ableitbaren Terminalknoten ergibt sich ein anderer Suchraum.

Attributverarbeitung der Nichtterminalknoten zur Objektbeschreibung

Zusätzlich zu den Lageattributen der Terminalknoten werden oft noch weitere Informationen über ein abgeleitetes Objekt benötigt. Beispiele sind die Anzahl der Anschlußbeinchen, der Objektschwerpunkt oder die Objektausdehnung. Sie setzt sich in der Regel aus Informationen der Teilobjekte bis hin zu den Terminalknoten zusammen.

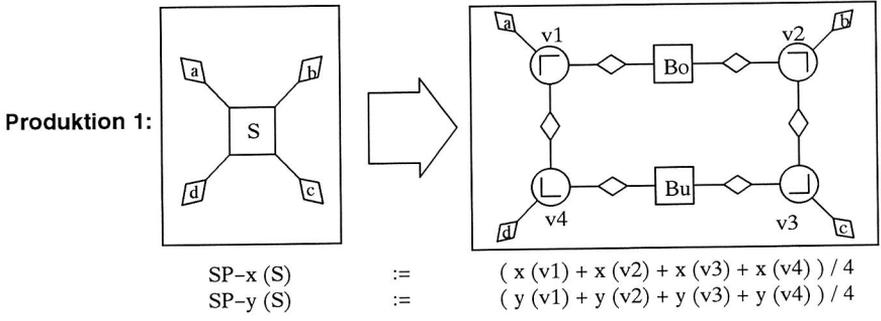


Bild 60: Die Berechnung von Objektschwerpunkten durch Attributverarbeitung

Daher läßt sich folgendes Schema definieren (siehe auch /89, 90/) :

- Für abgeleitete Terminalknoten werden Zusatzattribute durch Zusatzfunktionen berechnet, die für jeden Terminalknoten einer Produktion definiert werden.
- Bei abgeleiteten Fehlerknoten werden definierte Default–Werte eingesetzt.
- Zu jeder Produktion wird eine Funktion definiert, die aus den (Zusatz–) Attributen der Knoten der rechten Seite den Wert eines Zusatzattributs des Nichtterminalknotens der linken Seite berechnet. Die Auswertung der Zusatzfunktionen erfolgt in umgekehrter Reihenfolge des Ableitungsprozesses nach Ableitung eines terminalen Strukturgraphen.

6.3.5 Implementierung des Parsers zur online Identifikation von ICs

Ausgangspunkt der durchzuführenden Analyse ist das Höhenprofil einer zu entstückenden Leiterplatte. Im ersten Analyseschritt ist ein Startsymbol zu finden, auf welchem die Struk-

turgrammatik angewandt werden kann. In der Implementierung ist ein Analysefenster definiert, welches sequentiell auf der Bildoberfläche verschoben und linksbündig an das vorhergehende Fenster angelegt wird. Dabei wird das Bildmuster zeilenweise vom linken hinteren Leiterplatteneck bis zum rechten vorderen Eck abgearbeitet und im Zentrum eines jeden Fensters ein Referenzpunkt festgelegt. Das Analysefenster repräsentiert eine von der Rohdatendichte abhängige Menge zu analysierender Bildpunkte. Jede Analyseeinheit gibt ein Intervall vor, das den erlaubten Wertebereich des Bildpunktes beschreibt. Während der Analyse eines Fensters wird für jedes Maskenelement geprüft, ob der Wert des korrespondierenden Bildpunktes relativ zum Wert am Referenzpunkt innerhalb des entsprechenden Intervalls liegt. Wenn dies der Fall ist, dann wird das zugrunde liegende Terminalsymbol erkannt, andernfalls verworfen.

Sobald das erste Terminalsymbol (Startsymbol) erkannt wurde, wird der Parsingalgorithmus aktiviert und abgearbeitet. Zur Implementierung des Prototyps wurden die lauffähigsten Parserstrategien ausgewählt und in einem lauffähigen Computerprogramm umgesetzt. Die realisierten Strategien beruhen auf:

1. Ableitungen mit Hilfe gewichteter Produktionen.
2. Entscheidungsfindung durch Schwellwertoperationen.
3. Fehlermodellierung mit Hilfe eines dynamischen Look ahead Verfahren auf Basis einer 'integrierten Fehlerpunktesammlung'.
4. Die Hinzunahme der Nachbarknoten erfolgt erst nachdem die Ableitung expandierter Nichtterminalknoten abgeschlossen wurde und bevor andere Symbolknoten betrachtet werden.

Durch die Verkettung der Strategien können Schritt für Schritt vorgegebene Strukturen verarbeitet werden. Es wird dazu eine Folge von sogenannten Konfigurationen erzeugt, die jede für sich einen bestimmten Ableitungszustand eines Strukturgraphen beschreiben. Zur Beschreibung einer Konfiguration sind die folgenden Informationen zu speichern:

1. Der Strukturgraph (rechte Seite einer Produktion), welcher gerade abgeleitet wird,
2. die Symbolknoten welche bereits abgeleitet sind,
3. die für die Symbolknoten berechneten Attribute,
4. die Attributmenge der Randknoten des Strukturgraphen (Randknoten des nichtterminalen Symbolknotens des linken Seite der Produktion),
5. der nichtterminalen Symbolknoten, dessen Ableitung zur aktuellen Konfiguration geführt hat, inklusive der Konfiguration des umgebenden Strukturgraphen,
6. der Fehlerstatus.

Neben den erzeugten Konfigurationen müssen noch die getroffenen Entscheidungen über gewählte, anzuwendende Produktionen festgehalten werden. Dazu wird ein Entscheidungs-Stack, kurz E-Stack, eingerichtet. Der Versuch der Ableitung eines Nichtterminalknotens v führt zur Bestimmung der auf v anwendbaren Produktionen. Diese sind durch die zugrunde liegende Strukturgrammatik festgelegt und durch eine statische Datenstruktur

beschrieben. Bei der Ableitung von v wird auf dem E-Stack festgehalten, welche Produktion angewandt werden soll bzw. welche Produktionen aus der Menge aller zugelassenen Produktionen bereits angewendet wurden. Wenn eine Teilableitung nicht fortgesetzt werden kann, wird zur letzten Entscheidung zurückgekehrt und eine neue Produktion ausgewählt. Falls die Menge der noch nicht getesteten Produktionen leer ist, dann wird das letzte E-Stack-Element entfernt und die Prozedur mit dem nächsten E-Stack-Element wiederholt, bis dieser ebenfalls abgearbeitet ist.

Ablauf der Software und Ergebnisdarstellung

Nachdem das 3D-Bild erzeugt und gespeichert wurde, steht es zur Analyse zur Verfügung. Es wird erneut in den Arbeitsspeicher des Computers geladen, welches die zu analysierende Leiterplatte farblich auf dem Bildschirm darstellt. Im ersten Schritt wird das Analysefenster über der Oberfläche verschoben.

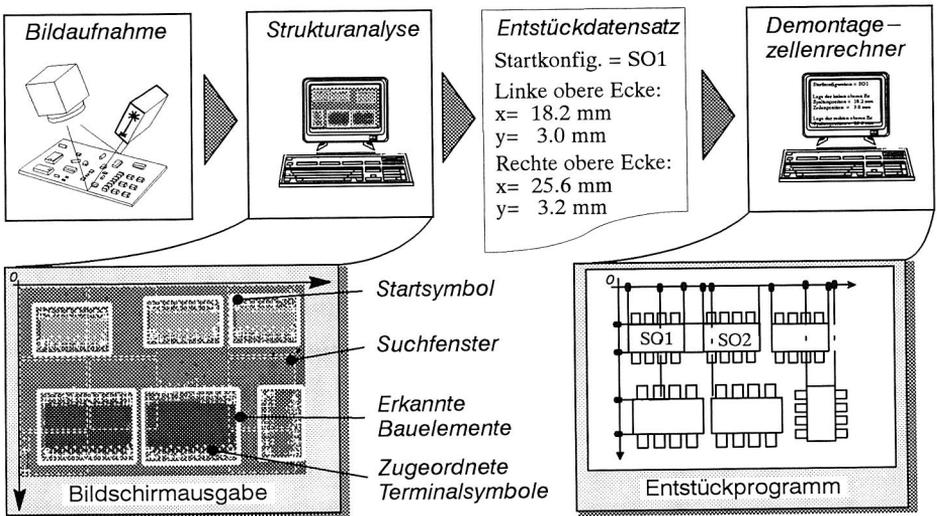


Bild 61: Darstellung des Entstückdatensatzes im systematischen Umfeld

Nachdem ein Startsymbol erkannt wurde, wird der beschriebene Parseralgorithmus gestartet und die einzelnen Strukturen abgeleitet. Bei Gelingen können mit Hilfe der Attributverarbeitung die entstückungsrelevanten Daten berechnet und in ein Ausgabefile geschrieben werden (Bild 61).

Dieses setzt sich aus der Typenangabe des Bauelements (Anzahl und Attribute der Terminalsymbole der Beinchen) und aus der geometrischen Zuordnung der Terminalsymbole der vier Ecken im gesamten Leiterplattenabbild zusammen. Dem Systembetreiber wird der Verlauf des Erkennungsprozesses durch eine Bildschirmausgabe visualisiert, so daß er den Analysefortschritt ständig abfragen und überprüfen kann.

In Bild 61 ist die Bildschirmausgabe dargestellt, wobei die Höhenwerte der Meßpunkte in Grauwerten dargestellt werden. Kreuze stellen erkannte Terminalsymbole (z.B. Ecken der verschiedenen Gehäusetypen und Anschlußpins) dar, die bei der Suche in den Analysefenstern (dünn gestrichelt umrandete Bereiche) gefunden wurden. Dick umrandete Bereiche kennzeichnen dagegen erkannte und klassifizierte Bauelemente.

6.4 Auswahl eines Sensorsystems zur automatisierten Identifikation elektrischer Bauelemente

Aufgabe des zu entwickelnden Systems ist es, elektrische Bauelemente mit hoher Taktfrequenz definierten Materialfraktionen zuzuordnen. Die Fraktionen wurden in Kap. 3.3 so ausgewählt, daß das im Konzept entworfene Recyclingsystem ökonomisch und ökologisch optimal arbeiten kann.

Im folgenden soll auf Basis des Modells zum lernenden Klassifizieren aus Kap. 6.1 ein geeignetes System entwickelt werden. Dazu werden vorab bildgebende Systeme getestet und deren Leistungsfähigkeit verglichen. Darauf aufbauend können Sortiermerkmale festgelegt werden. Mit Hilfe eines zu entwickelnden Softwaresystems werden die Merkmale dann zur abschließenden Klassifizierung der Bauelemente verarbeitet.

6.4.1 Klassifizierung von Bauelementen in Materialfraktionen und Beschreibung der Sortiermerkmale

Die Vielfalt der in Kap. 2 beschriebenen elektrischen Bauelemente sind den ausgewählten Recyclingprozessen und den damit definierten Materialfraktionen zuzuweisen. In detaillierten Analysen wurden auf Basis von Materialbilanzen mit Hilfe von rechnergestützten Ähnlichkeitsanalysen geeignete Materialgruppen gebildet. Es wurden die folgenden Bauteilklassen definiert:

- Aluminiumfraktion: Elektrolytkondensatoren,
- Tantalfraktion: Tantalkondensatoren,
- Halbleiterfraktion: vorwiegend IC's,
- Polymer/Edelmetallfraktion: Stecksocket und Steckleisten,
- Ferromagnetische Metallfraktion: Spulen, Knopfzellen und andere Batterien,
- Mischfraktion: hauptsächlich Widerstände und andere passive Bauelemente.

In Bild 62 ist die Zuordnung unter Angabe von Bauelementbeispielen dargestellt. Nachdem die ausgewählten Fraktionen mit den entsprechenden Bauelementtypen korreliert wurden, sind diese nach geeigneten Sortierkriterien zu untersuchen. Mögliche Kriterien sind z.B.:

- Magnetismus,
- Geometriegrößen der Gehäuse,
- Dichte,

- Farbe,
- Kennzeichnung.

In detaillierten Produktanalysen wurde die Anwendbarkeit der Sortierkriterien zur Klassifizierung überprüft.

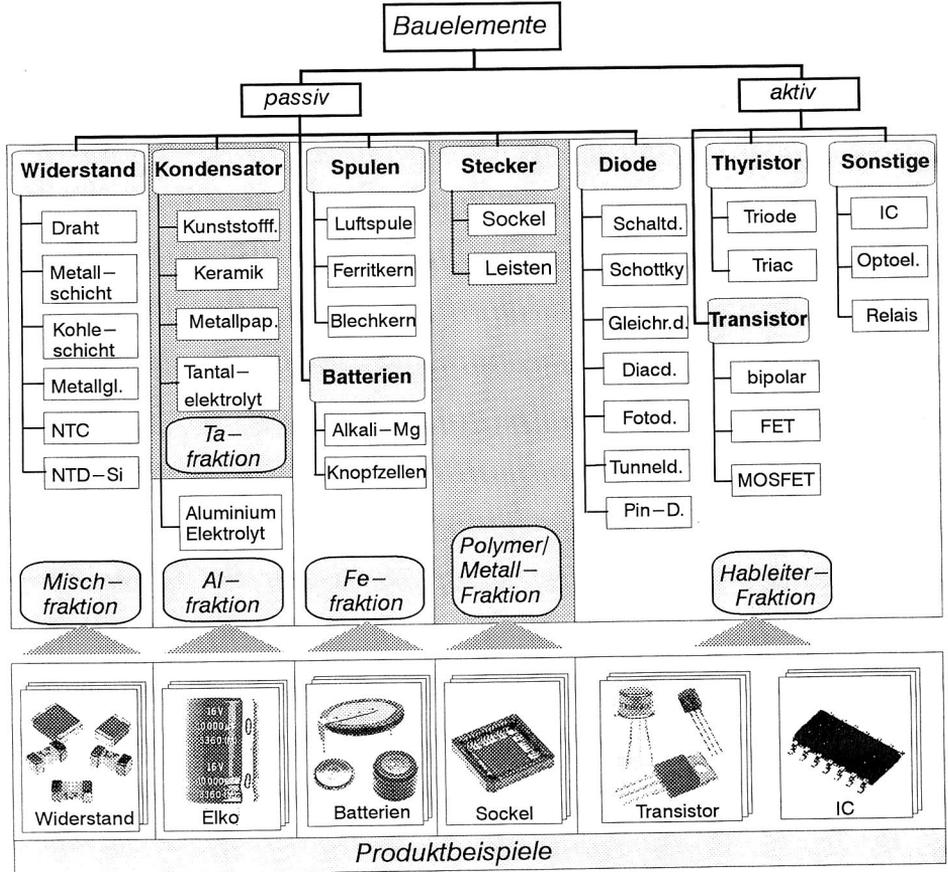


Bild 62: Zuordnung elektronischer Bauteiltypen zu Materialfraktionen

Der Schwerpunkt wurde dabei auf die einfache Anwendbarkeit im Massenstrom gelegt. Es wurden dabei folgende Sachverhalte festgestellt:

- Die Fe-Fraktion kann mit Hilfe von Überbandmagneten aus dem Massenstrom getrennt werden.
- Kleine und kleinste SMT Chip- und Melfbauelemente können mit Hilfe feiner Siebe aus dem Massenstrom getrennt werden.

-
- Die Dichte der unterschiedlichen Bauelemente ist ein sehr unscharfer Klassifikator und kann nur als zusätzliche Information genutzt werden.
 - Auslesen der Produktkennzeichnung (z.B. Lesen der Schrift) und Bestimmung der Materialeigenschaften (z.B. wie bei der Sortierung von Plastikverpackungen) scheint wegen des hohen maschinellen Aufwands sowie der zu erwartenden hohen Taktzeiten unpraktikabel.
 - Farbliche Unterschiede lassen sich nicht zur vollständig eindeutigen Materialgruppierung nutzen.
 - Geometrische Kenngrößen sind sehr vielseitig verwendbar und versprechen einen hohen Grad an Signifikanz der einzelnen Bauelementklassen.

Die im folgenden dargestellten Entwicklungen beruhen ausschließlich auf der Klassifizierung der Bauelemente mit Hilfe ihrer geometrischen Größen. Weitere nutzbare Sortierverfahren sind Magnete und Siebe zur Separierung der Eisenfraktion und der Bauteile mit geringer Korngrößen.

6.4.2 Auswahl des Meßprinzips zum Gewinnen geometrischer Bauteilmerkmale

Ziel eines geeigneten Sensorsystems ist es, von vereinzelt vorliegenden Bauelementen in sehr kurzer Zeit zur Klassifizierung nutzbare Geometriedaten zu erzeugen. Wegen des geforderten hohen Durchsatzes muß die Hauptanforderung sein, die Prozeßzeit der Erkennung zu minimieren. Aus diesem Grund muß ein Sensorprinzip gefunden werden, welches mit sehr hoher Frequenz stark reduzierte, jedoch signifikante Informationen über die Geometrie der abzubildenden Objekte erzeugt. Mechanische und taktile Systeme sowie Röntgensysteme oder die Thermographie scheiden während einer ersten Grobauswahl wegen ihrer zu geringen Verarbeitungsgeschwindigkeit und der hohen Investitionskosten aus.

Um die Eignung der verbleibenden Verfahren zu überprüfen, wird eine Gliederung nach den systembedingten Relativbewegungen zwischen Bauelement und Sensor vorgenommen. Es wird dabei zwischen ein- bzw. zweiachsiger Kinematik und dem vollständigen Verzicht auf Zusatzbewegungen unterschieden. Ziel dabei ist es, die Systeme herauszuarbeiten, deren Einsatz ein durchsatzoptimiertes Durchlaufprinzip, d.h. eine Bewegung des Objekts relativ zum Sensor, ermöglichen.

Ein nach dem Durchlaufprinzip gestaltetes Aufnahmesystem wird sicherlich die höchsten Erfassungsquoten erzielen. Es muß jedoch auch das Sensorprinzip dafür geeignet sein. Wie in Bild 48 dargestellt, sind verschiedene Sensorprinzipien bekannt, die keine Relativbewegung benötigen. Diese Verfahren scheiden grundsätzlich aus. Verfahren wie z.B. Punktriangulationsverfahren basieren hingegen auf zwei bewegten Achsen, um die Meßaufgabe zu erfüllen. Eine der kinematischen Achsen des Punktriangulationssensors kann z.B. durch eine schnell schwenkende Spiegeloptik ersetzt werden, die den Laserstrahl mit hoher Frequenz über das senkrecht zur Lichtachse bewegte Objekt projiziert. In diesem Fall kann ebenfalls von einem Durchlaufprinzip gesprochen werden.

Geeignet scheinen die Meßprinzipien, deren Funktionsprinzip auf einer Relativbewegung beruhen. Darunter fallen Lichtschnittverfahren, CCD-Zeilen und Lichtleiterquerschnittswandler (LLQW). Im folgenden wird das letztgenannte Meßprinzip kurz erläutert.

Funktionsprinzip des Lichtleiterquerschnittwandlers

Ein Lichtleiterquerschnittswandler besteht aus einem Lichtleiterbündel, das an einem Ende so aufgefächert ist, daß die Lichtleiter, bündig aufgereiht, auf einer Geraden liegen /112/.

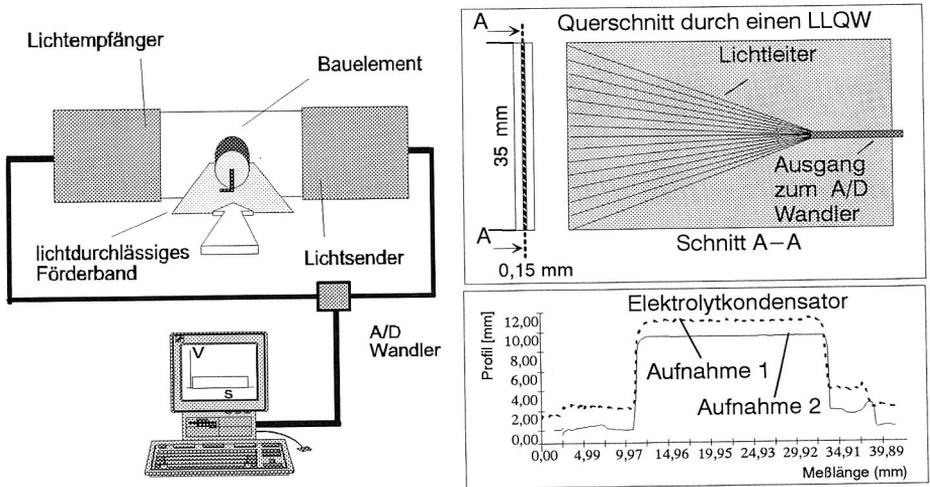


Bild 63: Meßprinzip und –ergebnis des Lichtleiterquerschnittwandlers

Wird Licht mit Hilfe einer Diode in den Lichtleiter gesendet, wird es auf der emittierenden Seite als Lichtstreifen bzw. Lichtvorhang ausgestrahlt (Bild 63). Nach diesem Prinzip kann ein Sensorsystem aufgebaut werden, welches auf der einen Seite einen Lichtvorhang emittiert, der mit Hilfe eines zweiten, entsprechend orientierten Sensors aufgefangen wird. Dieses Licht wird an einen fotoempfindlichen Sensor weitergeleitet, die eingegangene Lichtstärke gemessen und als Spannungswert zwischen 0 und 10V zur Weiterverarbeitung ausgegeben. Wird ein Objekt in den Strahlengang zwischen den beiden LLQWs gebracht, so reduziert sich die empfangene Lichtmenge und der auszugebende Spannungswert.

Bauelementförderung

Um die geometrischen Kenndaten der einzelnen Bauteile bestimmen zu können, wird vorausgesetzt, daß die Klassifizierung anhand von vereinzelt Bauelementen durchgeführt wird. Geeignete Vereinzelungsverfahren sind z.B. Bürstenförderer, oder Vibrationsförderer. Um die Varianz der Erkennungsaufgabe bei gleichen Bauelementen zu reduzieren wird weiterhin angenommen, daß die Bauelemente in ihrer Symetrieachse liegend am Sensor vorbeigeführt werden. Im Rahmen eines Versuchsaufbaus wurde ein Förderband entwickelt, welches aus zwei transparenten, zueinander senkrecht stehenden Folien besteht.

Diese sind um 45° zur Horizontalebene geneigt. Die Anstellung der beiden Bänder sowie die Einwirkung der Schwerkraft bewirken, daß die Bauteile während der Förderung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit der Hauptträgheitsachse, die dem kleinsten Massenträgheitsmoment entspricht, in Förderrichtung ausgerichtet werden (Bild 64). Sie nehmen eine ausgeprägte Gleichgewichtslage ein, soweit deren Geometrie dies zuläßt. Dieses Verfahren gelingt umso besser, je größer die Differenz des größten Hauptträgheitsmomentes zu den beiden kleineren Hauptträgheitsmomenten ist. Kondensatoren oder Batterien werden also in der zylindrischen Symmetrieachse, ICs auf der Beschriftungsseite liegend oder auf den Beinchen stehend transportiert (Bild 64).

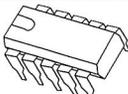
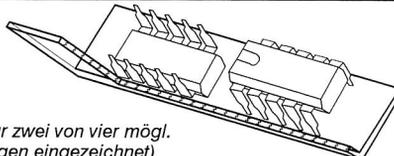
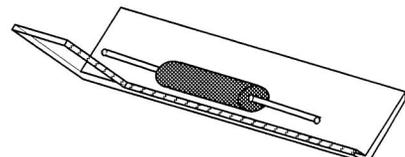
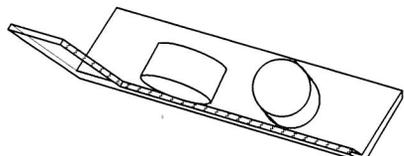
Grundform	Bauelemente	Gleichgewichtslagen
 <p>Quaderförmige Grundkörper mit mehr als vier Anschlüssen</p>	IC-Gehäuse Stecker Sockel Kondensatoren	 <p>(nur zwei von vier mögl. Lagen eingezeichnet)</p>
 <p>Zylindr. Grundkörper mit jew. einem Anschluß auf den Bodenflächen</p>	Batterien Kondensatoren Widerstände Dioden	
 <p>Zylindr. Grundkörper mit mindestens einer ebenen Bodenfläche</p>	Batterien Kondensatoren Transistoren Dioden	

Bild 64: Grundformen und Gleichgewichtslagen der Bauelemente nach der Ausrichtung

Vergleich der Meßsysteme

Zur Bewertung der einzelnen Meßprinzipien sollen im folgenden Aussagen über die Komplexität der gewonnenen Informationen (implizit auch über die voraussichtliche Dauer des Rechenprozesses zur Klassifikation) und über den geschätzten Durchsatz erarbeitet werden. Am Beispiel eines Kondensators werden die Meßprinzipien und deren Abbilder gegenübergestellt (Bild 65).

Daraus geht hervor, daß Verfahren zur Erstellung von Tiefenbildern (z.B. Lichtschnittverfahren) wegen des extrem niedrigen Durchsatzes aus der engeren Auswahl ausscheiden (6mm/s). Die theoretische Leistungsfähigkeit des LLQW (250mm/s /112/) ist ebenfalls erheblich geringer als die theoretische Leistung der CCD-Zeilen (max. 2.500 mm/s), ist jedoch für den Anwendungsfall vollkommen ausreichend. Als Beispiel: pro Sekunde könnten 25 Kondensatoren mit einer Körperlänge von je 1cm aufgenommen werden.

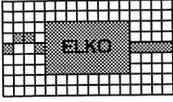
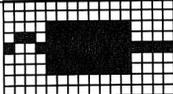
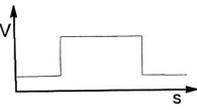
	Meßabbild	Inform.art	Meßergebnis	Meßgeschw.	Auswerteaufwand
Tiefenbild		Tiefenbild	Lageabhängig	6 mm/s	--
CCD-Auflicht		2D Bild	Lageabhängig	2.500 mm/s	-
CCD-Gegenlicht		2D Bild	Lageabhängig	2.500 mm/s	0
LLQW		Spannung Wegdiagr.	Lageunabhängig	250 mm/s	++

Bild 65: Vergleich von Meßprinzipien zur Erzeugung von Geometriedaten zur Klassifikation (++ sehr gut, + gut, 0 ausreichend, - schlecht, -- sehr schlecht)

Am Beispiel des Kondensators in Bild 65 wird deutlich, daß CCD-Zeilen lagegebundene Abbilder der Bauelemente erzeugen. Falls ein Anschlußdraht gekrümmt ist, wird er, sobald der Kondensator in seiner Schwerpunktschwerachse gedreht wird, ein unterschiedliches Bild ergeben. Im Vergleich dazu wird durch den LLQW immer nur die Dicke des Drahtes unabhängig von der Drehung des Bauelements und der Art der Krümmung als gleicher Spannungsspiegel aufgezeichnet. Es wird deswegen möglich, den meisten Bauelementen einen einzigen signifikanten Signalverlauf zuzuordnen. Das Verfahren ist unabhängig vom Ort der Abschattung und wird immer als Pegel, ausgehend von 10 V, aufgezeichnet. Hingegen werden bei der CCD-Zeile relativ zum Ort der Abschattung die Pixel angeregt und somit ein noch weiter zu verarbeitendes und bzgl. Null zu normierendes Signal erzeugt. Wegen der erheblichen Informationsreduktion durch den LLQW als Sensor ist auf eine sehr schnelle Verarbeitung der Daten zu schließen. Im Gegensatz dazu sind die voluminösen Datensätze der Tiefen- und CCD-Bilder nur mit aufwendiger Computerhardware in akzeptabler Zeit verarbeitbar.

Zusammenfassend weist die Lichtleiterquerschnittswandlertechnik entscheidende Vorteile gegenüber anderen Verfahren der Klassifikation im Durchlaufprinzip auf. Aus diesem Grund wird der LLQW-Technik in den folgenden Entwicklungen der Vorzug gegeben.

6.4.3 Meßaufbau auf Basis von Lichtleiterquerschnittswandlern

Der Meßaufbau zum Erzeugen von bauteilbeschreibenden Geometriedaten zur Klassifikation elektronischer Bauteile beruht auf den vorher erläuterten Prinzipien:

- dem Durchlichtverfahren,

- dem Lichtleiterquerschnittswandler und
- dem motorisch angetriebenen, V-förmigen, durchsichtigen Transportband. Sie sind im Grund der V-form bündig angeordnet, so daß die Bauelemente beim Transport nicht vom Band fallen. Die Bänder bestehen aus transparentem Polycarbonat und werden von einem geregelten Gleichstrommotor angetrieben.

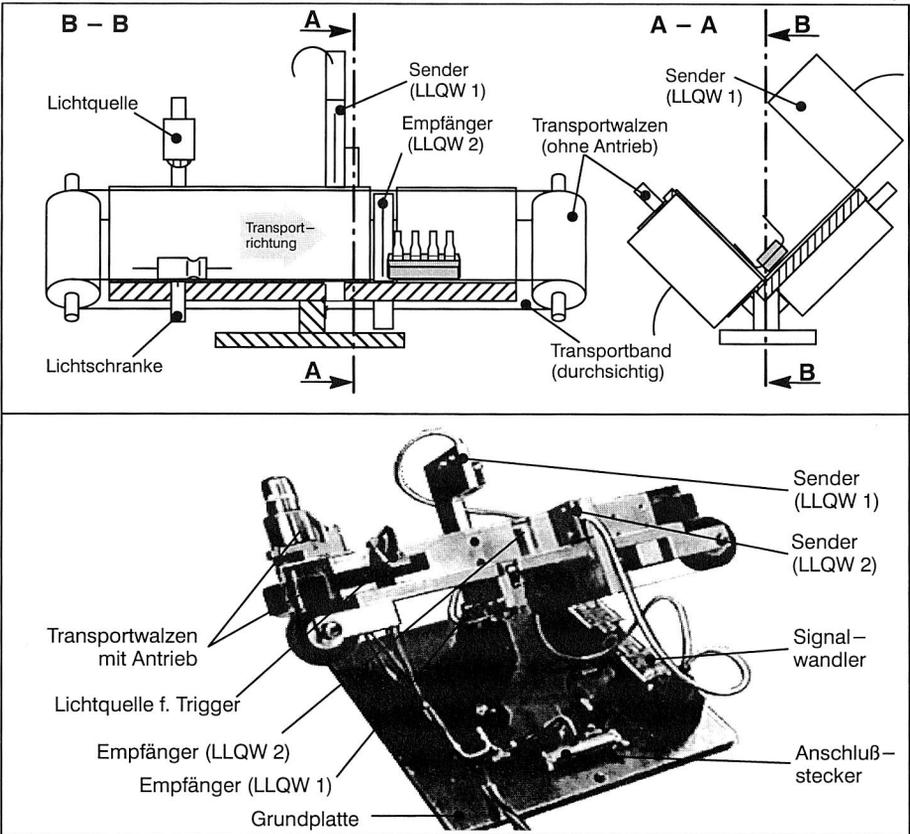


Bild 66: Versuchsaufbau zum Vermessen von Bauelementen auf Basis von LLQW

Zum Einsatz gelangen zwei orthogonal zueinander angeordnete Lichtleiterquerschnittswandlerzeilen. Deren optische Achsen sind senkrecht zu den Förderbändern in Richtung der Ebenennormalen angeordnet. Durch die LLQW werden zwei analoge Spannungssignale im Bereich zwischen 0 und 10 Volt erzeugt, die mittels einer A/D Karte digitalisiert und in einen PC eingelesen werden.

Für eine gesicherte Erfassung sind die kleinsten zu erfassenden Konturmerkmale einzubeziehen. Es wird dazu die Breite der Beinchen eines MQFP (Metric Quad Flat Packages) bei einem Rastermaß von 0,4 mm mit $0,18 \pm 0,05$ mm Pinbreite /85/ gewählt. Um diese Beinchen sicher zu erfassen, müssen pro minimaler Pinbreite bei unterschiedlichen Bandgeschwindigkeiten mindestens zwei Meßwerte abgetastet werden. Dies wird gewährleistet, indem die aktuell eingestellte Bandgeschwindigkeit über den am Motor angelegten Strom bestimmt wird, sowie mit Hilfe der Formel:

$$f_a = 3 \frac{v_b}{(\Delta b_{\min})} \quad \text{mit } v_b \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]: \quad \text{Bandgeschwindigkeit}$$

$$\Delta b_{\min} [\text{mm}]: \quad \text{Minimale Struktur, z.B. Pinbreite}$$

in die Sollmeßfrequenz des Systems umgerechnet wird. Es werden für gleiche Bauelemente, unabhängig von der Bandgeschwindigkeit, die gleiche Anzahl von Meßwerten aufgenommen und damit eine konstante Datenbasis gewährleistet. Mit dem in Bild 66 dargestellten Versuchsaufbau konnten Bandgeschwindigkeiten bis zu 250 mm/s gefahren werden.

Die LLQW werden durch ein verzögertes Triggersignal aktiviert. Das Triggersignal wird beim Passieren eines Bauteils durch eine Lichtschranke erzeugt. Wegen den bekannten geometrischen Verhältnissen zu und zwischen den Sensoren können die Messungen zeitverzögert gestartet bzw. gestoppt werden.

6.5 Konzeption und Realisierung eines Identifikationssystems mit Hilfe Neuronaler Netze

6.5.1 Auswahl geeigneter Bauteilmerkmale zur numerischen Klassifikation

Die in diesem Kapitel zu erarbeitenden Bauteilmerkmale sollen eine signifikante Beschreibung der Bauelemente ermöglichen. Zusätzlich ist die Reduktion der Meßdaten auf ein Minimum anzustreben.

Grundlegend wird von zwei Meßkurven pro Bauelement ausgegangen, die mit Hilfe von Lichtleiterquerschnittswandlern erzeugt werden. In Versuchen wurde eine Datenmenge von 150 Meßpunkten/cm für jeden Sensor als ausreichend bestimmt. Um eine hohe Klassifikationsgeschwindigkeit zu ermöglichen, müssen die signifikanten Eigenschaften der Signalverläufe mit Hilfe von Merkmalen erfaßt werden. Diese lassen sich grundlegend einteilen in:

- Merkmale im Zeitbereich (geometrische und statistische Größen),
- Merkmale im Frequenzbereich,
- Regressions- und Korrelationstechniken und
- lineare Vorhersage.

Wegen der Fülle der in der Literatur beschriebenen analytischen Ansätze zur Beschreibung von Merkmalen soll im folgenden nur eine reduzierte Auswahl dargestellt und deren Signifikanz an Beispielen überprüft werden.

Merkmale im Zeitbereich

Geometrische Größen werden aus dem vorliegenden Signal berechnet. Es fallen darunter die Kennwerte:

- Maximum und Länge der Signalverläufe (direkt aus dem Meßsignal bestimmbar),
- Anzahl der Extremwerte und Wendepunkte (erste und zweite Ableitung der Signale).

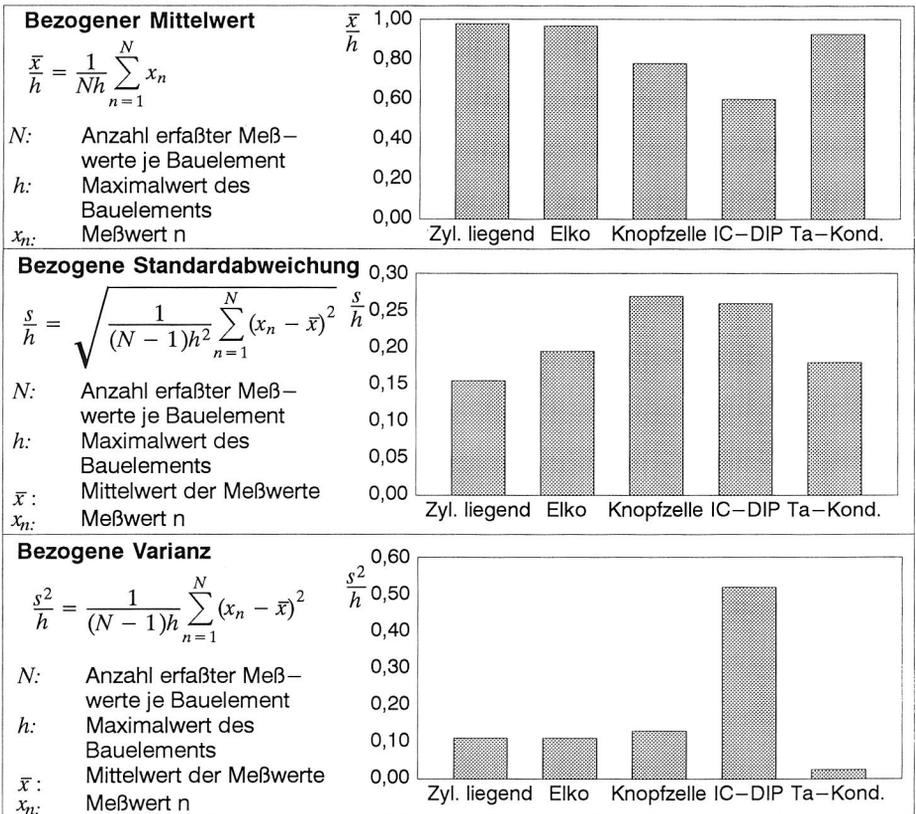


Bild 67: Statistische Größen als Merkmale zur Klassifikation von LLQW-Signalen elektronischer Bauelemente

Statistische Größen werden mit Hilfe statistischer Formeln berechnet. Um Ihre Aussagefähigkeit im Anwendungsfall bewerten zu können, wurde eine definierte Bauelementstich-

probe (zylindrischer Tantalkondensator, zylindrischer Elektrolytkondensator, Knopfzelle, IC–DIP, flacher quaderförmiger Tantalkondensator mit abgeschrägter Kante) ausgewählt, deren Signalverläufe mit Hilfe des in Bild 66 dargestellten Versuchsaufbaus bestimmt und daraus die jeweiligen Kenngrößen berechnet wurden.

□ linearer Mittelwert, \bar{x}

Um eine vergleichbare Größe zu erhalten, wird der jeweils errechnete Mittelwert \bar{x} durch den maximalen Meßwert dividiert und in den Wertebereich zwischen 0 und 1 normiert.

□ Standardabweichung, s

Als Maß für die Streuung der Meßgrößen wird die Standardabweichung herangezogen. Die berechneten Werte sind ebenfalls auf den maximalen Meßwert bezogen.

□ Varianz, s^2

Die Varianz berechnet sich aus dem Quadrat der Streuung und bringt dadurch große Abweichungen vom Mittelwert stärker zum Ausdruck. Dadurch werden Bauelemente besonders betont, deren Meßwerte größeren Höhengschwankungen unterliegen.

□ Häufigkeitsverteilung

Sie beschreibt die Auftretenshäufigkeit von Ereignissen in vordefinierten Klassen. So können in dieser Anwendung die Meßbereiche der Meßwerte eines Bauelementsignalverlaufs in n Bereiche (z.B. Bild 68 mit $n=10$) gleicher oder unterschiedlicher Bandbreite aufgeteilt werden. In der Häufigkeitsanalyse dieses Signals wird die Zahl der Meßwerte innerhalb der jeweiligen Klassengrenzen untersucht und als Histogramm aufgetragen. Werden die Meßkurven vorab in den Wertebereich $[0, 1]$ normiert, können die Häufigkeitsverteilungen verschiedener Bauteile als Klassifikationsmerkmale genutzt werden.

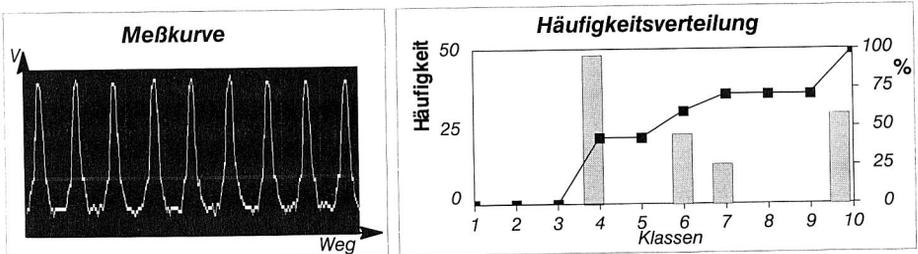


Bild 68: Meßkurve und Histogramm eines ICs der Bauform DIP–18

Im Bild 68 werden am Beispiel eines IC–DIP Bauelements das Histogramm und die kumulierte Häufigkeit aufgetragen. In Bild 69 sind die kumulierten relativen Häufigkeiten verschiedener Bauelementklassen gegenübergestellt. Sie wurden dazu in 10 Klassen bzw. Höhengniveaus aufgeteilt.

Schlußfolgerung:

Wie den Grafiken in Bild 67 und 69 zu entnehmen ist, kann durch die Kombination der statistischen Kenngrößen Mittelwert, Standardabweichung, Varianz und Häufigkeitsverteilung ein wichtiger Beitrag zur eindeutigen Klassifikation elektronischer Bauelemente erwartet werden.

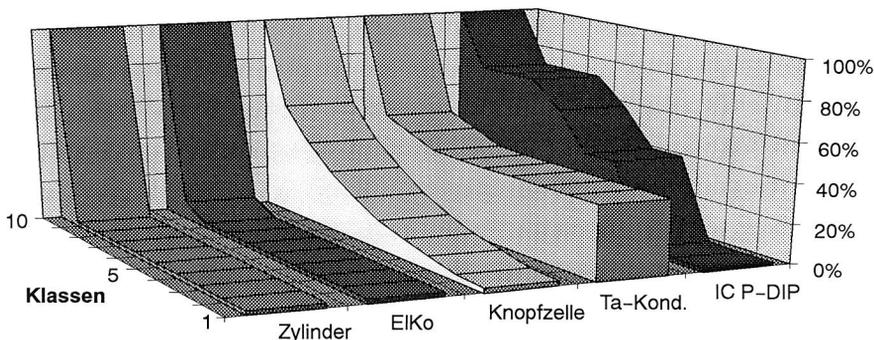


Bild 69: Histogramme der Häufigkeitsverteilungen verschiedener elektronischer Bauelemente

Merkmale im Frequenzbereich /8/

Um Funktionen bzw. Signalverläufe zu beschreiben, werden diese oft in den Frequenzbereich übertragen. Häufig wird dazu die Fouriertransformation durchgeführt und als parametrische Repräsentation der Ursprungsmuster die Beträge deren Koeffizienten bestimmt. Zur Untersuchung der Aussagefähigkeit der Koeffizienten der FFT wurden aus verschiedenen Bauelementesignalen die Amplitudenspektren errechnet.

Im Vergleich der Amplitudenspektren waren jedoch nur geringe Unterschiede zu erkennen. Aufgrund des hohen Auswerteaufwands bei der Transformation und Weiterverarbeitung der Koeffizienten sowie der wesentlich höheren Koeffizientenzahl bei der Transformation von Signalen, welche mit hoher Abtastfrequenz aufzunehmen sind, und der geringen Differenz der Spektren wurde diese Methode der Beschreibung der Bauelementesignale im Frequenzbereich nicht weiter verfolgt.

Korrelationsverfahren /17/

Korrelationsverfahren suchen nach charakteristischen Eigenschaften von Signalverläufen. Die zu erwartenden Eigenschaften müssen dazu im voraus bekannt sein. Es werden sequentiell die Signalverläufe mit den zu erwartenden Signalabschnitten verglichen und ein Kennwert berechnet. Der Vergleich geschieht durch das stellenweise Multiplizieren der Signalwerte mit den Korrelatorwerten und der Addition der Einzelprodukte. Das Korrelationsergebnis erlaubt eine Aussage über die Ähnlichkeit von Signalabschnitten mit verglichenen

Mustern. Um diese Analyse durchführen zu können ist ein erheblicher Bearbeitungsaufwand zu akzeptieren, was sie für die Anwendung wenig geeignet macht.

Merkmalauswahl

Zur Bewertung der verschiedenen Verfahren können die Kriterien 'zu erwartende Signifikanz', 'Realisierungsaufwand', 'Verarbeitungsaufwand' und 'Anzahl der erzeugten Merkmale' herangezogen werden. Die einzelnen Verfahren wurden dahingehend im Detail analysiert und ihre Bewertung in Tabelle 15 zusammengefaßt. Darin wurden die Aussagen zu den Einzelaspekten in eine abschließende Gesamtbewertung zusammengeführt. Als Ergebnis werden besonders die geometrischen Merkmale, der Mittelwert, die Standardabweichung, die Varianz sowie eine 10–klassige Häufigkeitsverteilung herausgehoben, die zum weiteren Aufbau des Identifikationssystems herangezogen werden.

Merkmal		Signifikanz	Realisierungsaufwand	Verarbeitungsaufwand	Anzahl Parameter	Bewertung
im Zeitbereich	geometrisch	0	+++	0	+++	++
	statistisch	++	+++	++	+++	+++
	Häufigkeitsvert.	+++	+	++	0	+++
	Korrelationsverf.	+++	--	--	++	0
im Frequenzbereich	Fouriertransformation	++	0	-	--	0

Tabelle 15: Bewertung und Auswahl von Merkmalen zur Klassifikation von Bauelementen (+++ sehr gut, ++ gut, + ausreichend, 0 bedingt ausreichend, - schlecht, -- sehr schlecht)

6.5.2 Aufbau Neuronaler Netze und Auswahl der geeigneten Topologie

Die im vorhergehenden Kapitel ausgewählten Identifikationsmerkmale (geometrische und statistische Größen) sollen zur Online–Identifikation elektronischer Bauelemente genutzt werden. Wie den in Kap. 6.1 dargestellten Grundkonzepten der Mustererkennung zu entnehmen ist, kann im Anwendungsfall ein festdimensioniertes oder ein lernendes Klassifikationsmodell Anwendung finden. Wesentliches Ziel der Entwicklung ist es, größtmögliche Flexibilität im Hinblick auf veränderte und neue Klassifikationsaufgaben zu erzielen. Dies erfordert ein System, welches problemlos änderungs– oder erweiterungsfähig ist. Das trifft nur auf die Klassifikation durch lernende Systeme zu, das Grundlage der folgenden Entwicklungen ist. Als lernende Komponente wird dabei auf das Modell der Neuronalen Netze zurückgegriffen.

Aufbau und Arbeitsweise Neuronaler Netze

Ein neuronales Netz besteht aus einer Menge von Verarbeitungseinheiten (Neuronen) und den Verbindungen zwischen diesen Einheiten. Informationen werden grundsätzlich in den Neuronen verarbeitet die sich in drei Typen untergliedern (Bild 70).

- **Eingabeeinheiten** (Inputneuronen) dienen als Eingabepuffer mit dem Ziel der Eingabecodierung. Die Initialisierung dieser Elemente wird nicht vom Netz, sondern von außen durchgeführt.
- **Zwischeneinheiten** (Hidden units) dienen der Verarbeitung der von außen an das Netz gegebenen Information gemäß dem Netzmodell. Diese sind von der Außenwelt durch die Ein- bzw. Ausgabeeinheiten abgekapselt und werden durch Training konfiguriert.
- **Ausgabeeinheiten** (Outputneuronen) dienen als Schnittstelle mit der Außenwelt und geben das Ergebnis der Informationsverarbeitung des Netzes weiter. Diese Resultate können zur Weiterverarbeitung verwendet werden.

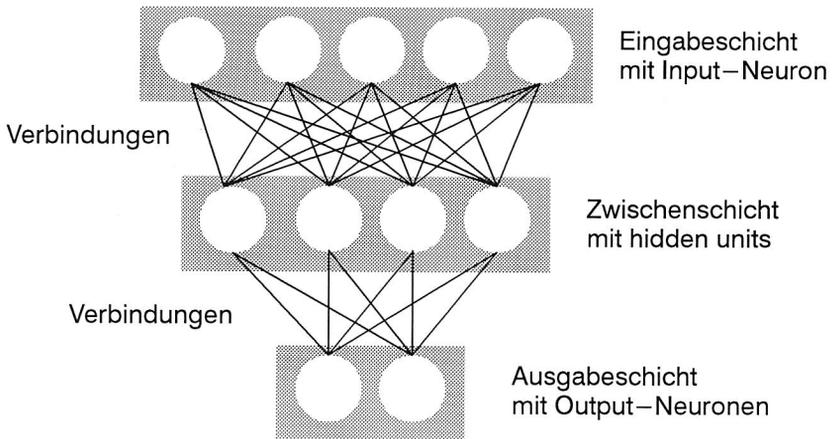


Bild 70: Netzstrukturmodell

Jedes Neuron arbeitet nach dem folgenden Schema /150/:

1. Bearbeiten aller Eingänge eines Neurons mittels einer Input- oder Propagierungsfunktion, um aus den Ausgabewerten aller vorgeschalteten Neuronen einen Ausgangswert für die Berechnungen des Neurons zu erhalten. Dies ist meist eine Summation (oder auch das Produkt, Min/Max) der Eingänge, multipliziert mit den zugewiesenen Gewichten.
2. Weitergabe des Ergebnisses an die Transferfunktion (z.B. Schwellwert-, Treppen-, Sigmoid-, Sinusfunktion), mit der die Aktivität des Neurons berechnet wird.
3. Berechnung des Ausgabewerts mit Hilfe einer Outputfunktion (z.B. Identität, strategische Entscheidungen zwischen mehreren benachbarten Neuronen), der an verbundene Neuronen weitergegeben wird.

Das Verhalten eines Netzes wird jedoch nicht nur durch Neuronentypen bestimmt sondern hängt auch von den Verbindungen der Neuronen (Topologie), der Anzahl der Schichten und dem Lernverhalten ab (Bild 71; siehe auch /63, 150/).

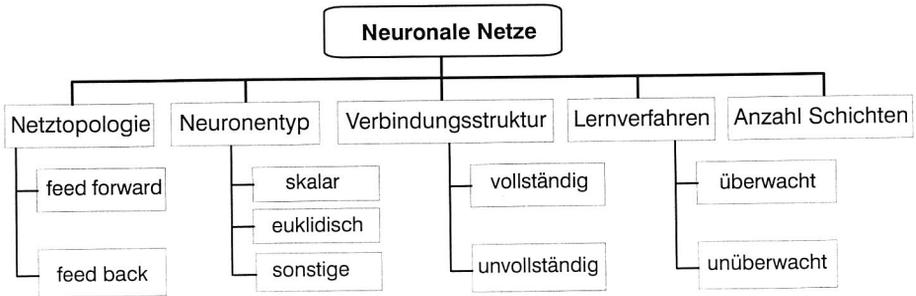


Bild 71: Einteilungsmöglichkeiten Neuronaler Netze

- Netztopologie:
Es wird zwischen vorwärtsgerichteten (feed forward) und rückgekoppelten (feed back) Netzen unterschieden. Feed forward Netze liefern, indem ein konstanter Input am Netz anliegt, einen definierten Output. Bei Feed back Netzen hingegen wird der Output wieder in das System zurückgegeben, bis ein stabiler stationärer Zustand erreicht wurde.
- Neuronentyp:
Dieser legt die Art der zu verwendenden Algorithmen fest. So ist zu unterscheiden zwischen dem Skalarprodukt vom Gewichtsfaktor und dem Merkmalsvektor oder dem Euklidischen Abstand.
- Verbindungsstruktur:
Hier wird zwischen Netzen mit vollständiger (jedes Neuron mit jedem der folgenden Schicht) und unvollständiger Verbindung zwischen den Neuronen unterschieden.
- Lernverfahren:
Überwacht lernende Netze passen ihre Verarbeitungsalgorithmen aufgrund eines aus Ist- und Sollausgabe bestimmten Fehlermaßes an. Unüberwacht lernende Netze bilden die Antwort aufgrund der Ähnlichkeit von Eingabevektoren selbst heraus.

Eine Abschätzung der Vor- und Nachteile einzelner Netzwerke für den Anwendungsfall ist meist äußerst schwierig. Nur das Ausprobieren eines Netztypes bringt in der Regel Aufschluß bzgl. dessen Eignung /150/.

Im Anwendungsfall wurde, wegen der in vielen Anwendungen /150/ nachgewiesenen Leistungsfähigkeit, das Backpropagation-Modell (BPTT) zur Realisierung des Klassifikators ausgewählt.

Backpropagation-Netzmodell

Das BPTT steht für mehrschichtige Netze mit beliebiger Verbindungsstruktur und feed forward Vermittlungsregel, wobei nicht direkt benachbarte Schichten miteinander verbunden werden dürfen. Eine Verbindung kann jedoch auch beliebig viele Zwischenschichten überspringen, sie dürfen jedoch nicht zu vorhergehenden Schichten führen. Als Neuronenfunktionen finden die schon erwähnten Funktionen Einsatz.

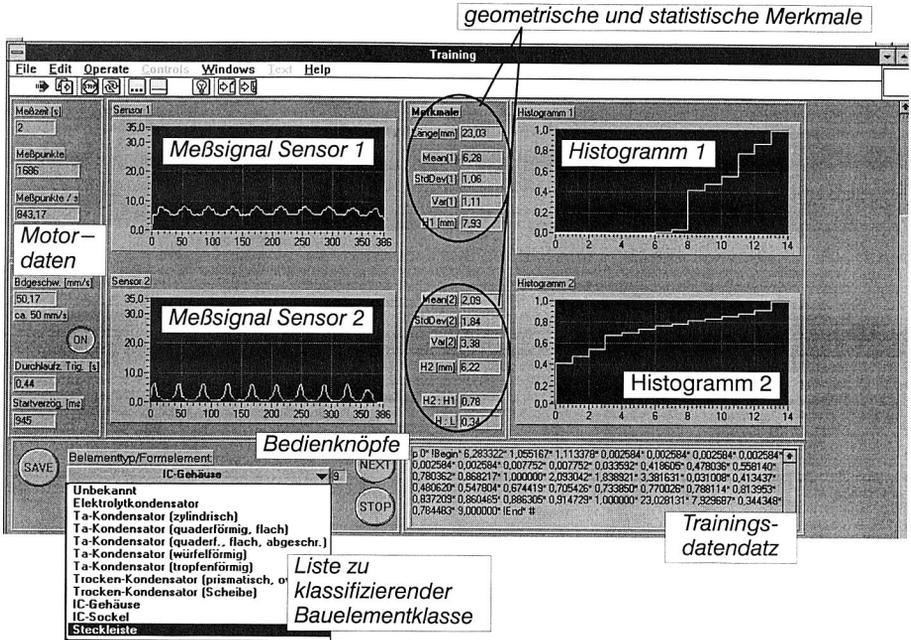


Bild 72: Softwareoberfläche zum Erzeugen von Trainingsdaten für ein Neuronales Netz

Trainingsdaten

Um das Neuronale Netz trainieren zu können, müssen Trainingsdatensätze zur Verfügung gestellt werden. Zur Beschaffung dieser Daten wurde eine Auswertungssoftware implementiert, die die Meßsignale aus den LLQW in die beschriebenen Merkmale umrechnet und speichert. Bild 72 gibt die Softwareoberfläche wieder, die dem Benutzer die Sensorsignale, die Kennwerte des Motors, die Anzahl der Meßwerte sowie die geometrischen und statistischen Werte visualisiert. Der Bediener muß aus einem voreingestellten Liste die entsprechende Bauelementklasse auswählen, die mit den Merkmalen beider Sensoren zu einem Lerndatensatz zusammengeführt und im vorgeschriebenen Format des Neuronalen Netzsystems in eine Datei geschrieben und gespeichert werden.

6.5.3 Training des Neuronalen Netzes und Einbindung in eine prozeßintegrierte Analyseumgebung

Nachdem es möglich wurde, die Trainingsmuster rechnergestützt zu erzeugen, muß im nächsten Schritt das zu trainierende Neuronale Netz dimensioniert werden. Die Anzahl der Input- und Outputneuronen bestimmt sich aus der Anzahl der Merkmale und aus der Anzahl der Sortierkriterien.

- Anzahl der Inputneuronen: 38 Eingabeelemente (pro Sensor 15 Häufigkeitsklassen und 3 statistische Größen sowie die Bauelementhöhe und –länge)
- Anzahl der Outputneuronen: 1 Ausgabeelement, das die 11 zu unterscheidenden Klassen als natürliche Zahlen zwischen 0 und 10 ausgibt.

Ergänzend ist eine geeignete Topologie zu bestimmen. Da eine methodische Auswahl bislang unbekannt ist, wird auch im Rahmen dieser Arbeit die Leistungsfähigkeit bestimmter Topologien empirisch abgeschätzt. Es wurden dazu die in Tabelle 16 angegebenen Strukturen aufgebaut und getestet. Die dritte Struktur hat sich dabei sehr gut verhalten und wird für die weiteren Untersuchungen verwendet.

Netz	Eingabeelemente	Hidden layer	Elemente je Hidden Layer	Anzahl Verbindungen (Gewichte)	Repräsentation
1	38	3	10	590	Muster wurden mit keinem Lernverfahren gelernt
2	38	4	10	690	Muster insgesamt schlecht gelernt
3	38	1	40	1530	Gute Repräsentation

Tabelle 16: Getestete Netzwerktopologien und ihr Lernverhalten

Das Netz wurde unter NeuroGRAPH Ver. 3.x erstellt /117/. Es wird zunächst ein Projekt definiert (in Bild 73 oben das Projekt 'bauelemente.prj'), das auf den Topologieeditor ('Topidor') zum Erstellen der Netzwerkstruktur, zur Definition der Neuronen und deren Eigenschaften verweist. Weiterhin können in Topidor auch Lern-, Recall- und Validierungsläufe gestartet werden. Im Projekt wird außerdem ein 'Sensor' definiert, der die Aufgabe hat, Soll-, Istwerte und Fehler des Ausgabeneurons zu visualisieren.

Bild 73 zeigt die Struktur der ausgewählten Topologie im Topologieeditor *Topidor* mit den:

- Ein- und Ausgabedaten als Trichter auf der linken Seite und
- Schichten des Netzes mit Inputlayer (38 Neuronen), Hiddenlayer (40 Neuronen) und Outputlayer (1 Neuron) als Kreise auf der rechten Seite dargestellt.

Die Füllung der Neuronen stellt die Aktivität während eines Lernschrittes dar, die der 'Trichter' die Werte der Ein- und Ausgabedatensätze. Als Aktivierungsfunktion wurde die semilinare Funktion LOGISTIC:

$$a_i = \alpha_{\min} + \frac{1}{1 + e^{\frac{4i}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}(n_i + b_i \Theta)}} (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$$

- mit:
- α_{\min} : kleinstmögliche Neuronenaktivität
 - α_{\max} : größtmögliche Neuronenaktivität
 - i : Neuron i
 - n_i : Eingabewert des Neurons
 - b_i : Schwellwert des Neurons
 - Θ : Bias zur ev. Unterdrückung des Schwellwertes

gewählt. Die Soll–Grenzwerte der Aktivitäten der Neuronen der Ausgangsbeschicht betragen als minimaler Wert 0 und als maximalen Wert 10 und repräsentieren damit die 11 Klassen.

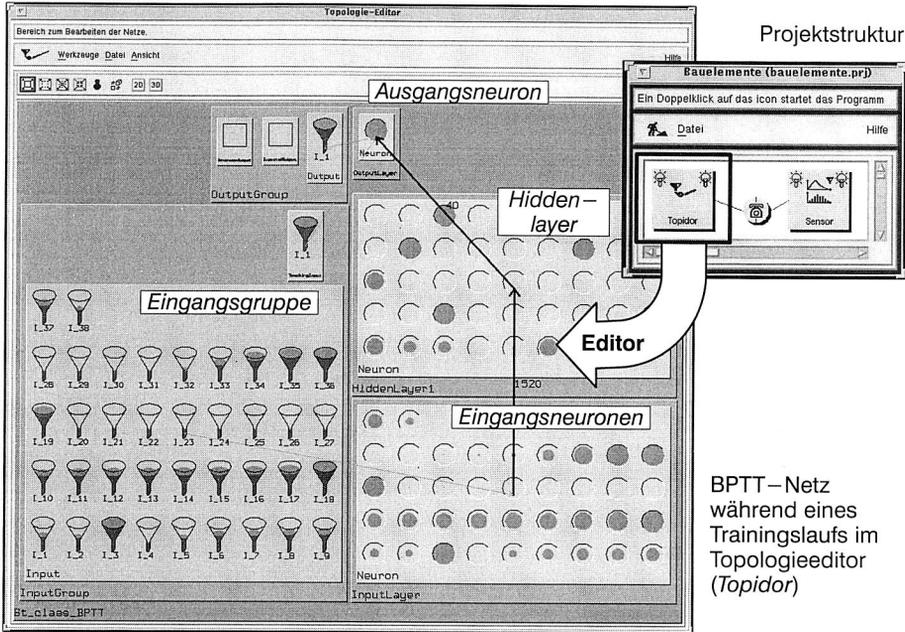


Bild 73: Backpropagation–Netz mit 38 Eingangsneuronen, 40 verdeckten Neuronen und einem Ausgangsneuron

Training des Netzes

Das Netz wird durch Lernen anhand von ausgewählten Stichproben trainiert. Im Anwendungsfall werden mit Hilfe der in Kap. 6.5.2 beschriebenen Software pro Klasse fünf Mustervektoren erzeugt, z.B.:

- IC–Gehäuse: DIP 12, DIP 14, DIP 18, DIP 24, DIP 48
- Elektrolytkondensatoren: Ø6,5x12; Ø8x11,5; Ø10x12,5; Ø11x12,5; Ø15,5x25

Das Netzwerk wird mit den Stichproben beaufschlagt und überwacht trainiert. Dabei werden Soll– und Istwerte verglichen und die Gewichte mit Hilfe der vorgegebenen Gewichtsfunktion gezielt verändert. Mit Hilfe des 'Sensors' kann der Lernerfolg überprüft werden. Im Einsatzfall wurden alle Klassen erfolgreich trainiert.

Das Netz wird als NeuroGRAPH–Netzbeschreibung ausgegeben, die über eine Funktionslibrary in der Online–Softwareumgebung nach entsprechender Anpassung genutzt werden kann.

Online-Identifikationsumgebung für elektronische Bauelemente

Die Struktur des realisierten Klassifikationssystems folgt der theoretisch dargestellten Struktur des klassischen lernenden Erkennungssystems (Kap. 6.1 /90/). Es werden die durch die LLQW erzeugten Signale über den A/D-Wandler dem Erkennungssystem eingespeist und mit Hilfe der beschriebenen Berechnungsalgorithmen der Merkmalvektor erzeugt.

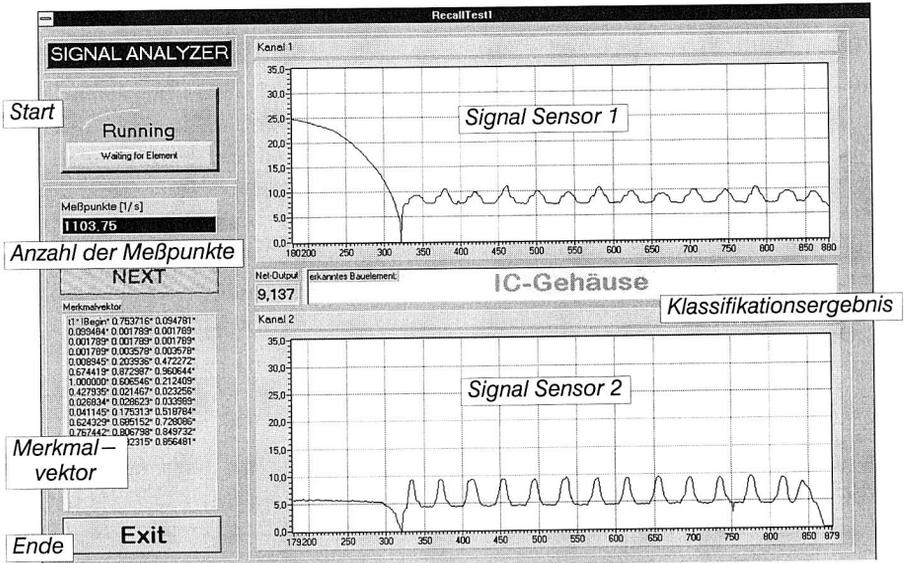


Bild 74: Benutzeroberfläche eines Online Erkennungssystems von elektronischen Bauelementen

Mit Hilfe des implementierten Systems können die zu Merkmalen reduzierten Meßwerte der Lichtleiterquerschnittsleiter zur Klassifikation von elektrischen Bauelementen benutzt werden. Das System ist durch seinen modularen Aufbau und durch die Lernkomponente, die das Klassifikationswissen repräsentiert, flexibel an neue Bauelementtypen anpaßbar. Dazu müssen neue Lernstichproben erzeugt und das Netz erneut trainiert werden. Zu überprüfen bleibt, ob der gewählte Netztyp und die Topologie weiterhin zu guten Ergebnissen führen.

Mit Hilfe einer Benutzeroberfläche kann nun gewählt werden, ob neue Trainingsdaten erzeugt werden sollen oder ob das System im Online Modus laufen soll. Dazu steht dem Benutzer eine Bildschirmmaske (Bild 74) zur Verfügung, die es ihm ermöglicht:

- den Erkennungsprozeß zu starten und zu stoppen,
- eine Prozeßkontrolle durchzuführen, wobei die Kurvenverläufe, die Anzahl der Meßpunkte und die berechneten Merkmalvektoren angezeigt werden und
- die identifizierte Materialfraktion abzulesen und zu überprüfen .

7. Entwicklung eines Regelwerks zur recyclinggerechten Gestaltung elektronischer Baugruppen

Eine Hauptaufgabe im Aufbau einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft ist die Strukturierung produktorientierter Recyclingprozeßketten und die Entwicklung damit einhergehender Prozesse. In den Kapiteln 3 bis 6 wurde auf Basis der automatisierten Demontage ein System zum Recycling elektronischer Baugruppen dargestellt und die zugehörigen Demontageprozesse entwickelt. Die technologischen Aspekte in den Recyclingkreisläufen beschränken sich jedoch nicht allein auf die relevanten Prozeßketten, sondern vielmehr auch auf die darin zu recyclingenden Produkte. Die Effizienz einer Recyclingkette kann erheblich verbessert werden, falls die Produkte auf sie abgestimmt sind. Im Gegenschluß ist daraus abzuleiten, daß der Konstrukteur sein Produkt nur dann recyclinggerecht gestalten kann, wenn er sich an den technologischen und physikalischen Grundprinzipien der relevanten Recyclingprozesse orientiert.

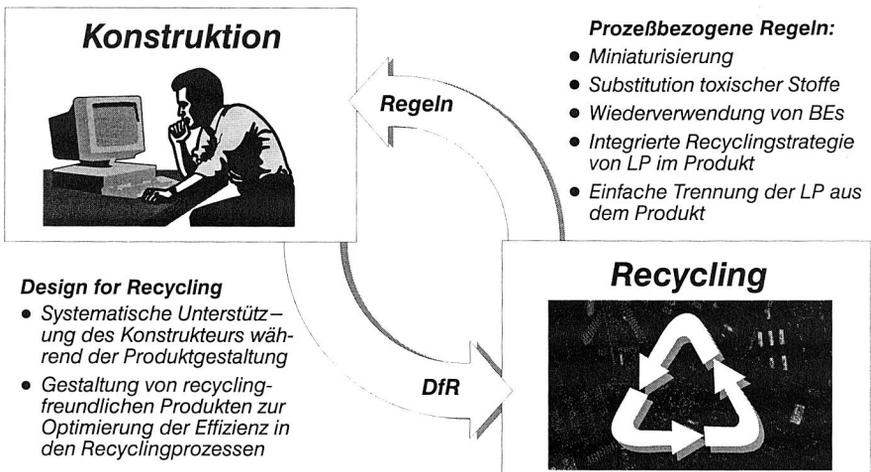


Bild 75: Abhängigkeiten zwischen Konstruktion und Recyclingsystem

Dem Konstrukteur müssen, um sein Produkt optimieren zu können, folglich die aus den Recyclingprozessen ableitbaren Gestaltungsregeln zugänglich sein. Dabei sind natürlich die klassischen Gestaltungsziele seiner bisherigen Aufgaben nicht zu vernachlässigen. In der Elektronik bedeutet dies vor allem die Berücksichtigung der Funktionalität im Rahmen der Spezifikationen und Sicherheitsvorschriften und die Berücksichtigung fertigungstechnischer Fragestellungen.

Um die recyclinggerechte Konstruktion dem Produktgestalter in verständlicher Weise darstellen zu können, wird aus dem allgemeinen Modell der Kreislaufwirtschaft im folgenden

am Beispiel der elektronischen Baugruppe ein Regelwerk abgeleitet. Es soll im Anschluß geprüft werden, welche methodischen Ansätze und Werkzeuge aktuell zur Unterstützung des Produktgestalters zur Verfügung stehen. Diese sind anhand eines zu definierenden Anforderungskatalogs zu analysieren und deren Eignung festzustellen. Geeignete Lösungsansätze sowie deren Defizite werden zur Entwicklung eines optimalen Systemkonzepts herangezogen und in die in Kap. 8 detailliert beschriebene Softwareentwicklung eingebracht.

7.1 'Design for Recycling' als Voraussetzung zum effizienten und ökologischen Recycling komplexer Produkte

Die recyclinggerechte Produktgestaltung (Design for Recycling, DfR) hat sich als neues Gestaltungsziel in der DfX-Landschaft etabliert. Das Aufgabenspektrum im DfR ist sehr vielfältig. Um dem Konstrukteur eine grundlegende Hilfestellung zu geben, wurde die VDI-Richtlinie 2243 "Recyclinggerechte Produktgestaltung" /94/ ausgearbeitet. Gemäß der Richtlinie orientieren sich die gestalterischen Aufgaben an dem im Eingangskapitel vorgestellten Modell der Kreislaufwirtschaft technischer Produkte (Bild 1). Es unterscheidet die Kreisläufe Produktrecycling und Materialrecycling und die thermische Verwertung bzw. Deponierung als finale Stufen des Produktlebens. Zu ergänzen bleibt der aus den politischen Vorgaben eingebrachte und vielfältig zu interpretierende Aspekt der 'Vermeidung'. Ein theoretisches Grundgerüst zum Aufbau und zur Strukturierung eines Regelwerks kann daraus abgeleitet werden.

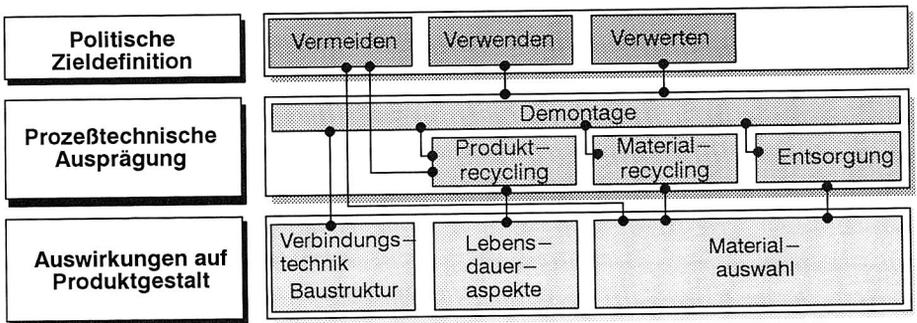


Bild 76: Grundstruktur im Design for Recycling und Verknüpfungen der zu beeinflussenden Produktparameter

Die politischen Zielsetzungen und die prozeßbezogene Struktur bilden die strategische Basis und müssen nun in ein konkret anwendbares Regelwerk zur Produktoptimierung transformiert werden. Wie in Bild 76 dargestellt, gelingt dies durch den Aufbau eines logischen Netzwerks zwischen den allgemeinen politischen Vorgaben, deren prozeßtechnischen Ausprägungen und den Wirkungsbereichen im Produkt. Zur Interpretation des Netzes aus Bild 76 sollen einige Beispiele gegeben werden:

- Ein Teilaspekt des Vermeidens bezieht sich auf das Produktrecycling, welches in der Produktgestalt durch eine entsprechende Berücksichtigung der funktionalen und materialspezifischen Lebensdauer realisiert wird.
- Die Verwendung von Bauteilen beruht grundlegend auf dem Herauslösen der betreffenden Teile aus dem Verbund.
- Eine Verwertung kann ebenfalls auf einer Demontage bestimmter Bauteile beruhen, die dann im Materialrecycling verarbeitet werden. Dabei sind sowohl Materialaspekte als auch Aspekte zur Baustruktur und der Verbindungstechnik mit einzubeziehen.

1) Verbindungstechnik	1.1	Mit geringem Aufwand nach dem Produktleben zuverlässig und nicht zerstörend lösbare Verbindungstechniken
	1.2	Zeitparallele Demontage mehrerer Verbindungsstellen
	1.3	Zerstörende Demontage der Verbindungen und Bauteile
	1.4	Wiederverwendbare Verbindungstechniken
	1.5	Entwicklung von Schnellverbindungen
	1.6	Schnappverbindungen mit Entriegelungsmechanismen
2) Baustruktur	2.1	Direkte Zugänglichkeit zu bestimmten Bauteilen ermöglichen
	2.2	Strukturierung des Produkts in Gruppen der selben Recyclingstrategie (sog. Recyclinggruppen)
	2.3	Zugänglichkeit und Trennbarkeit der Recyclinggruppen
	2.4	Vermeiden von Zwangsreihenfolgen
3) Materialauswahl der Bauteile und Verbindungselemente	3.1	Anstreben eines Einstoffprodukts
	3.2	Anpassung an Altstoffgruppe
	3.3	Sicherstellung der Materialverträglichkeit
	3.4	Anpassung an Recyclingprozeß zur Materialtrennung
	3.5	Gewährleistung der Entsorgung (Verbrennung, Deponierung)
	3.6	Berücksichtigung von Materialermüdungs- und Aufarbeitungsaspekten
4) Lebensdaueraspekte	4.1	Berücksichtigung der technischen Produktlebensdauer
	4.2	Beachtung von Innovationssprüngen, d.h. Abschätzung der technologischen Lebensdauer
	4.3	Elektrische Schnittstellen zur Modularisierung von Produkten
	4.4	Mechanische Schnittstellen zur Modularisierung von Produkten
	4.5	Beachtung von Standards
5) Information	5.1	Bereitstellung von Information zur Unterstützung der DfR-Regeln
	5.2	Bereitstellung von Informationen zur zeiteffizienten und gezielten Auswahl des optimalen und in der Konstruktion vorgesehenen Recyclingpfads

Tabelle 17: Allgemeines Regelwerk zum Design for Recycling (DfR)

Die Umsetzung der verschiedenen Gestaltungsstrategien im Produkt geschieht hauptsächlich im Rahmen der Materialauswahl, der Baustruktur, der Verbindungstechniken sowie

bei der Festlegung der Lebensdauer (ergänzt durch Aspekte der Standardisierung z.B. von Schnittstellen). Dazu sind in der Literatur viele spezielle Regeln zur Produktoptimierung vorgestellt, wie sie beispielhaft in Tabelle 17 aufgeführt sind (siehe z.B. /56, 65, 94/).

Wie in Kap 2 schon deutlich wurde, definieren sich wesentliche Probleme im Recycling elektronischer Baugruppen aus der hohen Materialvielfalt, der hohen Integration der Materialien und Funktionalität sowie aus der hohen Innovationsrate der Bauteile. Betrachtungen zum Einstoffprodukt oder der Materialverträglichkeit (Tab. 17, Pkt. 3.1 und 3.3) sind daher sicherlich nicht sinnvoll, wohingegen Demontageaspekte wie die Realisierung simultaner Demontageprozesse (Tab. 17, Pkt. 1.2) erhebliche Optimierungsansätze bieten. Eine direkte Übertragung der Regeln auf die spezifischen Eigenschaften der Leiterplatte ist deshalb nur bedingt sinnvoll und bedarf einer detaillierten Überprüfung. Ergänzend ist davon auszugehen, daß sich durch die produktspezifisch angewendeten Recyclingtechnologien (z.B. Kupferhütte) zusätzliche Gestaltungsregeln ergeben können, die im Regelwerk abzubilden sind.

7.2 Regeln zur recyclinggerechten Gestaltung von Elektronikkomponenten

Eine Anpassung der allgemeinen Regeln an die Anforderungen der elektronischen Baugruppe und deren spezifische Recyclingkreisläufe ist aus der Literatur nicht bekannt und ist Inhalt des folgenden Kapitels. Dazu wird ein auf die Bedürfnisse der Elektronik spezialisiertes Regelwerk in knapper umgangsprachlicher Form entwickelt. Als methodisches Gerüst werden die hergeleiteten Recyclingstrategien Vermeiden, Produktrecycling, Materialrecycling und Entsorgung herangezogen und durch Demontage als übergeordnete Funktionalität im Recyclingsystem ergänzt.

7.2.1 Designregeln zum Vermeiden, Verwenden, Verwerten und Entsorgen elektronischer Baugruppen

Vermeiden:

Regel 1:

Bestimmte Stoffe in umweltgefährdender Form sind zu vermeiden.

Das größte Problem bei der Vermeidung gefährlicher Stoffe in der Elektronik ist, herauszufinden, aus welchen Stoffen sich die einzelnen Bauelemente zusammensetzen. Langfristig werden die in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Datenbanken Abhilfe schaffen. Die Klassifizierung der als gefährlich geltenden Stoffe ist der aktuellen Gesetzgebung zu entnehmen. Tabelle 4 in Kapitel 2 gibt dazu eine detaillierte, mit Grenzwerten versehene Auflistung bekannter Schadstoffe. Ein Vergleich der Stoffbilanzen des zu analysierenden Bauteils mit den bekannten Grenzwerten ermöglicht eine Bewertung /92/.

Regel 2:

Stoffe, die unter bestimmten Bedingungen umweltgefährdend wirken, sind zu vermeiden. Als toxische Stoffe gelten nicht nur die im Produkt physikalisch gebundenen Substanzen und Verbindungen, sondern auch solche, die sich unter definierten Bedingungen (z.B.

hohe thermische Belastungen) in toxische Substanzen umwandeln. Bekannte Beispiele sind die zum Flammenschutz von Kunststoffen (v.a. Schaltungsträger und IC-Gehäuse) eingesetzten Verbindungen auf Brom- und Antimontrioxidbasis.

□ **Regel 3:**

Vermeide und reduziere Materialeinsatz unter Nutzung moderner Technologien

Dem Ausspruch 'less is more' ist, bezogen auf den Einsatz von Material, als Prinzip der recyclinggerechten Gestaltung besondere Bedeutung zu schenken.

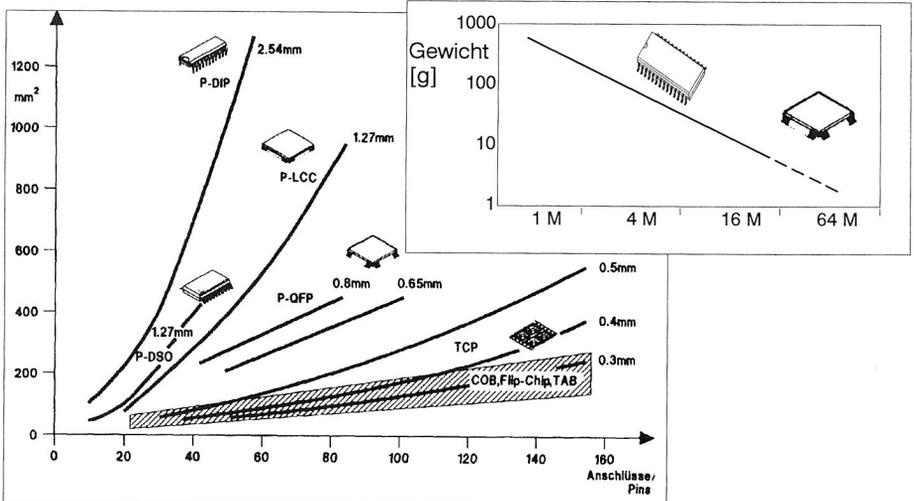


Bild 77: Reduktion des Gewichts durch Steigerung der Integrationsdichte am Beispiel von Speicherbausteinen (DRAM); 85 Gew.% zwischen jeder Generation /118/

Vor allem in der Elektronik können durch Nutzung neuer Technologien erhebliche Massen eingespart werden. Bild 77 gibt das Einsparungspotential wieder, das durch den Ersatz eines DIL Gehäuses z.B. durch den Einsatz der Thin Small Outline Pack (P-TSOP) der 2. Generation (DRAM-Speicher 16M: 0,3g Gehäusegewicht ohne Chip /118/) erzielt wird. Durch die Gehäusereduktion bzw. -substitution wird gefahrstoffhaltiges Material eliminiert und durch den reduzierten Flächenverbrauch auch erhebliche Substratfläche eingespart (Bild 77).

Produktrecycling

Hochwertige, standardisierte elektrische Bauelemente wie Prozessoren und Speicher finden bei hoher Wertschöpfung einen zunehmend wachsenden Wiederverwendungsmarkt (siehe auch Kap. 2.4 und /140/). Im allgemeinen wird ein aufzuarbeitendes Produkt demontiert, geprüft, gereinigt, aufgearbeitet und remontiert /94/. Diese Sequenz gilt, unter Berücksichti-

gung spezieller Randbedingungen, auch für elektronische Bauelemente. Es lassen sich die folgenden Richtlinien ableiten:

- **Regel 4:**
Standardbausteine sind potentiell wiederverwendbar.
Das Prüfen elektronischer Bauelemente wird durch die Vielzahl der Bauelemente, deren unterschiedliche Funktionen, Logik und verschiedene Pinbelegungen erschwert. Um Effizienz zu erreichen, müssen große Stückzahlen gesammelt werden, die den Einsatz eines automatisierten Testers rechtfertigen. Nur die Nutzung einer eingeschränkten Auswahl gebräuchlicher, standardisierter Bauelemente kann Abhilfe schaffen.
- **Regel 5:**
Die Nutzungsdauer soll größer oder gleich zweier Produktleben sein.
Grundsätzlich werden Standardbausteine wieder eingesetzt, falls die verbleibende Nutzungskapazität noch ein weiteres Produktleben überdauern wird /60/. Die Nutzungsdauer beschreibt die verbleibende Lebenszeit eines Bauteils bis zur Fehlfunktion. Die industrielle Praxis zeigt, daß dies bei Halbleiterbauelementen fast ausschließlich erreicht wird .
- **Regel 6:**
Das Rastermaß wiederverwendbarer Bauelemente sollte ausreichend groß gewählt werden. Die Bauelemente sollten in Sockel gefügt werden.
Um Bauelemente wiederverwenden zu können, müssen diese gereinigt und die Beinchen gebogen und verzinnt werden. Für die einzelnen Prozessschritte stehen geeignete Maschinen zur Verfügung. Probleme treten langfristig durch die reduzierten Rastermaße auf (Ultra fine pitch), die schonende Demontage und Aufarbeiten erschweren. Logische Konsequenz ist die Nutzung eines ausreichend robusten Rastermaßes oder von Steckverbindungen, die eine Nacharbeit nicht benötigen.

Verwertung

- **Regel 7:**
Das Materialgemisch ist an die ausgewählten Recyclingprozesse so anzupassen, daß es optimal verwertet werden kann.
Die in Kapitel 3 vorgestellten Verwertungsverfahren sind Grundlage zur Produktgestaltung. Das Produkt muß so an das/die potentiell einsetzbaren Recyclingverfahren angepaßt werden, daß eine optimale Recyclingquote erzielt wird, alle wichtigen Ressourcen im Stoffkreislauf bleiben und keine gefährlichen Substanzen erzeugt werden.
- **Regel 8:**
Das Materialgemisch ist so an den/die ausgewählten Recyclingprozesse anzupassen, daß die Ressourcenausbeute optimiert wird. Die Recyclingprozesse definieren sich über die Recyclingstrategie des Gesamtprodukts.
In aktuellen Forschungsprojekten sind Tendenzen erkennbar, die Baugruppe zum mechanischen Träger oder zum gesamten Produktaufbau materialkompatibel zu gestalten. Ein Beispiel sind Versuche der Fa. Daimler Benz zum vollständigen Recycling eines Pkws im Stahlschrott /98/. Ein ähnliches Konzept wird auch von Loewe Opta verfolgt, indem statt

eines konventionellen Kunststoffgehäuses ein Gehäuse aus Stahlblech gewählt wird und die Materialzusammensetzung der Elektronik entsprechend angepaßt wird /67/. Relevantes Grundwissen ist z.B. in Altstofftabellen abgelegt, wie sie zum Beispiel für Aluminium und Stahl erhältlich sind /67/.

Entsorgungsgerecht

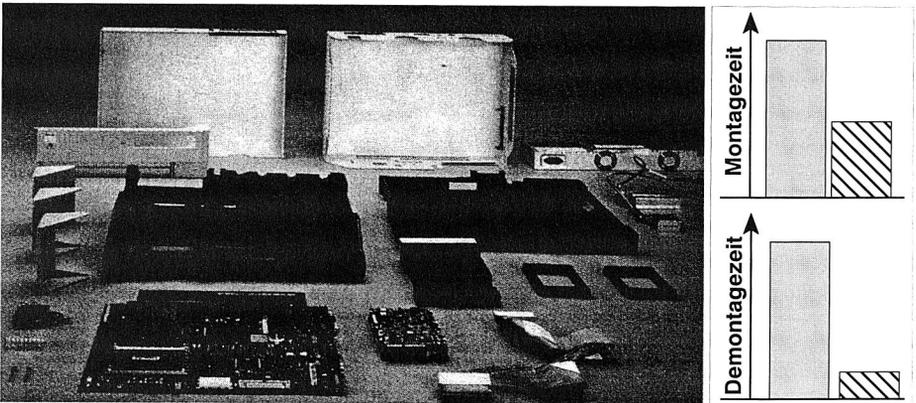
Regel 9:

Das Materialgemisch ist so an den ausgewählten Entsorgungsprozeß (definiert sich über die Recyclingstrategie des Gesamtprodukts) anzupassen, daß die gesetzlichen Vorgaben erfüllt sind.

Eine grundlegende Aufgabe ist es, das Produkt so zu gestalten, daß es nach der aktuellen Gesetzgebung nicht als Sondermüll zu klassifizieren ist. Es ist zu prüfen, daß die Grenzwerte aus Kap. 3 durch die einzelnen Materialgemische nicht überschritten werden .

7.2.2 Demontagegerechte Produktgestaltung

Die Demontage elektronischer Produkte wird durch zwei Aspekte dominiert, das Herauslösen der Baugruppe aus dem Produktverbund sowie die Demontage eines elektronischen Bauelements aus dem Schaltungsträgerverbund.



Vergleich HP 700 Workstation: traditioneller Aufbau neues Packaging Konzept

Bild 78: Optimierte Montage und Demontage durch formschlüssiges Fügen von elektronischen Baugruppen im Polyurethan-Formschaum (HP-PAC) [152]

Regel 10:

Positioniere die Elektronik im Produkt so, daß sie leicht zugänglich und einfach demontierbar ist.

Die Elektronikbaugruppe muß mit minimalem Demontageaufwand erreicht werden d.h. sie muß in der Produktstruktur nahe den Gehäuseteilen liegen. Sie muß gut zugänglich und mit einfachen Methoden vom Restprodukt trennbar sein. Dies setzt den Einsatz einfach zu

lösender Verbindungstechniken voraus. Eine vorbildliche Lösung ist im sogenannten HP-Packaging realisiert (Bild 78). Dort werden Bauelemente in einem der Baugruppenform angepaßten Schaumteil eingelegt. Die Fixierung wird durch reinen Formschluß realisiert, der eine schnelle Demontage ohne Zuhilfenahme von Werkzeugen ermöglicht.

□ **Regel 11:**

Das Bauelement ist so zu positionieren, daß es demontierbar und zugänglich ist.

Falls die Elektronik nach den Aspekten der Verwendung gestaltet wurde oder falls eine Gefahrstoffvermeidung nicht möglich ist, müssen die speziellen Bauelemente einfach aus der Baugruppe getrennt werden können.

Dabei sind Aspekte der Zugänglichkeit und des Arbeitsraums zu beachten. Zusätzlich müssen demontagefreundliche Verbindungstechniken gewählt werden. Wie den Ausführungen in Kap. 2 zu entnehmen ist, sind Steck-, Löt- und Klebeverbindungen prinzipiell zur Demontage geeignet. Unter dem Aspekt der minimalen thermischen Schädigung der Bauteile sind Steckverbindungen zu bevorzugen.

7.3 Anforderungen an ein System zur recyclinggerechten Produktgestaltung

Die Anwendung des erarbeiteten Regelwerks soll den Konstrukteur zu einer gelungenen und recyclingfreundlichen Konstruktion führen. Das Produkt wird dabei auf unterschiedliche, sinnvoll ausgewählte Recyclingkreisläufe vorbereitet. Wegen der gegenläufigen Ansätze ist bei einer eher intuitiven Problembearbeitung eine in allen Belangen optimale Lösung jedoch nicht zu erwarten. Statt dem Gesamtoptimum einer recyclinggerechten Konstruktion entstehen Suboptima. Diese Gefahr wird gesteigert, falls der Produktgestalter ein nur geringes Recyclingsystemverständnis besitzt und die Entscheidungen mit nur geringem Detailwissen treffen muß. Es ist nicht ausgeschlossen, daß der Produktgestalter dabei auch kontroverse Entscheidungen getroffen hat, wobei ihm u.U. der entstandene Konflikt nicht bewußt geworden ist.

Dies führt zum Wunsch nach geeigneten Methoden und Werkzeugen zur produktübergreifenden Bewertung der vom Konstrukteur erarbeiteten Lösungsvorschläge. Die Entscheidungsfindung zwischen Alternativen soll dabei unterstützt werden, wobei nicht das Detailproblem als Bewertungsaufgabe betrachtet wird, sondern das Produkt immer im Gesamtsystem der Recyclingprozesse zu sehen ist. Dem Konstrukteur soll dadurch Detailwissen abgenommen werden, wobei er die Möglichkeiten zur Evaluierung der Plausibilität der Ergebnisse haben soll. Die anzuwendende Methodik sollte deswegen nachvollziehbar sein und einen allgemein verständlichen Bewertungsmaßstab zu Grunde legen. Die Produktinformation sollten in anschaulicher Weise erfaßt, effizient verarbeitet und gespeichert werden. Im Rahmen dieser Arbeiten ist ein besonderes Augenmerk auf die Möglichkeiten der Integration elektronischer Baugruppen zu richten, deren Materialvielfalt, welche in einigen DfR-Regeln eine fundamentale Rolle spielt, eine Rechnerunterstützung voraussetzen (siehe dazu auch /130/).

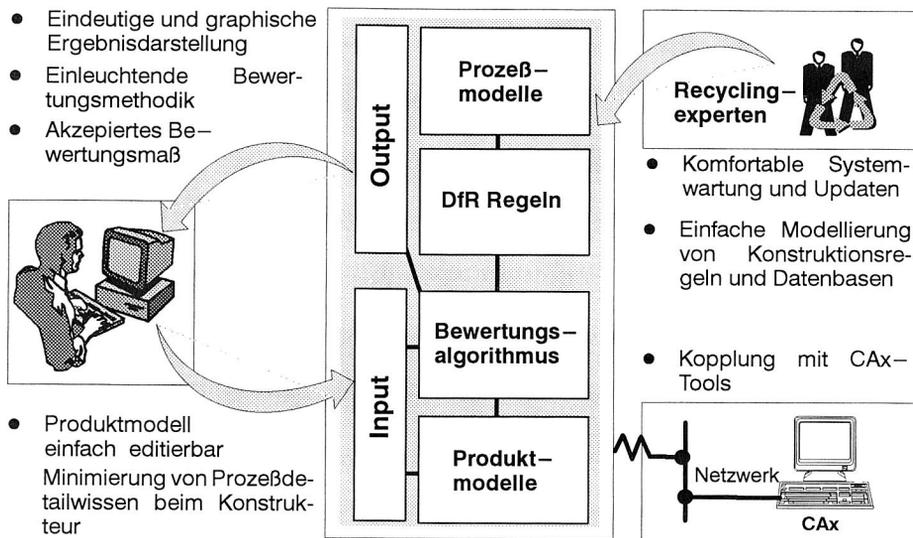


Bild 79: Strukturierung der Anforderung an ein System zur recyclinggerechten Gestaltung

Die anzuwendende Systematik muß den folgenden Anforderungen genügen (Bild 79):

- Arbeitsaufwand für Benutzer gering halten:
Dies gilt für die Dateneingabe sowie die Produktmodellierung. Eine automatisierte Ableitung aus vorliegenden Datenbeständen ist wünschenswert (Kopplung mit CAx-Werkzeugen).
- Graphische Produkt- und Analyseergebnisdarstellung.
- Transparenz der Arbeitsweise des Systems:
Aus Gründen der Systemakzeptanz müssen Arbeitsweise und Analyseergebnisse für den Anwender nachvollziehbar sein.
- Benutzerfreundlichkeit und ergonomische Gestaltung des Gesamtsystems.
- Abbildung aller Recyclingprozeßregeln sowie aller Demontageverrichtungen (zerstörend, nichtzerstörend).
- Minimierung der Anforderungen an das Recyclingprozeßdetailwissen des Konstrukteurs.
- Einfache Modellierung der Konstruktionsregeln und der Recyclingprozeßmodelle.
- Einfache Aktualisierung und Wartung des Systems.
- Eindeutige und klar verständliche Bewertungsergebnisse:
Um dieses Ziel zu erreichen, muß ein allgemein verständliches und akzeptiertes Bewertungsmaß gewählt und eine Bewertung auf Basis quantitativer Daten ermöglicht werden.

7.4 Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Recyclinggerechtigkeit komplexer Produkte

Nach /65/ lassen sich die bestehenden Ansätze in produkt- und prozeßbasierende Bewertungsansätze einteilen. Der produktbewertende Ansatz konzentriert sich unmittelbar auf die Eigenschaften des in der Entwicklung befindlichen Produkts, ohne die relevanten Recyclingprozesse zu berücksichtigen. Trotz der Möglichkeit, dadurch im frühen Stadium der Konstruktion entscheidenden Einfluß zu nehmen, birgt dieser Ansatz die Gefahr der Fehlleitung des Konstrukteurs, da ihm aus seinem eigenen Verständnis die Zielrichtung der recyclinggerechten Produktgestaltung unklar sein könnte. So kann z.B. dem Konstrukteur als Pendant zur Montagegerechtigkeit die Demontagegerechtigkeit als gleichwertig wichtig erscheinen, obwohl die Gestaltung einer materialverträglichen Gesamtstoffgruppe günstiger wäre. Die produktbezogene Optimierung kann sinnvollerweise erst dann Einsatz finden, wenn die Recyclingstrategien schon festgelegt sind, z.B.:

- durch vorher durchgeführte prozeßbezogene Bewertungsverfahren,
- durch firmenspezifische, strategische Entscheidungen,
- bei Änderungs- und Anpassungskonstruktionen.

Indem jedoch Prozeßwissen einfließt, ist der Übergang zur prozeßbasierenden Produktbewertung und -optimierung geschaffen. Diese beurteilen mittelbar die Auswirkungen der Konstruktion auf den Recyclingprozeß, können aber auch zur Festlegung der geeigneten Recyclingstrategien und der daraus ableitbaren Optimierungsrichtungen herangezogen werden. Ergebnis ist die sehr hohe Kompatibilität des Produktes zu den Recyclingprozessen und damit die optimale Erfüllung der konstruktiven Teilaufgabe DfR. Voraussetzung ist jedoch ein weitgehend ausgearbeiteter Entwurf des Produktes im späten Stadium einer Neukonstruktion oder aber bei Änderungs- und Anpassungskonstruktionen. Da in beiden Verfahren die Anwesenheit von detaillierten Produktdaten vorausgesetzt wird, können diese nur 'nachsorgend' und zur iterativen Optimierung angewandt werden. Um den recyclingbezogenen Konstruktionsprozeß fundiert zu unterstützen, ist entweder von einer grundlegenden Festlegung der Recyclingstrategien auszugehen oder aber von einer zielgelösten Bearbeitung der Aufgabe.

Im folgenden sollen wichtige aktuelle Ansätze zur Bewertung der Recyclinggerechtigkeit beschrieben und systematisch verglichen werden. Sie sind nach den angewandten Bewertungsmethoden gegliedert.

7.4.1 Kennzahlenbasierende Bewertungsverfahren

In Eversheim /19/ wurde ein kennzahlenbasierendes Verfahren entwickelt, welches die Verifikation demontagegerechter Merkmale ermöglicht. Die Summe der gewichteten Merkmals-erfüllungsgrade wird als Demontagegerechtheitskennzahl bezeichnet, die zur Detektion von Schwachstellen, zur Produktoptimierung und zur Anlagenplanung herangezogen werden soll. Es wird demontagebezogen konstruiert, d.h es müssen die produkt- bzw. bauteilbe-

zogenen Recyclingstrategien vorher festgelegt werden ansonsten wird unter Umständen das Gesamtgestaltungsziel verfehlt. Der tabellarische Aufbau des Verfahrens kann einfach in der Praxis eingesetzt werden, ist aber durch die vorgegebene Gewichtung für den Konstrukteur nicht transparent und läßt die Definition der produktbezogenen Optimierungsziele nicht zu. Weiterhin wird die vollständige Umkehr der Montage vorausgesetzt. Die Einbeziehung teilzerstörender und zerstörender Demontageprozesse wird nicht unterstützt.

Eine weiteres auf Kennzahlen basierendes Bewertungssystem wird in /46, 155/ vorgestellt. Es soll anhand einer Produktanalyse Rückschlüsse auf das Demontageverhalten zulassen. Es wird dabei zweigleisig vorgegangen. Auf der einen Seite wird ein Demontagegraph erstellt, aus dem Kennzahlen bzgl. der Demontepfadlänge und der Produktstrukturtiefe gewonnen werden. Auf der anderen Seite wird die Verbindungsstruktur skizziert und bewertet.

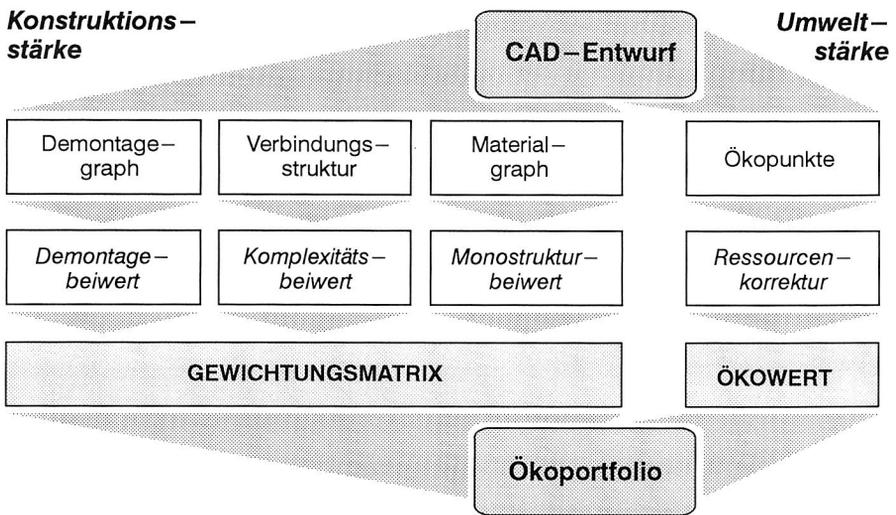


Bild 80: Ableitung von Kennzahlen zur ökologischen Produktbewertung, nach /155/

Nach Hartel eignen sich Kennzahlen wie Verknüpfungsgrad und Verbindungsstrukturklassifizierung. Interessant ist der Ansatz das Produkt in bauteilorientierte und verknüpfungsorientierte graphische Darstellungen aufzuschlüsseln. Die Bauteile werden im sog. Demontagegraph dargestellt, in dem, in Abhängigkeit von der Demontagestrategie, Bauteile und -gruppen in Demontageebenen angeordnet sind. Dabei wird der Ansatz von Gehrmann (siehe Kap. 7.4.2) aufgenommen (nur bauteilorientierte graphische Darstellung) und mit den Strukturgraphen erweitert. Es werden dort die Verknüpfungen von Bauteilen (Knoten) durch Verbindungen (Kanten), die wiederum klassifiziert sind (Verbindungskontakt oder Körperkontakt), dargestellt.

Aus den vorliegenden Daten werden die Kennzahlen Demontage-, Komplexitäts- und Verbindungsstrukturbeiwert berechnet und auf Basis einer Gewichtungsmatrix in eine Demontageeignungskennzahl überführt, die sich als Mittelwert der gewichteten Kennzahlen darstellt. Diese Kennzahl wird in einem Ökoportfolio mit dem Ökowerk, der allgemeine Umweltdaten repräsentiert, aufgenommen und dient damit zur Bewertung der Konstruktionsalternative.

7.4.2 Systeme zur graphischen Produktdatenerfassung und manuellen Bewertung

Neben einer tabellarischen Erfassung der Produktdaten werden auch verschiedene graphische Produktanalysemethoden in der Literatur vorgestellt. Einige interessante Ansätze sollen im folgenden geschildert werden

Die graphische Aufarbeitung von Produktstrukturen wurde zum ersten Mal im Rahmen der Demontagestrukturpläne bei Gehrman /37/ diskutiert. In Bild 81 wird der Demontagestrukturplan eines sehr einfachen elektrischen Produkts dargestellt.

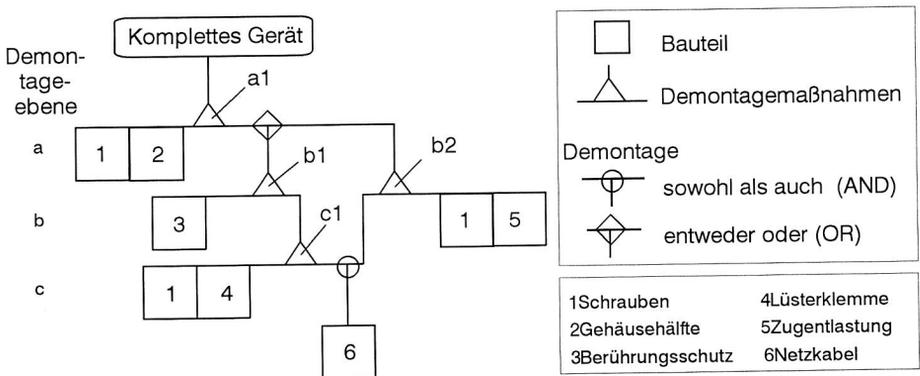


Bild 81: Demontagestrukturplan eines einfachen Produkts /37/

Dabei bedeutet jeder Knoten eine Demontagemassnahme, die wiederum aus mehreren Demontageverrichtungen bestehen kann. Eine Verkettung verschiedener Massnahmen kann als logische 'AND'- und 'OR'-Verknüpfung formuliert werden. Entsprechende Zeichen sind vorgesehen. In den Quadraten werden die gelösten Bauteile aufgelistet. Die Art der Löseverrichtungen und Zugänglichkeitsaussagen, die dazu benötigte Zeit sowie detaillierte Auskünfte über das Bauteil (Masse, Material, Funktion etc.) werden nicht erfasst. Das Strukturbild dient allein zur Beschreibung der Demontagemöglichkeiten.

Das von Gehrman entwickelte Strukturdiagramm wurde in Arbeiten von Simon /153/ weiterentwickelt. Es werden dabei Symbole für Baugruppen, die sich in Untergruppen und Einzelteile auflösen eingeführt. In den graphischen Darstellungen der Baugruppen werden Deponiekosten sowie die Summe der Kosten/Erlöse aus Demontage und Materialwert der darunterliegenden Bauteile eingetragen. Die einzelnen Bauteile werden mit entsprechen-

dem Erlös/Kosten markiert. Verbunden sind diese mit Kanten, denen wiederum ein die Demontage repräsentierender Wert zugewiesen ist. Der graphische Aufbau sowie die Datenerfassung kann rechnerunterstützt erfolgen. Probleme kann die Zuweisung der einzelnen Kosten und Erlöse zu den Materialien und zum Demontageaufwand ergeben. Weiterhin werden komplexe Produktstrukturen nicht eindeutig erfaßt (z.B. Querverbindungen zwischen Bauteilen verschiedener Ebenen) und es entsteht ein dem Produkt nur angenäherter Graph.

In /73/ wird der Ansatz von Simon nochmals weiterentwickelt. Vor allem der Umfang der erfassten Daten wurde erweitert. Während der Probezerlegung eines Geräts oder Prototyps werden die Zerlegealternativen des Produktaufbaus mit Hilfe einer grafischen Darstellung mit gleichzeitiger Auflistung der resultierenden Reststoffe und der Demontagezeiten festgehalten. Dabei zerfällt das Produkt in untergeordnete Baugruppen und Teile (von oben nach unten angeordnet). Innerhalb der Symbole werden Material, Masse, Demontagezeit, Verwertungskosten/–erlöse und die Summe der Kosten/Erlöse bei weiterer Zerlegung erfaßt. Es können dann Bewertungen und Vergleiche bzgl. der Verwertungspreise der Gruppe und der akkumulierten Erlöse oder Kosten der darunterliegenden Bauteile durchgeführt werden. Eine Rechnerunterstützung ist nicht bekannt.

7.4.3 Systeme zur graphischen Produktdatenerfassung mit rechnerunterstützten Bewertungsalgorithmen

Mit dem Softwaretool LAsER (Life–cycle, Assembly, Service, Recycling) /53, 54/ wird dem Benutzer ermöglicht, Produktstrukturen graphisch zu beschreiben. Diese sind durch Bauteile und –gruppen repräsentiert, die durch semantisch attributierte, gerichtete Verbindungen vernetzt sind (Bild 82).

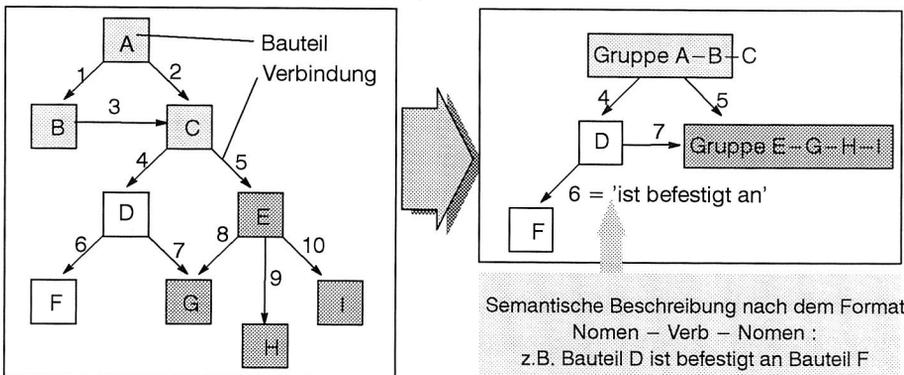


Bild 82: Semantischer Aufbau der Produktdarstellung im Softwaretool LAsER und Zusammenfassung von Bauteilen zu Gruppen, nach /53, 54/

Während der Produktmodellierung kann der Benutzer Gruppen (sog. clumps) von Bauteilen ähnlicher physikalischer Eigenschaften und Beziehung (z.B. Materialkompatibilität) defi-

nieren (Bild 82). Die Bauteile und Baugruppen werden in weiteren Menüfenstern noch detaillierter beschrieben (Gewicht, Volumen, Demontagezeit, Recyclingpfad). Aus der Literatur geht nicht klar hervor inwieweit der Konstrukteur bei der Gruppenbildung Unterstützung findet. Die Recyclingfähigkeitsanalyse besteht aus zwei Aspekten: der Bestimmung der Entsorgungskosten und der Bestimmung der Demontagekosten. Mit Hilfe von if-then Regeln werden Materialkompatibilitätskennzahlen von Materialgemischen bestimmt, die mit Hilfe einer nicht linearen Funktion den entsprechenden Entsorgungskosten zugewiesen werden. Die Demontagekosten berechnen sich aus der Summe der Zeiten zur Handhabung der Bauteile und Verbindungen sowie zum Lösen der Verbindung.

In den USA wurde neben LAsEr ein weiteres Softwaretool 'ReStar' zur Entscheidungsunterstützung bei der recyclingorientierten Produktgestaltung entwickelt /86, 87/. Um die Demontagemöglichkeiten eines Bauteils aus einer definierten Lage zu erfassen, werden die Einschränkungen in den 6 Freiheitsgraden während des Lösen im Demontageversuch festgestellt und aufgezeichnet. Der Algorithmus wurde von Subramani übernommen, der ihn für die Optimierung von Reparaturvorgängen entwickelt hatte /157/.

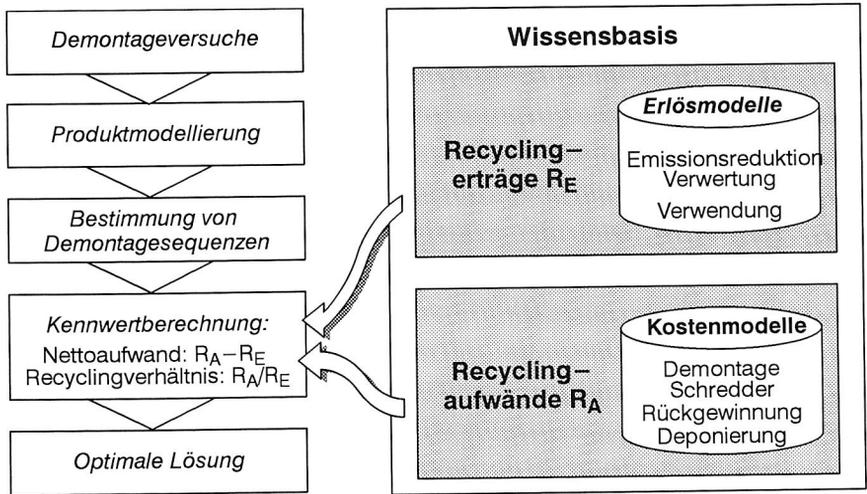


Bild 83: Methode und Modelle zur Bestimmung optimaler Demontagesequenzen im Softwaresystem ReStar; nach /53, 54/

Das System analysiert die möglichen Demontageverrichtungen und deren Kombinationen für das gesamte Produkt. Für jede Demontageverrichtung untersucht es die resultierenden Aufwände und vergleicht sie mit den zusätzlich erzielbaren Recyclingerträgen (Wert zurückgewinnbarer Werkstoffe, Wert wiederverwendbarer Bauteile) bzw. -aufwände (Kosten für Shreddern, Werkstoffseparierung und Deponierung). Prozeßorientiertes Grundlagenwissen über Recyclingprozesse geht nur indirekt über die Entsorgungskosten der Fraktionen in die Bewertung ein.

Das Verfahren erlaubt dadurch, die Variation dieser Parameter um die Anfälligkeit der Konstruktion für einen Wechsel der Rahmenbedingungen abschätzen zu können. Es bietet die Möglichkeit, alternative Demontagepfade unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien der Rahmenbedingungen zu analysieren. Wegen des Ursprungs des Algorithmus im Service werden jedoch nicht alle möglichen Demontagepfade bestimmt, sondern nur die, die benötigt werden, um jedes Bauteil auf den einfachsten Weg zu Reparaturzwecken aus dem Produkt zu lösen. Die Vorgehensweise wird somit den Anforderungen des Recyclings nicht gerecht.

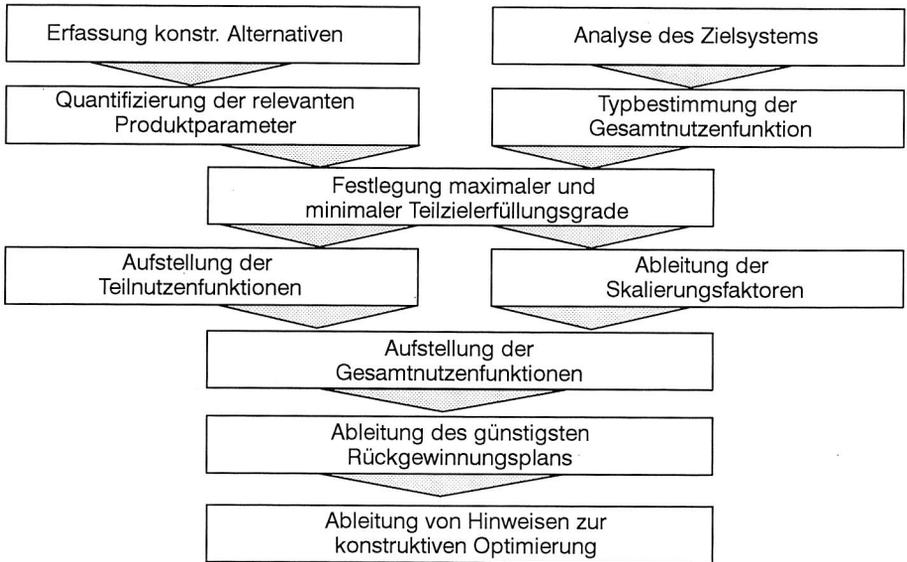


Bild 84: Systematische Einknüpfung der multiattributiven Nutzentheorie in die recycling-orientierte Produktbewertung, nach /65/

Zur Identifizierung des sog. Rückgewinnungsplans, d.h der Demontage- und Recycling-prozesssequenz, sind nach Kriwet die Erlöse und Aufwände aller Demontagepfade zu bestimmen /65/. Den Kern bildet dabei die Darstellung der Demontagevorrangbeziehungen in einem AND/OR-Graphen /146/. Es werden alle möglichen Demontagerihenfolgen und -tiefen vollständig dargestellt und ökonomisch bewertet. Um jedoch die genaue Modellierung der verschiedenen Ziele einer Firma bzgl. der Entsorgung eines Produkts sowie das Einbeziehen von unvorhersehbaren zukünftigen Entwicklungen der ökonomischen und ökologischen Randbedingungen als Bewertungskriterien aufzunehmen, wurde dazu das Konzept der Multiattributiven Nutzentheorie herangezogen /172/.

Der Nutzen, bzw. die Erfüllung der einzelnen Gestaltungsziele wird aus den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der relevanten Prozeßparameter berechnet. Die Funktionen werden durch Analysen früherer Entwicklungen, analytischer Prognosemethoden oder durch

Expertenbefragung bestimmt. In /172/ werden für die Bereiche Deponierung, Wiederverwertung, Wiederverwendung, Separierungsprozesse und Demontage entsprechende Funktionen und Wahrscheinlichkeitskurven angegeben. Um die einzelnen Ziele in ein Gesamtoptimum zu überführen, werden die Teilnutzen additiv in der Multizielnutzenfunktion zusammengefaßt.

Der And/Or–Graph ist fast ausschließlich auf die Darstellung der zerstörungsfreien Demontagemöglichkeiten und der dabei entstehenden Fraktionen beschränkt. Recyclingprozesse werden ebenfalls nur indirekt durch die Erlös/Kostenfunktionen der Fraktionen einbezogen. Eine Quantifizierung der Aufarbeitungsgerechtigkeit (ähnlich die Bewertung der Demontagerechtigkeit) kann auch hier nicht durchgeführt werden. In den bekannten Produktbeispielen werden keine elektronischen Bauteile einbezogen. Die Eignung des Konzepts in dieser Beziehung ist offen. Eine Rechnerunterstützung ist ebenfalls nicht bekannt, in /65/ wird jedoch ein Programmkonzept dargestellt.

7.5 Defizite rechnergestützter Systeme zur recyclinggerechten Produktbewertung elektronischer Baugruppen im Produktverbund

Seit den ersten Arbeiten von Beitz und Gehrmann zur recyclinggerechten Produktentwicklung und –bewertung wurde intensiv auf diesem Gebiet geforscht. Es wurden dabei unter Nutzung bekannter Theorien sehr unterschiedliche Methoden und Systeme entwickelt. Ein wesentlicher Unterschied der analysierten Methoden beruht auf der Nutzung differierender Bewertungskriterien.

Kennzahlenbasierte Bewertungsmethoden:

Es werden dabei problembezogene Kennzahlen berechnet, die losgelöst vom Recyclingsystem, eine Bewertung der Demontagerechtigkeit zulassen. Es wird folglich nur eine Untermenge des Problemraums diskutiert und dies anhand schwer verständlicher Kennziffern bewerten. Sie vermitteln, basierend auf Faktoren und Gewichtungen die subjektiv eingeführt werden, nur eine geringe Transparenz und zwingen den Benutzer zu einer sehr abstrakten Problembewertung.

Kostenorientierte Bewertungsmethoden:

Diese Methoden quantifizieren das Kosten/Erlösverhältnis in der Recyclingprozeßkette. Dabei werden Demontageprozesse in Kosten und verwend– bzw. verwertbare Fraktionen in Erlöse abgebildet. Die ökonomische Bewertung ist Grundlage aller wirtschaftlichen Entscheidungen und daher geeignet, Konstrukteur und Management als richtungsweisende Grundlage zu dienen.

Beide Methoden vereinen den Nachteil eines sehr eingeschränkten Bewertungshorizonts im Sinne der allgemeinen ökologischen Bewertung. So ist davon auszugehen, daß die ökonomische Bewertung von Materialfraktionen oder auch auf Basis von Kennziffern der Demontage nicht implizit die Knappheit oder die Toxizität der enthaltenen Rohstoffe wiedergibt. Die Kerncharakteristiken der vorher beschriebenen Systeme sind in Bild 85 zusammengefaßt und vergleichend bewertet.

		Evershain	Gehrmann Hartel	Levandowski Simon	LASeR	ReStar	Kriwet
Produktanalyse	Erfassen d. Produktstruktur: indirekt (○), demontageorient. (◐), vollständig (●)	○	◐	◐	◐	●	●
	Erfassen d. Produktdaten: Tabellen (○), systemunterst. (◐), automatisiert (●)	○	◐	○	○	◐	◐
	Graphische Unterstützung bei Ein- und Ausgabe: vorh. (○), nicht vorh. (●)	○	●	●	●	●	●
Bewertung	Basis: zerstörungsfreier Dem.(○), incl. zerstörender Dem. (◐), incl. Recyclingproz. (●)	○	○	○	○	○	◐
	Bewertungsgrößen: Subjektiv (○), Kennzahlen (◐), Kosten/Erlöse (●)	◐	◐	○	◐	●	●
	Bewertung zusätzl. Zielgrößen: unmöglich (○), vorgesehen. (◐), implementiert (●)	○	◐	○	○	◐	◐
	Untersuchung einer (○), mehrerer (◐) aller (●) mögl. Demontagekombinationen	○	◐	○	○	◐	●
Optimierung	Simulation von Szenarien: unmöglich (○), aufwendig (◐), unterstützt (●)	○	◐	○	◐	◐	◐
	Schwachstellenanalyse: nicht möglich (○), bedingt mögl. (◐), implementiert (●)	◐	◐	○	◐	◐	◐
	Bildung v. Recyclinggruppen: nicht möglich (○), bed. mögl. (◐), implementiert (●)	○	○	○	●	●	◐
System	Manuell (○), Rechner vorgesehen (◐), Rechner implementiert (●)	○	◐	○	○	●	◐
	Berücksichtigung elektronischer Baugruppen: ja (●), nicht explizit (○)	○	○	○	○	○	○

Bild 85: Systematische Bewertung von Methoden und Systemen zur recyclinggerechten Produktbewertung

Es lassen sich die folgenden Schlüsse ableiten:

- Die elektronische Baugruppe mit den besonderen produktspezifischen und recyclingprozeßbezogenen Charakteristika ist nirgends explizit in die Bewertung aufgenommen.
- Ein zuverlässig funktionierendes, rechnerunterstütztes System ist nicht bekannt.
- Die Verarbeitung von ressourcen-, umwelt- oder toxikologiespezifischen Kennzahlen ist in Ansätzen zu erkennen aber im Detail noch nicht entwickelt.
- Die explizite Abbildung von Recyclingprozessen und von Prozeßketten ist nicht durchgeführt.
- Bei der Bewertung der Demontagegerechtheit wird oft von der 'Montage rückwärts' ausgegangen. Zerstörende Demontageverfahren und deren Effizienzpotential in der Demontagefabrik werden oft nicht berücksichtigt.

- Erhebliche Schwachstellen sind in der Dateneingabe und der Ergebnisaufbereitung festzustellen. Eine Datenan Kopplung wurde nirgends vorgesehen.
- Eine gezielte Schwachstellenanalyse, die einfache Bewertung von Änderungsvarianten oder die Simulation von verändernden Rahmenbedingungen ist, falls überhaupt möglich, äußerst schwierig durchzuführen.

Die durch die Analyse der methodischen Ansätze herausgearbeiteten Schwachstellen sind in einem erweiterten Lösungsansatz zu verbessern. Ziel der folgenden Entwicklungen soll deshalb sein, auf Basis ökonomischer Kriterien ein System zu realisieren, welches es dem Konstrukteur ermöglicht, eine recyclingprozeßorientierte Produktbewertung und –optimierung durchzuführen. Wegen spezifischer Einflüsse aus der Elektronik wird der Recyclingprozeßbezug und die Darstellung alternativer Demontageprozesse in den Vordergrund gerückt.

8. Entwicklung eines Systems zur recyclinggerechten Produktbewertung

In Kap. 7 wurden Regeln zur recyclinggerechten Konstruktion definiert. Sie unterscheiden sich erheblich in ihrer Komplexität, in Bezug auf das zu verarbeitende Wissen und in ihrer Überprüfbarkeit. Es bestehen einige Regeln, die auf detaillierten technologischen Fachkenntnissen basieren, deren analytischer Aspekt jedoch eher als trivial zu werten ist. Zum Beispiel bedarf es zur Auswahl der Gehäusetechnologie eines Bauelements vor allem fertigungstechnischer Kenntnisse. Die Auswahl des Bauelementpackagings nach dem Gewicht ist jedoch sehr einfach.

Stoffliche Kriterien spielen eine wesentliche Rolle z.B. bei der Bewertung der Toxizität. Zur vollständigen Beschreibung des komplexen Materialgemisches elektronischer Schaltungsverträge werden erhebliche Datenmengen benötigt. Um diese in einer Recyclinganalyse verarbeiten zu können, ist eine rechnerunterstützte Bearbeitung erforderlich.

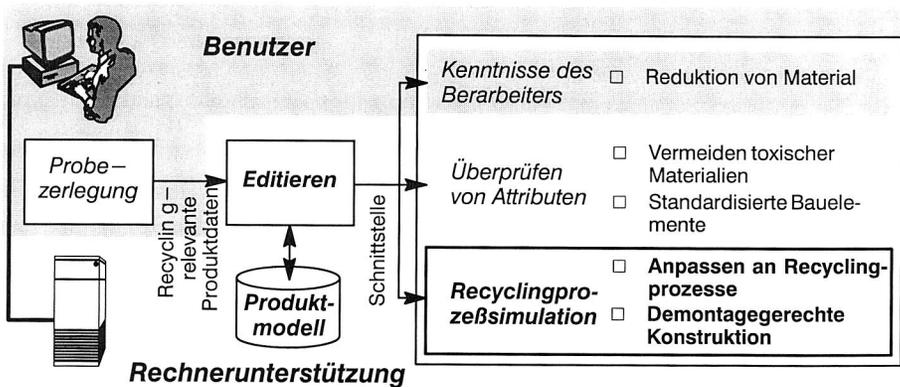


Bild 86: Klassifikation der Regeln zur recyclinggerechten Konstruktion nach deren Regelmechanismus und Bestimmung des Potentials zur Rechnerunterstützung

Zur Berücksichtigung recyclingprozessorientierter Regeln in der Konstruktion sind produktspezifische, vor allem material- und strukturabhängige Informationen zu verarbeiten. Ansätze aus der Forschung wurden im vorhergehenden Kapitel erläutert, ihre Schwachstellen herausgearbeitet.

Ein besonderes Ziel der folgenden methodischen Darstellung ist es, ein System zur Bewertung der Recyclinggerechtigkeit elektronischer Baugruppen im Produktverbund zu entwickeln. Es wird dabei kein regelbasierendes Expertensystem entwickelt, welches interaktiv die Konstruktion verbessern hilft, hingegen wird ein System aufgebaut, das unter Auswahl von Recyclingstrategien den Stand der Konstruktion bewertet und Schwachstellenanalysen ermöglicht. Im einzelnen werden in den nächsten Kapiteln folgende Sachverhalte diskutiert:

- Es wird formal das Produktmodell und die Regelrepräsentation eingeführt. Dabei wird speziell auf die Eigenheiten elektronischer Schaltungsträger eingegangen.
- Darauf aufbauend wird dann die implementierte graphische Oberfläche zur abstrakten Darstellung von Produktstrukturen (Recycling Graph Editor) beschrieben.
- Mit Hilfe des Produkteditors werden Möglichkeiten zur Beschreibung alternativer Demontagetechnologien dargestellt.
- Basierend auf der Literatur zu graphentheoretischen Grundlagen wird eine Methode zur Repräsentation aller Demontagepfade abgeleitet.
- Die theoretische Analyse der Demontageprozesse wird um eine Analyse der Recyclingprozesse erweitert.
- Abschließend wird eine prototypenhafte Umsetzung des Recyclinggrapheditors beschrieben und am Beispielprodukt getestet.

8.1 Recyclingbezogenes Datenmodell für elektronische Produkte

Ein elektronisches Produkt gliedert sich in elektronische, elektromechanische und rein mechanische Bauelemente und die zugehörigen Verbindungselemente. Diesen obliegt die Aufgabe, die einzelnen Bauelemente mechanisch und/oder elektrisch miteinander zu verbinden und repräsentieren die logischen Querbeziehungen im Produkt.

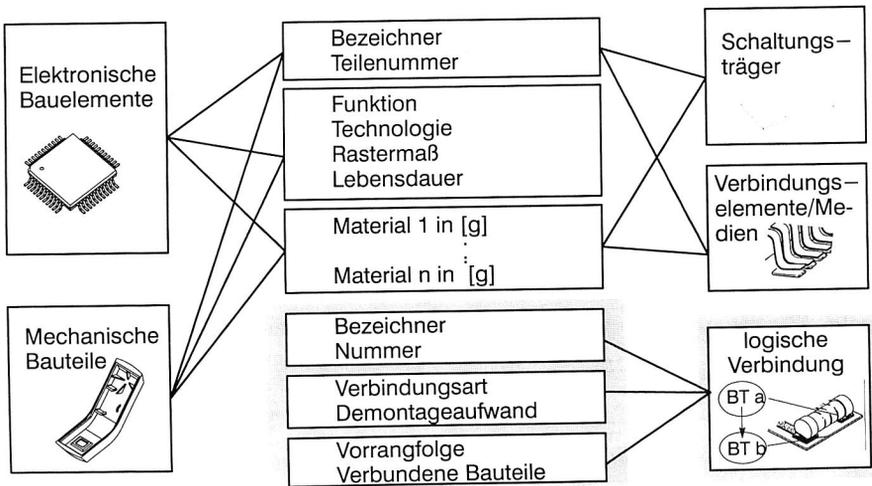


Bild 87: Analyse von Bauteilen, Verbindungstechniken und Substraten

Produktmodelle sind Kern verschiedener Forschungsaktivitäten und sind mehrfach in der Literatur wissenschaftlich aufgearbeitet. Es sei dazu unter anderen auf /78–81, 151/ verwie-

sen. Zur Herleitung eines geeigneten Produktmodells im Rahmen dieser Arbeit wurden die in Kap. 7 hergeleiteten Regeln im Detail analysiert. Eine Grundlegende Unterteilung geschieht in der Trennung der physikalischen Bauteile (Bauteilattribute) und des logischen Produktaufbaus (Verbindungsattribute). Den zwei Attributklassen können die in Bild 87 dargestellten Attribute zugeordnet werden. Sie sind im folgenden beschrieben:

Bauteilattribute:

Bezeichner, Teilenummer:

Um eine eindeutige Zuordnung zu den in einer Firma befindlichen Bauteilen zu ermöglichen, muß eine konsistente Bezeichnung durchgeführt werden. Diese wird um eine systeminterne Namensgebung und Numerierung ergänzt.

Technologische Daten:

Darunter sind Daten zur Charakterisierung der technologischen Entwicklung zu verstehen; Beispiele sind die Strukturbreite der Leiterbahnen integrierter Schaltungen, das Rastermaß oder auch die Lebensdauer der Produkte.

Bauteilmaterialdaten:

Hier wird eine vollständige Liste der Materialdaten unter Angabe des Gewichts geführt.

Logische Verbindungen:

Produktstrukturdaten:

Es werden einzelne Bauteile und Verbindungen definiert und diese in Relation zueinander gesetzt.

Vorrangbeziehungen:

Eine Vorrangbeziehung zwischen zwei Bauteilen existiert dann, wenn zum Lösen einer bestimmten Verbindung eine andere vorher entfernt werden muß. Die Kenntnis über die Vorrangbeziehung in einem Produkt ist die Grundlage für die korrekte Ableitung aller technisch möglichen Demontagesequenzen /16, 136/.

Wie in /65/ beschrieben, existieren verschiedene formal korrekte Lösungen zur Ableitung der Vorrangbeziehungen für die Montage, die auch zur Beschreibung von Demontage sequenzen prinzipiell geeignet sind. So kann z.B. auf Basis einer gedanklichen Demontagebewegung in Richtung der Normalen der Kontaktfläche sequentiell jedes Bauteil entfernt und das Kollisionspotential analysiert werden. In der Vorgehensweise von Bourjault (Methode der Verbindungsbedingungen; /6/) wird versucht, mit Hilfe einer Reihe von Regeln bzw. Fragen die Vorrangbeziehungen abzuarbeiten. Bei deren Beantwortung werden die sogenannten Verbindungsbedingungen durch boolesche Terme erfaßt. Diese Methodik wurde von De Fazio und Whitney aufgegriffen und in die 'Methode der Vorrangrelationen' umgeändert /14/. Dabei ist die Kenntnis aller zwischen den Verbindungspaaren bestehenden Wechselbeziehungen Voraussetzung. Ein Satz von Relationen zur Beschreibung zulässiger Demontageverrichtungen wird ebenfalls durch die Beantwortung verschiedener Fragen erarbeitet. Im Rahmen der Bewertungsmethodik soll die gedankliche (bzw. Probe-) Demontage zur Analyse der Vorrangbeziehungen empfohlen werden. Bei einfachen (aus der Sicht der Vorrangbeziehungen) Produkten wie z.B. den bestückten Leiterplatten können die Vorrangbeziehungen intuitiv festgelegt werden.

8.1.1 Formalisierung der Gestaltungsregeln

Die in Kap. 7 aufgestellten recyclingprozeßorientierten Regeln (v.a. Verwerten, Demontage) sind, um deren Prinzipien in der Konstruktion umsetzen zu können, im Detail zu analysieren.

Verwendung/Verwertung/Vermeidung

Grundsätzlich sind in den Gestaltungsregeln recyclingspezifische Anforderungen an das Produkt definiert. Z.B. sind in den Regeln zur Verwertung auf Basis der Verwertungsprozesse Materialzusammensetzungen definiert, die auf das Produkt anzuwenden sind. Ergänzend sind auch Regeln zur Vermeidung vorgegeben (z.B. bestimmte toxische Stoffe dürfen nicht oder nur bis zu einem gewissen Grenzwert beinhaltet sein). Aus den Beispielen ist zu verallgemeinern, daß die Designregeln auf die Attributierung der Bauelemente anzuwenden sind und diese reglementieren.

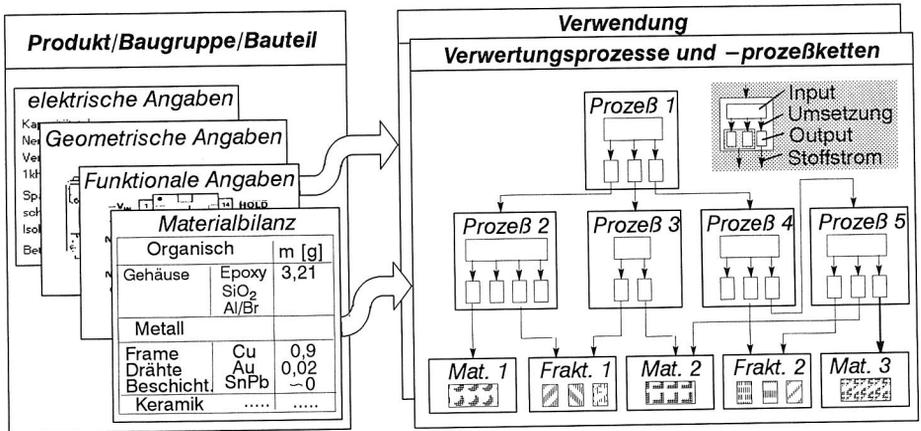


Bild 88: Vernetzung der Produktattribute mit den Verwertungs- und Verwertungsprozessen bzw. Prozesseketten (Mat.: Material, Frakt.: Fraktion)

Dies kann in Abhängigkeit des Recyclingprozesses in verschiedener Weise umgesetzt werden, z.B.:

- Regel 2 definiert Stoffe, die toxisch und damit im Sondermüllprozeß zu entsorgen sind.
- Regel 4 – 7 beschreiben Kriterien der Bauelemente, um deren Wiederverwendung zu ermöglichen.
- Regel 8 spricht Recyclingprozesse an (Beispiel: Kupferhütte), welche das Eingangsmaterial umsetzen und dabei Wertstoffe wiedergewinnen (siehe auch Kap. 3)

Die Gestaltungsregeln beziehen sich also auf Bauteilattribute und implizieren die Umsetzung der Bauteile durch theoretisch modellierte Recyclingprozesse und Recyclingprozesseketten in Zwischen- oder Endprodukte. Die Bestimmung der Endprodukte von Recycling-

ketten basiert damit auf Produktdaten sowie den Prozeßmodellen. In diesem Zusammenhang ist auf die Zusammenhänge zwischen spezifischen Attributen des Produktmodells zu ausgewählten Recycling- bzw. Entsorgungsprozessen hinzuweisen. Zur Formalisierung und Konkretisierung dieser Beziehungen im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Darstellung in semantischen Netzen zurückgegriffen. Um das Potential dieser Analyse-methode aufzuzeigen, wurde in Bild 89 ein Auszug eines Netzes dargestellt.

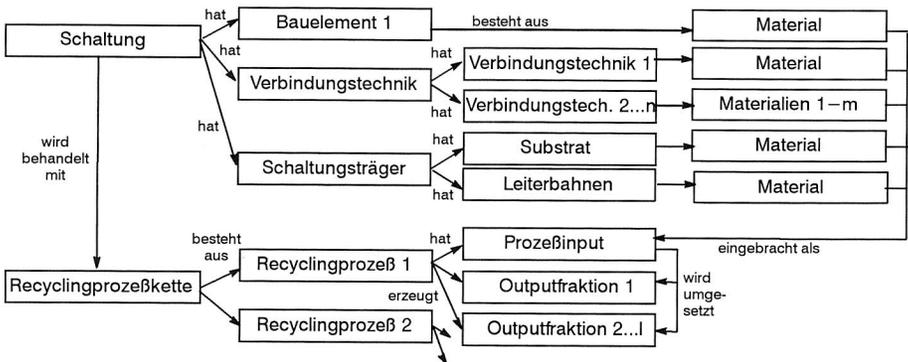


Bild 89: Beispielhafte Darstellung der Designregel zur Analyse der Recyclingprozeßfähigkeit im semantischen Netz

Demontage

Im Gegensatz zu den recyclingprozeßbeschreibenden Regeln beziehen sich die Regeln zur Demontage auf die Verbindungstechnik, deren Zugänglichkeit und Lösbarkeit. Ein Aspekt der Analyse bezieht sich auf die technologischen Aspekte wie das Potential zur Anwendung von zerstörenden Verfahren oder simultanen Prozessen. Der zweite Teil der Analysen bezieht sich auf die Produktstruktur. Darunter ist die konstruktive Anordnung der einzelnen Baugruppen und Bauteile zueinander sowie deren logische Montage bzw. Demontagerihenfolge (im weiteren auch als Zwangsfolge bezeichnet) zu verstehen.

Um die Demontagefähigkeit von Produktstrukturen unter Beachtung von Demontagetechnologien zu bewerten, muß eine Möglichkeit gefunden werden, alle Demontagesequenzen, d.h. die technologisch möglichen Demontageprozessketten, zu bestimmen. Um dies zu unterstützen, wird im folgenden eine Methode erarbeitet, die es ermöglicht, Produktstrukturen, Bauteil- und Verbindungsattribute strukturiert darzustellen. Mit Hilfe der Graphentheorie soll dann ein Mechanismus definiert werden, der alle technologisch sinnvollen Demontagesequenzen generieren kann. Die aus den Demontageprozessen theoretisch ableitbaren Materialfraktionen sind dann Input für geeignete Recyclingprozesse (siehe auch Bild 89).

8.2 Definition des Recyclinggraphen zur strukturierten, recyclingorientierten Produktmodellierung

In enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Universität Erlangen/Nürnberg wurde ein Konzept zur strukturierten, recyclingorientierten Produktmodellierung entwickelt. Der sogenannte 'Recyclinggraph' dient dazu, recyclingrelevante Informationen strukturiert zu erfassen und für weitere Anwendungen über definierte Schnittstellen zur Verfügung zu stellen. Als Wissensbasis des Recyclinggraphen dient die abstrakte Beschreibung eines Produkts wie im folgenden Kapitel dargestellt. Diese wird, losgelöst von der Komplexität des physikalischen Aufbaus, in erster Näherung als ein ungerichteter, einfacher Graph beschrieben /146/. Die darin enthaltenen Graphenknoten können zunächst in folgende Kategorien unterteilt werden:

- *Bauteile* (als Ellipsen dargestellt)
- *Verbindungen* (als Kreise dargestellt)

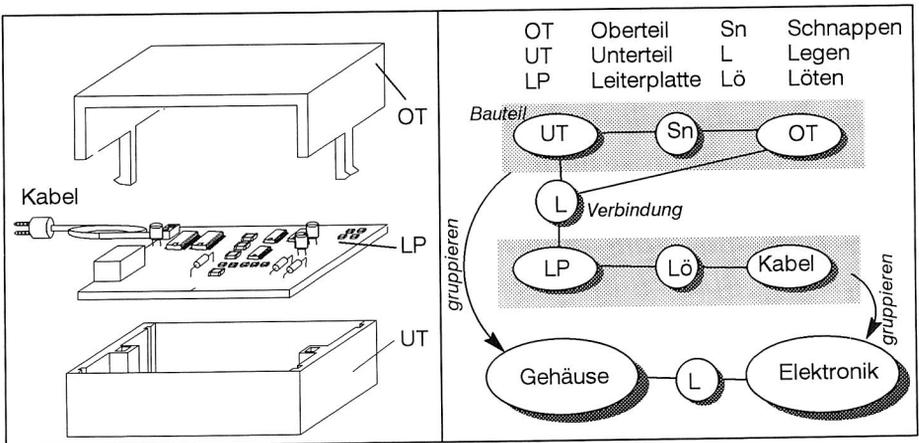


Bild 90: Modellprodukt und der dazugehörige Recyclinggraph

In Bild 90 ist ein mit einem Deckel verschlossenes Gehäuse dargestellt, in welchem eine mit elektrischen Bauteilen bestückte Leiterplatte eingelegt wird. Dabei berührt die eingelegte Leiterplatte sowohl das Unterteil UT als auch das Oberteil OT. Weiterhin ist an der Leiterplatte ein mit einem Stecker versehenes Kabel angelötet.

Ein weiteres Element im Recyclinggraph bildet die *Recyclinggruppe* (dargestellt durch eine große Ellipse, siehe Bild 90). Sie bietet die Möglichkeit, in Abhängigkeit von der gewählten Recyclingstrategie Material- oder Funktionsgruppen zu bilden. Die Elemente innerhalb einer solchen Gruppe zeichnen sich durch bestimmte Eigenschaften (z.B. Materialeigenschaften, Funktionseinheit) aus, die sie von anderen Teilen unterscheiden. Dieses Zusammenfassen ermöglicht eine übersichtliche, hierarchisierende Produktdarstellung, bietet die

Möglichkeit des Aufbaus von Bauteil- und Verbindungstechnikbibliotheken und kann erheblichen Einfluß auf die späteren Analysen haben. Die Recyclinggruppe gilt als Ersatz für die Menge aller ausgewählten Bauteile und Verbindungstechniken. Formal wird ein entsprechender Satz von Attributen eingeführt. Graphisch wird die Menge der zusammengefaßten Bauteile und Verbindungen ausgeblendet und das Gruppensymbol eingeführt (Bild 90). Die Bildung der Gruppen ist prinzipiell algorithmisierbar, soll aber nicht Inhalt der folgenden Ausführungen sein (siehe auch /20, 83/).

Formal kann der bis zu diesen Punkt entwickelte Recyclinggraph als ungerichteter einfacher Graph g verstanden werden, der durch ein Tupel $\langle E_g, K_g \rangle$ beschrieben werden kann /146/.

E_g ist die Menge der Knotenpunkte, die sich durch die Elemente Bauteil, Verbindung und Gruppe charakterisieren läßt.

$E_g = \{B_g, V_g, G_g\}$, Menge der Elemente;

mit ($n \neq m \neq o$):

$B_g = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, Menge der Bauteile

$V_g = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, Menge der Verbindungen,

$G_g = \{g_1, g_2, \dots, g_o\}$, Menge der Recyclinggruppen.

K_g ist eine binäre, bijektive Kantenrelation, deren Elemente je zwei Knoten verknüpft. Es gelten folgende Bedingungen:

- eine Kante kann nur zwischen einem Bauteil und einer Verbindung oder einer Gruppe und einer Verbindung bestehen:

$$\forall (x, y) \in K_g : \left((x \in B_g \vee x \in G_g) \wedge y \in V_g \right) \vee \left((x \in V_g) \wedge (y \in B_g \vee y \in G_g) \right)$$

- die Kantenrelation K_g ist symmetrisch: $(x, y) \in K_g \Rightarrow (y, x) \in K_g$
- die Kantenrelation K_g ist nicht reflexiv: $(x, x) \notin K_g$
- die Abbildung ist eindeutig, d.h es existiert zwischen zwei Knoten genau eine Kante:

$$\forall x_1, y_1, x_2, y_2 \in E_g : \left((x_1, y_1) \in K_g \wedge (x_2, y_2) \in K_g \right) \Rightarrow (x_1 \neq x_2) \wedge (y_1 \neq y_2)$$

Der Begriff des Recyclinggraphs wird, um die oben eingeführten Eigenschaften zu erhalten, um die folgende Definitionen erweitert:

- Attribute für Bauelemente und Verbindungen ($N \neq M$):

$$B = \text{Batr}_a \times \text{Batr}_2 \times \dots \times \text{Batr}_N$$

$$V = \text{Vatr}_a \times \text{Vatr}_2 \times \dots \times \text{Vatr}_M$$

Recyclinggruppen G enthalten zusätzlich zu den Attributbeschreibungen $Gatr$ Strukturinformationen über die in ihnen enthaltenen Teilgraphen. Sie setzen sich aus der Menge der Elemente der Teilgraphen R und die zwischen diesen Elementen bestehenden Relationen

K zusammen. Die Erhaltung der Strukturinformation ist Voraussetzung für die Invertibilität der Gruppenbildung. Die Menge aller Gruppen ist also:

$$G = \text{Gatr}_a \times \text{Gatr}_2 \times \dots \times \text{Gatr}_p \times R \times K, \quad (p; \text{Anzahl der Attribute}).$$

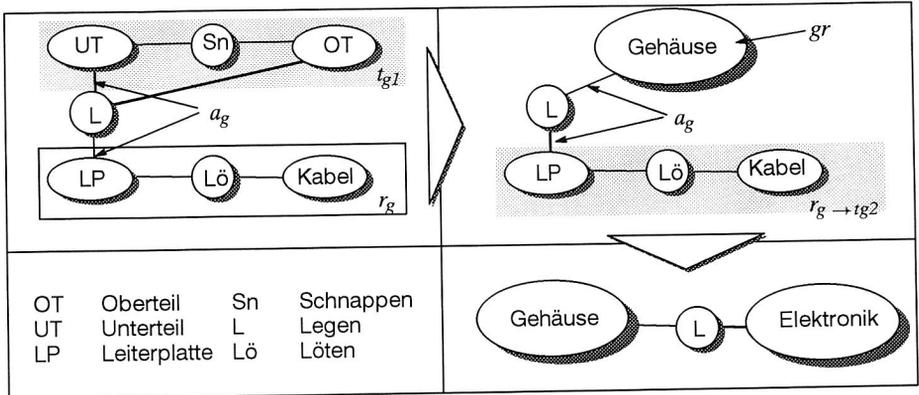


Bild 91: Modellprodukt und der dazugehörige Recyclinggraph

Das Beispiel in Bild 91 veranschaulicht, welche Daten in einer Gruppe enthalten sein müssen. Der Recyclinggraph wird durch das Gruppieren in einen Teilgraphen t_g , einen Restgraphen r_g und eine Menge a_g von Kanten zwischen den beiden Graphen (a für Außenkante) aufgeteilt. Nach dem Gruppierungsvorgang sind die Elemente des Teilgraphen durch ein einzelnes Gruppenelement t_g ersetzt worden. Die in den disjunkten Graphen r_g und t_g enthaltenen Elemente und Kanten bilden jeweils einen eigenständigen Recyclinggraphen. Jede Kante der Menge A_g besteht aus einem Paar von je einem Element der beiden Graphen. Diese Kanten können also in keiner der Kantenmengen der Graphen enthalten sein, ohne die Bedingungen der Kantenrelation eines Recyclinggraphen zu verletzen (siehe Def. K_g). Es ist eine Erweiterung der Definition der Relation K_g einzuführen, die formal die Menge A_g aus der Menge der Elemente E_g entfernt. Zu diesem Zweck wird die Gruppierungsrelation $group$ eingeführt.

$$group = \{(r,q)/\exists t : t \text{ ist Teilgraph von } r \wedge q = (E_s \cup gr, K_s \cup K)\}, \text{ mit}$$

$$K_{gr} = \{(gr,x)/x \in E_s \wedge \exists y \in E_t : (x,y) \in K_r\} \cup \{(x,gr)/x \in E_s \wedge \exists y \in E_t : (x,y) \in K_r\}$$

Verknüpfung mit der neuen Gruppe gr , wobei

$$gr \in \text{Gatr}_1 \times \text{Gatr}_2 \times \dots \times \text{Gatr}_p \times t \times$$

$$\times \{(x,y)/(x,y) \in K_r \wedge (x \in V_s \wedge y \in E_t) \vee (x,y) \in K_r \wedge (y \in V_s \wedge x \in E_t)\}$$

Dadurch sind nun auch die neuen Kanten zwischen gr und dem Restgraphen berücksichtigt.

8.3 Formalisierung von Demontageprozessen

Ein Produkt ist ein stabiles Gebilde aus mehreren, miteinander verbundenen Baugruppen bzw. Bauteilen. Die Stabilität bezieht sich dabei nicht auf die Steifigkeit der Konstruktion, sondern vielmehr auf die Kontinuität der internen Verbindungen. Dies hat zur Konsequenz, daß eine Verbindung nur durch eine auf sie angewendete Demontageoperation zu öffnen ist und sich nicht spontan, ohne äußere Einwirkung, von selbst lösen kann.

Selektive Demontage

Ein Demontageschritt besteht aus einer logischen Reihenfolge elementarer Demontageoperationen. Jede einzelne Operation dient dabei dem Lösen genau einer Verbindung, mit dem Ziel, eine Baugruppe in zwei oder mehrere Unterbaugruppen aufzulösen. Sind diese über mehr als eine Verbindung miteinander befestigt, dann führt eine einzelne Operation zu keiner Zerlegung der Konstruktion. Eine einmal geöffnete Verbindung wird zu keinem Zeitpunkt des Prozeßverlaufs wieder geschlossen.

Alternative Demontageprozesse

Wie in den Prozeßentwicklungen zur Leiterplattendemontage in Kap. 4 deutlich wurde, können unterschiedliche Demontageprozesse auf ein und dieselbe Verbindung angewandt werden. Neben den physikalisch vorhandenen Verbindungen werden im folgenden auch virtuelle Verbindungen definiert, die durch neue, vor allem zerstörende Demontageprozesse gelöst werden. Durch eine geschickte Produktmodellierung durch den Benutzer können verschiedene Verbindungs- und damit Demontagekonzepte dargestellt und Rückschlüsse auf die Konstruktion gezogen werden.

Es ist für die Leiterplattendemontage interessant zu prüfen, ob ein Bauelement selektiv zu demontieren ist, damit es später wiederzuverwenden ist, oder ob es simultan mit anderen Bauelementen demontiert wird, um sie dem stofflichen Recycling zuzuführen. Es liegen dabei verschiedene Demontageprinzipien vor (Kap 4). Ziel ist es, die Entscheidung zu fällen, welches der Konzepte das kosteneffizientere Verfahren für das einzelne Bauteil ist, wobei dabei nach wie vor das Gesamtoptimum des Produkts im Auge behalten werden muß.

Simultane Demontage

Ziel muß es sein, kosteneffiziente Durchlaufverfahren zu simulieren. Dies geschieht nur, wenn dabei eine simultane Bearbeitung verschiedener Verbindungen ermöglicht wird. In Bild 92 ist am Beispiel des in Kap. 4 entwickelten simultanen Leiterplattendemontageprozesses das Vorgehen dargestellt. Simultan zu demontieren bedeutet auch, alle Verbindungen zwischen Leiterplatte und Bauelementen zu einer einzigen Verbindung zusammenzuziehen. Während des Demontierens wird diese Verbindung gelöst und die Bauelemente von der Leiterplatte entfernt. Eine weitere Vereinfachung kann dadurch erfolgen, daß alle ähnlichen Bauelemente zu einer Gruppe zusammengefügt werden.

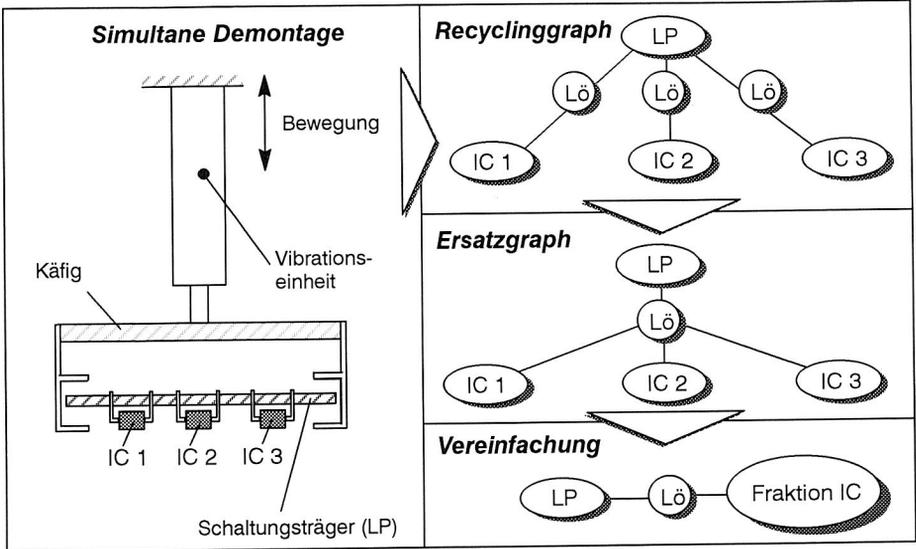


Bild 92: Modellierung eines simultanen Demontageprozesses im Recyclinggraphen

Zerstörende Demontageprozesse

Zerstörende Prozesse bearbeiten nicht die Verbindungen selbst, sondern die Bauteile. In den Definitionen des Recyclinggraphen ist jedoch eine Aufspaltung eines Bauteils nicht vorgesehen.

Um diese Möglichkeit jedoch einzubeziehen, werden in die Produktstruktur virtuelle Verbindungen (siehe auch /65/) eingefügt, die die Zerstörung eines Bauteils symbolisieren. Dies bedeutet am Beispiel der Trennung elektrischer Bauelemente konkret die Einführung einer weiteren, materiallosen Verbindung. Es wird dadurch ein neues Bauteil kreiert, das den auf der Leiterplatte verbleibenden Beinchenstummel symbolisiert. Die Darstellungen im Recyclinggraphen sind in Bild 93 wiedergegeben.

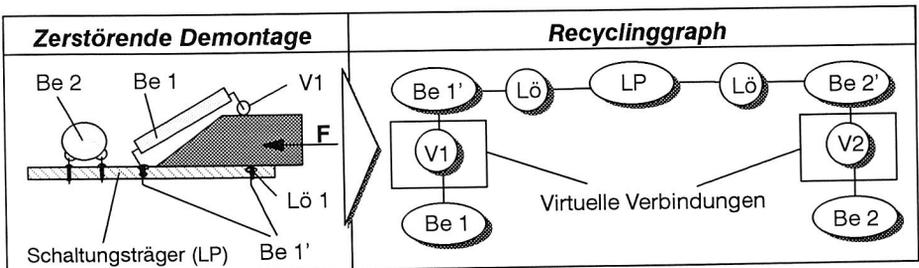


Bild 93: Modellierung eines zerstörenden Demontageprozesses im Recyclinggraphen mit Hilfe von virtuellen Verbindungen (Be = Bauelement; V = virtuelle Verbindung)

8.4 Auswahl einer geeigneten Methodik zum Erzeugen aller Demontagekombinationen

Nach der Einführung alternativer Demontagetypen sind im nächsten Schritt die technologisch durchführbaren Demontagesequenzen zu generieren. Die Ausgangsbasis dazu sind die im Produktmodell abgelegten Daten. Der ungerichtete bzw. durch die Vorrangbeziehungen teilgerichtete Graph muß zu diesem Zweck in einen Demontagegraphen transformiert werden, aus dem dann die einzelnen Demontangepfade abgeleitet werden.

Die in der Literatur bekannten Ansätze zur Generierung von Demontagesequenzen sind ausschließlich aus der Montage abgeleitet und, um den Anforderungen auf Vollständigkeit und Korrektheit der Darstellung in der Demontage gerecht zu werden, entsprechend modifiziert. In /163/ werden die Graphendarstellungen in die Kategorien:

- Baugruppenstrukturgraph,
- Verbindungsstrukturgraph,
- prozeßorientierte Graphen,
- komponentenorientierte Graphen

eingeteilt. Die beiden letztgenannten bieten prinzipiell die Möglichkeit, die eigentlichen Demontageprozesse sowie die entstanden Bauteilzusammensetzungen zu bestimmen. Aus diesen Grund werden im folgenden nur die schon bekannten Ansätze (Vorranggraph, gerichteter Graph, Hypergraph) umrissen und bzgl. deren Eignung zur rechnerunterstützten Umsetzung analysiert.

Vorranggraphen

Der Montagevorranggraph stellt die Montageverrichtungen und ihre Vorrangbeziehungen in von links nach rechts aufgebauten Netzplänen dar. Der Demontagegraph wird ähnlich aufgebaut, wobei die Demontageverrichtungen (Lösen von Verbindungen, Ausbau von Teilen) als Knoten gekennzeichnet sind und die Vorrangbeziehungen durch Kanten symbolisiert werden. Der Graph wird direkt aus den Vorgänger/Nachbarbeziehungen abgeleitet /2, 163/.

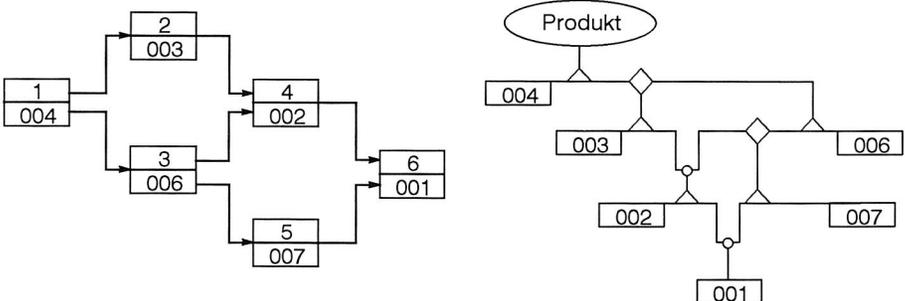


Bild 94: Vorranggraph für Montage und Demontage und Strukturbild /163/

Vorranggraphen weisen jedoch Schwachstellen auf /65/. Die Produktzustände bei der Demontage werden im Vorranggraphen nicht abgebildet. Sie stehen folglich zur direkten Bewertung nicht zur Verfügung und müssen aufwendig abgeleitet werden. Dies gestaltet sich jedoch schwierig, da in einem Vorranggraphen nicht alle Kombinationen von Demontageverrichtungen erfaßt werden. Dies ist dadurch begründet, daß sich dieser immer auf ein festes Basisteil bezieht. Der Vorranggraph ist also durch seine beschränkte Fähigkeit der Abbildung realer Demontagesequenzen aus den weiteren Betrachtungen auszuschließen.

Gerichtete Graphen

Existiert von einer Baugruppe ein Recyclinggraph, so ist es möglich, aus diesem unter Berücksichtigung der definierten Vorrangbeziehungen einen gerichteten Graphen abzuleiten, mit dem alle möglichen Demontagesequenzen darstellbar sind.

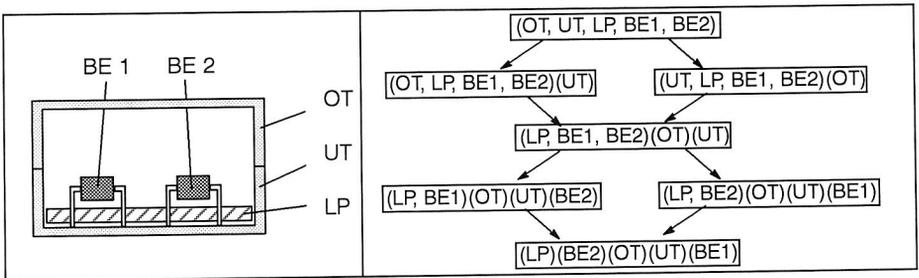


Bild 95: Gerichteter Demontagegraph eines Modellprodukts

Die Menge aller Kanten charakterisiert dabei die in einzelnen Prozessen verwendbaren Demontageverrichtungen. Jedes dieser Elemente besteht aus einem geordneten Paar einer Kante und eines Knotens. Der Knoten beschreibt die durch die Demontage verursachte Trennung des Produkts/Baugruppe in Unterbaugruppen/Bauteile. Eine formale Definition des gerichteten Demontagegraphen kann /49/ entnommen werden. Ein Demontagespfad durch einen Graphen ist dabei durch die Folge von Knoten repräsentiert. In Bild 95 ist am Beispiel eines Modellprodukts der gerichtete Graph aufgebaut.

Der große Nachteil von gerichteten Demontagegraphen besteht darin, daß die Anzahl der Knoten mit der Anzahl der Bauteile steigt /49/, da jeder Demontageprozeß als Pfad innerhalb des Graphen dargestellt wird und zu jedem Zeitpunkt das komplette Produkt mit allen bereits herausgebauten Einzelgruppen betrachtet wird.

Hypergraph / AND/OR – Graph

Der Hypergraph ist eine Darstellungsmethode, bei der jeder Knoten ausschließlich die für den nächsten Schritt relevante Baugruppe enthält. Jeder Dekompositionsschritt führt zu einer baumstrukturähnlichen Auffächerung in mehrere Folgeknoten. Dadurch entfällt zum einen das Mitführen von für den Prozeßverlauf unwichtigen Informationen, zum anderen entsteht der Vorteil, parallel ausführbare Operationen berücksichtigen zu können.

Der in /49, 50/ vorgestellte AND/OR–Graph oder Hypergraph ist eine Struktur, die aus einer Reihe von Demontagebäumen besteht. Der Wurzelknoten aller Bäume wird durch das vollständig montierte Gesamtprodukt bezeichnet, während die Blätter die am Schluß des Demontageprozesses verbliebenen Bauteilgruppen charakterisieren.

In /49/ und /50/ wird auf die präzise mathematische Formulierung des Graphen eingegangen und eine Komplexitätsbetrachtung durchgeführt. Im Vergleich zu gerichteten Graphen ist die Anzahl der Knoten in Abhängigkeit von der Produktstruktur erheblich geringer (z.B. 14 Bauteile netzartig miteinander verbunden: gerichteter Graph 10^8 Knoten, Hypergraph 10^4 Knoten).

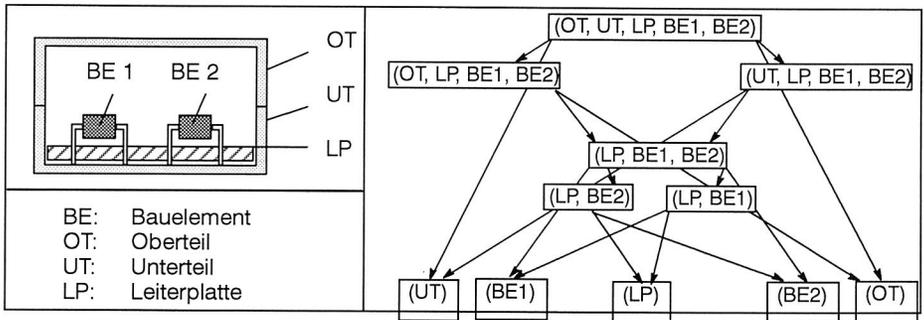


Bild 96: Hypergraph eines Modellprodukts

Ergebnis

Wie sich aus dem Vergleich erkennen läßt, erfüllen Vorranggraphen die im Hinblick auf eine vollständige Darstellung der Demontagemöglichkeiten gestellten Anforderungen nicht. Es können weder alle Demontagesequenzen in einem Graphen erstellt werden, noch die damit zu erzeugenden Bauteilkombinationen erfaßt werden. Diese Nachteile werden durch gerichtete Graphen sowie durch AND/OR Graphen ausgeglichen. Im direkten Vergleich beider wird deutlich, daß bei Einführung des AND/OR Graphen Produkte höherer Komplexität (ab 4 Bauteilen) eine geringere Knotenzahl aufweisen und damit geringeren Speicherbedarf verursachen. Weiterhin ist bei AND/OR–Graphen die Ausführbarkeit paralleler Operationen berücksichtigt. Dies wird durch die mehrfache Verzweigung aus einem Knoten zu den entsprechenden Unterbaugruppen deutlich. Beide Methoden erlauben eine Gewichtung der Verzweigungen, die im späteren Konzept die zeitlichen Aufwände zur Lösung der Verbindung charakterisieren.

Für das weitere Vorgehen wird der AND/OR Graph als Darstellungsart aller Demontagesequenzen und der zugehörigen Baugruppen und Bauteile gewählt.

8.5 Entwicklung einer Datenstruktur zur Recyclingprozeßanalyse

Ziel der folgenden Entwicklungen ist es, die im Recyclinggraphen erfaßte Produktstruktur in einen Hypergraphen zu transformieren, der im weiteren zur ökonomischen Bewertung der Recyclingfähigkeit durch eine Recyclingprozeßsimulation herangezogen werden kann.

8.5.1 Ablaufstruktur zur Transformation eines Recyclinggraphen in einen AND/OR-Graphen

Die Transformation eines Recyclinggraphen in einen AND/OR Graphen wird durch die Suche nach allen in einem Schritt lösbaren Verbindungen eingeleitet. Lösbare Verbindungen sind alle, denen keine Vorgängerverbindungen zugewiesen wurden. Der Ausgangs-Recyclinggraph wird durch Öffnen jedes der gefundenen Elemente in mehrere Teilgraphen aufgeteilt, bis eine weitere Aufteilung nicht mehr möglich ist (Einzelteile). Die Bearbeitung der Teilgraphen erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt nach der gleichen Methode. Dort werden dann auch Verbindungen geöffnet, deren Vorgängerverbindungen schon in vorangegangenen Schritten gelöst wurden. Die Lösbarkeitsanalyse jeder Verbindung setzt eine Untersuchung aller ihrer Vorgänger-Verbindungen voraus. Dies können mehrere, meist disjunkte Mengen sein, nach denen der Graph abzusuchen ist. Eine Verbindung kann nur dann geöffnet werden, wenn alle Elemente mindestens einer dieser Mengen nicht mehr im Graph enthalten sind. Wird demgegenüber ein einziges Element gefunden, so gilt die ganze Vorgängerverbindung als existent. In diesem Fall folgt die Untersuchung der nächsten Menge. Eine zu öffnende Verbindung wird aus dem Graphen gelöscht, wodurch dieser in mehrere Untergraphen zerfällt, die Ausgangspunkt weiterer Analysen sind.

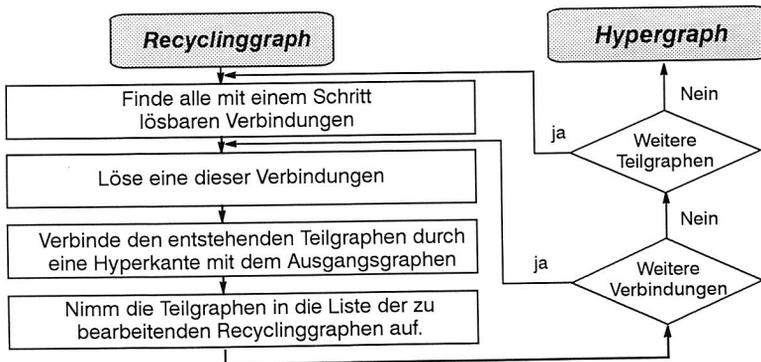


Bild 97: Algorithmus zur Transformation von Recyclinggraphen in AND/OR-Graphen

Der zweite Schritt ordnet jeder der geöffneten Verbindungen eine Hyperkante zu, die den Ausgangsgraph mit den jeweiligen Teilgraphen verbindet. Auf diese Weise erhält man in jedem Durchlauf des Algorithmus einen Knoten des AND/OR-Graphen, der mit seinen Nachfolgerknoten verbunden ist. Vorher muß aber überprüft werden, ob der jeweilige Teil-

graph schon einmal erzeugt wurde. Dies ist der Fall, wenn verschiedene Demontageoperationen zum gleichen Zustand führen. Der Teilgraph wird, falls er neu auftritt, in die Liste der noch zu bearbeitenden Untergraphen aufgenommen, die im Rahmen späterer Durchläufe untersucht werden müssen. Der Algorithmus endet erst, wenn die Liste keine weiter zu unterteilenden Recyclinggraphen enthält. Existiert ein Teilgraph bereits aus früheren Durchläufen, so wird dieser für die weitere Verarbeitung herangezogen. Dadurch kann verhindert werden, daß in dem späteren AND/OR–Graphen zwei unterschiedliche Kanten existieren, die dieselben Bauteilkombinationen darstellen. In Bild 97 wird die Ablaufstruktur nochmals wiedergegeben.

8.5.2 Abbildung aller Demontagepfade in einer Datenstruktur

Um alle Demontagekombinationen (im folgenden auch als Traces bezeichnet) zu generieren, muß der AND/OR–Graph in Unterbäume zerlegt werden. Jede Kombination läßt sich als ein am Wurzelbaum beginnender Unterbaum in einer eigenen Datenstruktur darstellen. Eine Trace beinhaltet ein oder mehrere Elemente, wobei einzelne Bauteile oder Baugruppen als Elemente auftreten können.

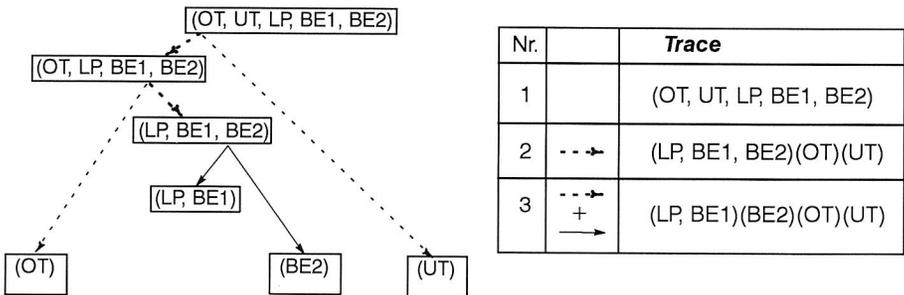


Bild 98: Ableiten von Demontagesequenzen (Traces) aus dem Hypergraph am Beispiel des Modellprodukts (exemplarisch)

Die kleinstmögliche Baumstruktur ist der Anfangsknoten des AND/OR–Graphen. Er ist ein Unterbaum der Größe 0, der das zu bearbeitende Produkt in dessen Urzustand beläßt. Ausgehend von diesem Punkt werden nun alle nächstgrößeren Bäume erzeugt. Man fährt die einzelnen Demontagebäume ab und notiert sich dabei, welche Hyperkanten jeder Baum beinhaltet. Diese Kanten werden dann den ihnen entsprechenden Demontageschritten zugeordnet. Wichtig dabei ist, redundante Demontagebäume auszuschließen. Dies geschieht durch einen kontinuierlichen Vergleich mit den Elementen einer Liste aller Kombinationen. Bild 98 zeigt einige Demontagekombinationen für ein einfaches Modellprodukt.

8.6 Aufbau eines Datenmodells zur Abbildung von Recyclingprozessen

In /65/ wird die Möglichkeit angedeutet, die Knoten des AND/OR Graphen unterschiedlichen Aufarbeitungs- und Aufbereitungsprozessen zuzuweisen. Um eine automatisierte

Identifizierung der günstigsten Zuordnungen für den Knoten zu erhalten, wird vorgeschlagen, alle Recyclingprozesse und nachfolgenden Rückgewinnungsebenen durch eine einheitliche Formatvorlage (Template) zu beschreiben. Jedes Template ist gekennzeichnet durch:

- Eingangsrestriktionen,
- Prozeßaufwände und
- Transformationsfunktionen.

In /21, 22/ wird von Meedt ein ähnliches Vorgehen vorgeschlagen. Dort sollen Prozesse auch mit Eingangsrestriktionen beschrieben werden, wobei dann aber nur eine Zuweisung zu den Prozeßaufwänden erfolgt. Der vorgesehene Einsatz dieser Methode, die ebenfalls auf dem Recyclinggrapheditor basiert, ist eher in der Demontageplanung zu finden, wo tatsächlich nur die Möglichkeit einer Nutzung des vorgesehenen Recyclingprozesses sowie dessen Kosten interessant sind.

Im Rahmen dieser Arbeit soll zur Beschreibung der Recyclingprozesse der Ansatz von Kriwet aufgenommen, weiterentwickelt und am Beispiel der Elektronik überprüft werden.

8.6.1 Systematische, rechnerverarbeitbare Beschreibung von Recyclingprozessen

Jeder Recycling- bzw. Entsorgungsprozeß ist durch einen oder mehrere Input- und verschiedene Outputströme charakterisiert. Prinzipiell lassen sich Inputströme durch die Materialzusammensetzung (Metalle, Nichtmetalle und sonstige Stoffe) sowie nach den Bauteiltypen klassifizieren.

Der Recyclingprozeß verarbeitet nur Materialien, die bestimmten Eingangsrestriktionen gehorchen. Falls für ein Materialgemisch die Restriktionen eingehalten werden, wird das Material umgesetzt und in Outputströme umgewandelt. Dazu sind Prozeßaufwände zu betreiben, die sich z.B. nach Kosten und Energieverbrauch quantifizieren lassen. Die Übertragungsfunktionen entsprechen den Recyclingquoten aus Kap. 3, Tabelle 6. In Bild 99 ist das Darstellungsprinzip am Beispiel der Kupferschmelze nochmals beschrieben.

Das Aufstellen realitätsgetreuer Abbilder von Recyclingprozessen bedarf erheblicher Detailkenntnisse, wie sie in der Regel nur in den Firmen selbst vorliegen. Die Integration von Prozeßingenieuren der Verwertungsbetriebe ist, um die zentrale Prozeßdatenbasis aufzubauen, unabdingbar. Die Beschreibung eines Recyclingprozesses setzt sich wie folgt zusammen:

- Aus einem *Eingabefilter*, der durch Minimal- und Maximalangaben definierter Stoffe oder Materialgemische beschrieben wird und durch den Ausschluß bestimmter Bauelemente bzw. Bauelementklassen ergänzt werden kann.
- Die *Masseausbringungsfunktion* R_m /5/ gibt an, welcher Masseanteil des Aufgabeguts in einem beliebigen Produkt ausgebracht (d.h. zurückgewonnen) wird. Dabei gilt:

$$R_m(x_1) = \frac{x_1}{x_0} * 100 \%$$

mit: x_0 : Gesamte Masse des Stoffes x
 x_1 : Ausbringung des Stoffes x

- Die zugeordneten ökonomischen Aufwände und Gewinne sowie der Energieverbrauch während des Verfahrens umreißen das ökonomische und ökologische Verhalten des Prozesses.

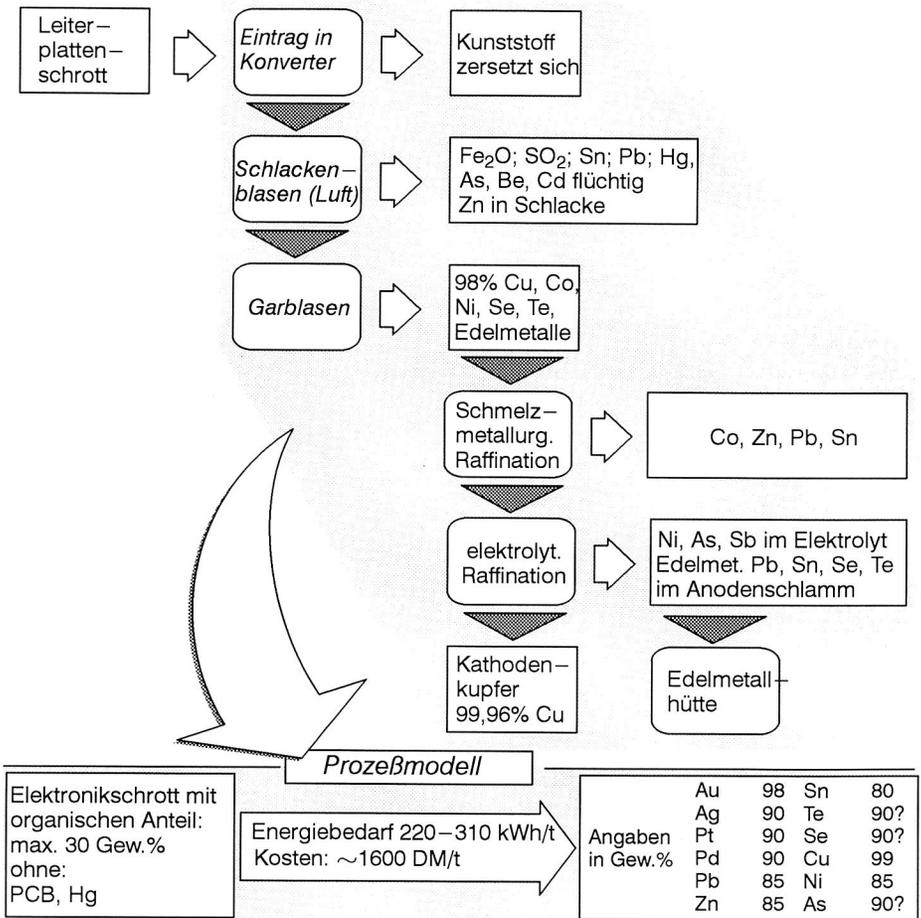


Bild 99: Metallurgische Verfahren einer Kupferhütte [93, 159]

8.6.2 Erzeugen von Hypergraphstrukturen und Berücksichtigung von Recyclingprozessen

Der in Kap. 8.4 vorgestellte Hypergraph bildet im Rahmen dieser Entwicklungen nur die technisch möglichen Demontageoperationen ab. Um die Recyclingprozesssimulation in den Hypergraphen zu integrieren, muß dieses Modell erweitert werden. Dies geschieht durch das

Hinzufügen von weiteren Kanten, die jeweils die Verarbeitung eines Materialgemisches (Bauteile, Baugruppen) durch einen Recyclingprozeß repräsentieren. Die entstandenen Knoten bestimmen sich durch die Outputfraktionen des jeweiligen Prozesses.

Da im Recycling oft auch verkettete Prozesse Anwendung finden können, sind die entstandenen Outputfraktionen wiederum als Inputfraktionen für weitere Recyclingprozeßanalysen zu betrachten. Ein Abbruchkriterium ist gefunden, falls:

- ein marktfähiges Materialgemisch erzeugt wurde,
- keine Prozesse mehr vorliegen und somit nur noch
- die Entsorgung als letzte Möglichkeit verbleibt. Dabei ist jedoch zu prüfen, in welche Abfallklasse (und damit Kosten) das Materialgemisch einzuordnen ist.

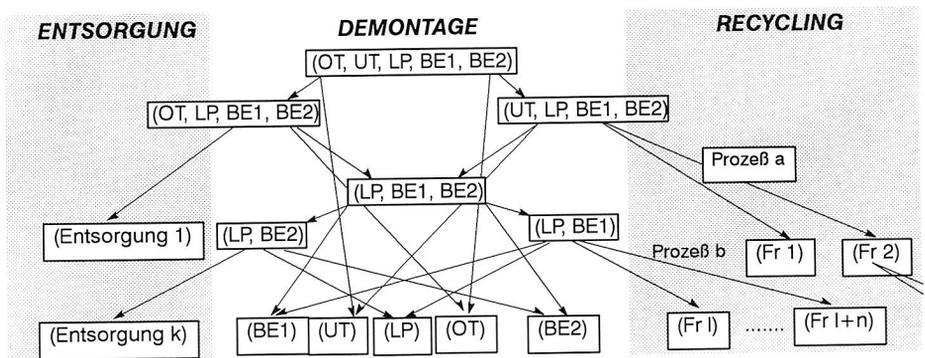


Bild 100: Erweiterung des Demontagehypergraphen um Kanten, die Recycling- und Entsorgungsprozesse symbolisieren (Kanten exemplarisch eingezeichnet)

Der Algorithmus zur Ableitung von Hyperstrukturen die auch für Recyclingprozesse gelten folgt dem folgendem Ablauf. Im ersten Schritt wird aus dem Demontagehypergraphen eine Liste aller Knoten, beginnend mit den Einzelbauteilen bis hin zum komplexen Produkt, erzeugt. Bauteil 1 wird dann auf dessen Verwertungsmöglichkeiten durch Prozeß 1 überprüft. Dies geschieht durch einen Abgleich der Prozeßrestriktionen mit den Bauteilattributen. Falls dies nicht möglich ist, entsteht ein entsprechender Verweis, der die spätere Anwendung des Prozesses auf Baugruppen, die das ausgeschlossene Bauteil beinhalten, unterbinden. Dies führt zu einer erheblichen Reduktion des Berechnungsaufwands. Falls der Prozeß jedoch anwendbar ist, werden mit Hilfe der Massenausbringungsfunktion die Outputfraktionen berechnet, die als neue Materialgemische in die Liste aller Knoten des Demontagegraphen aufgenommen und in einem späteren Durchlauf des Prozeßsimulators berechnet werden. Falls jedoch die Outputmaterialien als Reinform einen realen Materialerlös/kosten erzeugen, wird der ökonomische Wert, die wiedergewonnene Rezyklatmasse sowie das Resource Recovery Potential berechnet, gespeichert und die Prozeßkette als abge-

geschlossen betrachtet. In identischer Weise wird die gesamte Knotenliste, die jetzt aus Bauteilen, Baugruppen und Materialfraktionen besteht, mit jedem Prozeß aufgearbeitet.

Während des Abarbeitens der Bauteil- und Materialgemische wird eine zweite Traceliste aufgebaut, die in ähnlicher Weise wie bei Demontageprozessen die Fraktionierung und die Prozeßnamen speichert. Falls zwei oder mehrere Prozesse auf ein Bauteil bzw. eine -gruppe oder Fraktion anwendbar sind, muß die bis dahin erzeugte Trace kopiert und eine neue Recyclingtrace aufgebaut werden. Nachdem alle Traces aufgebaut wurden, können Aufwände und Erlöse sowie die Gesamtverwertungsquoten der Prozeßkette bestimmt werden. Den Bauteilen und Baugruppen können damit reduzierte Datensätze zur weiteren Verarbeitung in den Demontagetrces zur Verfügung gestellt werden.

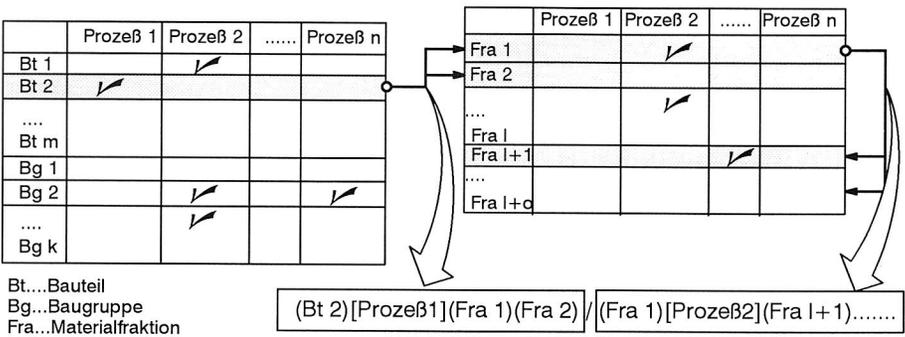


Bild 101: Ableiten von Tracelisten für Recyclingprozeßketten

Die Demontagetrces werden dann mit den Recyclingprozeßtraces kombiniert, indem an die Bauteile bzw. Baugruppen einer Demontagetrces alle passenden Recyclingtraces bzw. deren reduziertes Ergebnis angeknüpft werden. Es wird dabei für jedes Bauteil der entsprechende Kostenfaktor zugewiesen und mit dem Demontageaufwand verrechnet. Entsprechend wird auch mit den Verwertungsquoten verfahren, die zu einer Gesamtverwertungsquote umgerechnet werden. Es ist ohne weiteres möglich weitere Kennzahlen wie das Ressource Recovery Potential (siehe auch Kap. 2.2), Deponieraumverbrauch etc. aus dem vorliegenden Datensatz zu bestimmen.

Im Unterschied zu den in Kap. 7 beschriebenen Entwicklungen ist die Kostenberechnung dynamisch. Dem Prozeßoutput wird nicht ein finaler Zustand zugewiesen, er steht vielmehr für weitere Recyclingprozesse (aber auch Entsorgungsprozesse) zur Verfügung. Die damit sehr freie Simulation des Recyclingszenarios sucht sich rekursiv für jeden Knoten aller Demontagekombinationen geeignete Recyclingpfade. Damit wird eine vollständige Analyse des gesamten Produkts und die Bestimmung aller dazugehörigen Demontage- und Recyclingpfade ermöglicht und die Aufwände sowie die Wiedergewinnungsquote bestimmt.

8.7 Programmierumgebung und Implementierung der DfR–Analysesoftware 'Recycling Graph Editor' (REGRED)

Die Realisierung des im folgenden dargestellten Editors und der zur Verfügung stehenden Analysewerkzeuge erfolgte unter Nutzung der Standardprogrammiersprache C bzw. C++, der C++ Klassenbibliothek InterViews 3.1 /66/, einem an der Universität Stanford entwickelten Toolkit zur Generierung interaktiver graphischer Oberflächen und der darauf aufbauenden Rahmenbibliothek zur Gestaltung 'Graphical Objekt Editors', Unidraw /165/.

Als Kernfunktionalitäten der konzeptionell erarbeiteten Produktbewertung sind die Aufgaben der Produktmodellierung, Recyclingprozeßmodellierung und der Berechnung bzw. Ergebnisdarstellung zu bezeichnen. Dieser Aufgabenteilung folgend wird in den nächsten Unterkapiteln die prototypenhafte Realisierung der einzelnen Funktionalitäten dargestellt.

8.7.1 Recyclingorientierter Produkteditor REGRED

Wie in Kap. 8.2 detailliert erläutert, stellt sich ein Produkt durch Bauteile (Ellipsen), Verbindungen (Kreise) und Baugruppen (große Ellipsen) dar. Die Querbeziehungen zwischen Bauteil und Verbindung wird durch Linien symbolisiert. Bauteile und Verbindungen sind im einzelnen durch spezifische Attribute zu ergänzen. Um den Bearbeiter einer Bewertungsaufgabe bei der Produktmodellierung effektiv zu unterstützen, wurde in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Universität Erlangen/Nürnberg der Editor REGRED entwickelt.

In Bild 102 ist die Präsentationsoberfläche dargestellt. Sie läßt sich in vier funktionale Teilbereiche untergliedern:

- Der Viewer ist die Arbeitsoberfläche des Editors, auf dem der Recyclinggraph visualisiert wird.
- Der Panner ist ein Werkzeug zur Manipulierung des Viewers. Mit ihm kann die Arbeitsfläche als Teilausschnitt über einen größeren virtuellen Bereich verschoben werden. Des weiteren können die Elemente durch Zoompeile vergrößert und verkleinert werden.
- Die Toolpalette ist eine Schaltfläche zur Wahl der auszuführenden Arbeitsschritte. Als Werkzeuge werden Verknüpfungs-, Selektions-, Bewegungs- und Skalierungsoperationen (direkte Operationen) angeboten.
- Die Menüleisten stellen dem Anwender verschiedene Funktionen zur Verfügung. Dabei wurde in dateispezifische Kommandos (z.B. Speicher, Laden, Drucken oder auch das Erstellen von Listen), elementspezifische Befehle, Funktionen zur Gruppenbildung und zur Einstellung des jeweiligen Arbeitsmodus (Layout-, View-, Editmodus) unterschieden.

REGRED besitzt drei unterschiedliche Arbeitsmodi:

- Im Layoutmodus kann der Anwender Recyclinggraphen grafisch bearbeiten. Über die Schaltflächen der Toolpalette können mit Hilfe der Maus Elemente erzeugt, verknüpft, selektiert und verschoben werden.

- Im Editmodus kann der Anwender zu jeder Komponente die entsprechenden Informationen eintragen. Dazu werden verschiedene Dialogfenster zur Verfügung gestellt (Bild 102). Die Attribute für Bauteile und Verbindungen können dem hergeleiteten Produktmodell entnommen werden. In den Verbindungsattributen werden weiterhin die demontageprozessorientierten Attribute Demontagezeit und jeweiliger Stundensatz erfasst.
- Der Viewmodus ermöglicht es, die bereits eingetragenen Daten jeder Komponente zu überschauen.

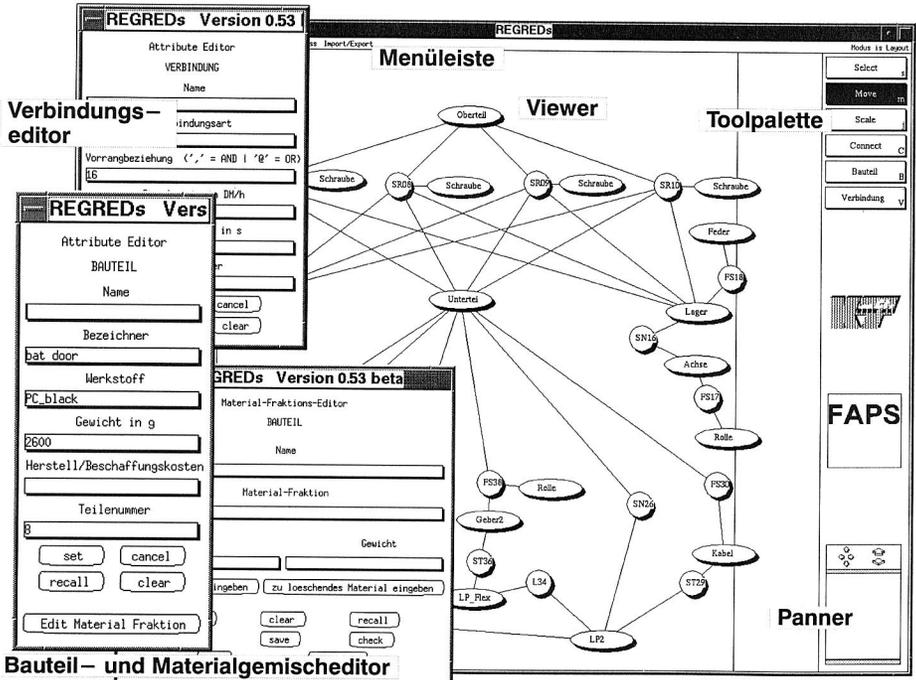


Bild 102: Oberfläche zum Editieren von Produkten mit den zugehörigen Fenstern zur Erfassung von Verbindungs- und Bauteilattributen sowie zur Beschreibung von Stoffgemischen

8.7.2 Modellieren von Recyclingprozessen im Prozeßsimulator

In der Menüleiste des Recycling Graph Editors werden dem Benutzer Funktionen zum Laden von Prozeßlisten, der gezielten Auswahl von Prozessen und dem Editieren von Prozessen angeboten. Bild 103 zeigt die Menüleiste sowie das Prozeßeditorfenster. Dieses gliedert sich nach den in Kap. 8.6 hergeleiteten Template in die Gruppen:

- Beschreibung des Inputfilters für nichtmetallische, metallische, sonstige Stoffe, welche sich aus zulässigen bzw. minimalen Gewichtsanteilen sowie eine Liste der ausgeschlossenen Bauteilen zusammensetzt.
- Beschreibung der Prozeßaufwände und des Prozeßablaufs.
- Beschreibung der Transformationsfunktion, die die Umwandlung des Materialinputs in die jeweiligen Prozeßoutputfraktionen angibt.

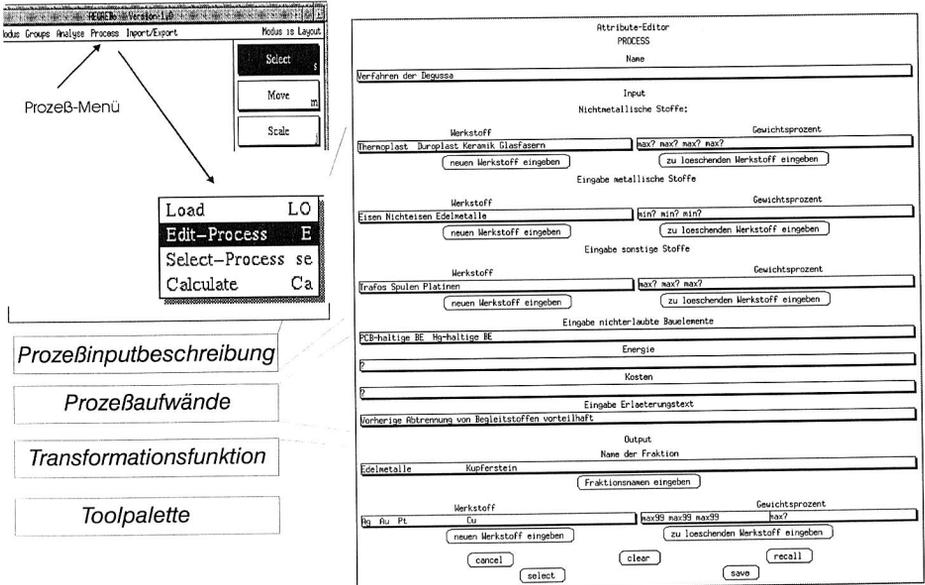


Bild 103: Oberfläche zum Editieren von Recyclingprozessen

8.7.3 Durchführung eines Analyseablaufs mit REGRED und dem Prozeßsimulator

Der Bewertungsablauf eines Produkts mit REGRED und dem Prozeßsimulator soll an einem Produktbeispiel dargestellt werden. Ziel der Berechnung ist es, die wirtschaftliche Demontageiefe, die benötigten Demontageprozesse und die anfallenden Materialfraktionen zu bestimmen. Als Beispielprodukt wurde ein Pager der Fa. Motorola GmbH ausgewählt. Er ist in Bild 104 in einer Explosionszeichnung dargestellt. Anhand einer Probedemontage und technischer Zeichnungen wurde das Produkt analysiert und in REGRED modelliert. Eine vereinfachte Produktstruktur ist in Bild 104 dargestellt. Der Pager besteht grundlegend aus zwei Gehäuseteilen, die mit zwei Schrauben gefügt sind, einem Batteriefach incl. Batterie, das vorab geöffnet werden muß, zweier Leiterplatten, die mit einem Stecker verbunden sind und als Paket im Formschluß ins Gehäuse gefügt sind, sowie einiger weiterer Kunststoff-

teile, die sich beim Öffnen des Gehäuses lösen. Das gesamte Produkt ist in einen Holster eingelegt, den der Benutzer am Gürtel oder Hosenbund befestigen kann.

Nachdem Produktstruktur und Attribute editiert wurden, kann an die Prozeßauswahl gegangen werden. Dabei werden beispielsweise die Prozesse Kunststoffrecycling, Kupferhütte und Deponie ausgewählt. Die Analyse wird durch das Betätigen der 'Calculate'-Funktion ausgelöst.

Als Ergebnis der Analyse wird eine Demontage- und Entsorgungssequenz berechnet. Der Pager ist danach aus dem Holster zu entnehmen, das Batteriefach zu öffnen und die Batterie zu lösen. Der verbleibende Rest soll als Materialgemisch im Elektronikschrott entsorgt werden. Als sortenreine Materialfraktion wird der Batteriefachdeckel gewonnen, der Holster ist ein Metall-Kunststoffgemisch, welches jedoch gut aufgearbeitet werden kann. Die Batterie wird deponiert und der restliche Pager mit Hilfe mechanischer Trennverfahren verarbeitet.

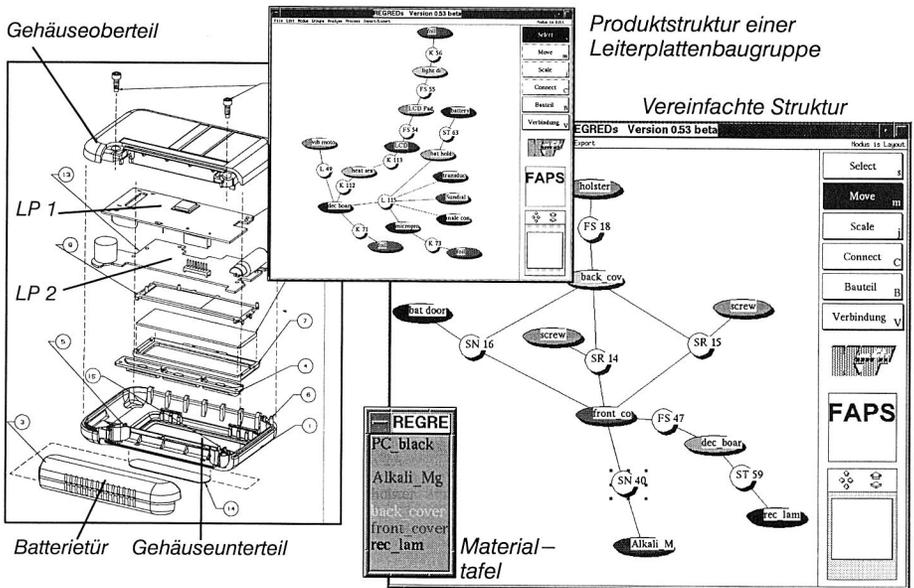


Bild 104: Explosionszeichnung eines Modellprodukts und dessen Produktstruktur in REGRED

8.7.4 Gezielte Produktoptimierung am Beispielprodukt

Die vorgestellte Methodik hat zum Ziel, dem Konstrukteur die Auswirkungen seiner Konstruktion im Recycling zu verdeutlichen. Aus den Analyseergebnissen des Beispielprodukts geht hervor, daß die erreichbare Recyclingquote eher gering, der Abfallanteil jedoch um so größer sein wird. Das Recycling des Produkts wird Geld kosten, wobei die durch REGRED

berechnete Summe wegen der starken regionalen und zeitlichen Schwankungen auf den Wertstoffmärkten nur als Richtgröße zu betrachten ist.

Um die Konstruktion zu verbessern, muß im nächsten Schritt das Kernproblem der Konstruktion im Design for Recycling herausgearbeitet werden. In einer weiteren Analyse des Beispielprodukts wird deutlich, daß das Öffnen des Gehäuses nicht kosteneffizient sein wird. Die Gründe dafür sind:

- der Demontageprozeß ist zu zeitaufwendig.
- die herauslösbaren Materialgemische haben zu geringen Wert.

Um dies zu verbessern, stehen dem Produktgestalter Gestaltungsrichtlinien, wie sie z.B. in Kap. 7 am Beispiel der Elektronik entworfen wurden, zur Verfügung. Am Produktbeispiel wird deutlich, daß die Verbesserung der Recyclingfähigkeit durch die Änderung der Verbindungstechnik ermöglicht wird. Um herauszufinden, ab welchen Demontagezeiten das Öffnen der Gehäuse effizient wird, kann mit Hilfe von REGRED die Verbindung im Modell so verändert werden, daß als Ergebnis die zu erzielende Demontagezeit bestimmt wird. Ähnlich kann auch mit den Gehäusewerkstoffen verfahren werden. Durch das Abändern einzelner Attribute wird der Punkt herausgefiltert, an welchem sich das Demontageverhalten ändert und die Recyclingquote sich verbessert.

Am Beispiel des Modellprodukts werden drei konstruktive Verbesserungen vorgeschlagen:

- die Gehäuse und der Holster werden materialkompatibel gestaltet.
- die Demontagezeit zum Öffnen der Batterietür wird reduziert.
- die Demontagezeit zum Öffnen der Gehäuseschalen wird reduziert.

Die Änderungen wurden im REGRED-Produktmodell eingearbeitet und eine erneute Berechnung gestartet. Durch die vorgeschlagenen konzeptionellen Änderungen wurde eine Reduktion der Gesamtkosten auf 15% prognostiziert.

Weiteres Optimierungspotential kann bei der Auswahl der Substratmaterialien und beim Aufbau der Schaltung gefunden werden. Analysen mit REGRED weisen nach, daß die Wahl von flexiblen Materialien bei identischem Produktaufbau die Recyclingkosten um weitere 4% reduziert. Durch eine Zusammenführung der zwei Leiterplatten zu einem flexiblen Schaltungsträger können die Kosten nur unwesentlich reduziert werden. Eine Leiterplattenvollmontage wird ebenfalls keine wesentlichen ökonomischen Verbesserungen bringen.

Die durchgeführten Untersuchungen weisen nach, daß REGRED als Bewertungstool zur Unterstützung von Entscheidungen in der Konstruktion geeignet ist. Das System bietet die Möglichkeit, Produkte einfach darzustellen und gezielt zu verändern. Eine Berechnung von Szenarien wird dadurch ermöglicht. Durch die Auswahl nur eines Prozesses kann REGRED auch zur Anpassung einzelner Baugruppen oder eines gesamten Produkts an diesen Prozeß benutzt werden. REGRED zeigt die Fehlstoffe der Materialauswahl auf, die der Konstrukteur im Detail ändern sollte. Der Pager könnte beispielhaft als kupferschmelzefähiges Produkt gestaltet werden. Es soll jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß Recyclingquoten und die Ressourceneffizienz durch solche Einprozeßlösungen gering sein werden.

9. Zusammenfassung

Deutschlands gegenwärtiges Abfallwirtschaftssystem beruht primär auf dem Prinzip der finalen Entsorgung ausgedienter Wirtschaftsgüter in Müllverbrennungsanlagen oder auf Deponien. Die bis heute gebräuchlichen Entsorgungswege implizieren erhebliche ökologische Probleme und verursachen eine gesellschaftliche Polarisierung, die eine nationales Umdenken im Abfallrecht ausgelöst hat. Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) ist am 7. Oktober 1996 in Kraft getreten und definiert industrielle Stoffflüsse als Kreisläufe. Obwohl durch fehlende konkretisierende Verordnungen in den einzelnen Produktbereichen bis heute kein primärer Zwang zum Umbau des Wirtschaftssystems aus dem Gesetz vorliegt, sind jedoch richtungsweisende Impulse zum Aufbau eines industriellen Kreislaufwirtschaftssystems abzuleiten.

Die stetige Miniaturisierung elektronischer Baugruppen ermöglicht die Realisierung zunehmend komplexer Funktionen und führt zu einer wachsenden Durchdringung unseres Umfelds mit Elektronik. Durch verkürzte Innovationszyklen elektronischer Produkte sinkt deren reale Nutzungsdauer. Diese Strömungen verursachen ein erhöhtes Abfallaufkommen ungenutzter elektronischer Produkte, die bis heute in den Haushalten 'gespeichert' oder durch den Hausmüll entsorgt werden. Im Rahmen der angestrebten wirtschaftlichen Umstrukturierung der Entsorgungssysteme elektronischer Produkte in Stoffkreisläufe muß deshalb vornehmlich die elektronische Baugruppe auf deren Kreislaufwirtschaftsfähigkeit überprüft werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, methodische und technologische Lösungen zu entwickeln, die es ermöglichen, industrielle Kreisläufe zu analysieren, zu bewerten und zu optimieren. Die methodischen Ansätze und technologischen Entwicklungen wurden am Beispiel bestückter Schaltungsträger erarbeitet.

Ausgangspunkt der Arbeit war die technologische und materialorientierte Analyse der Komponenten elektronischer Schaltungen. Die gewonnene Übersicht ermöglichte eine Abschätzung der ökonomischen (Materialwert, Technologie) und ökologischen (Ressourcenknappheit, Toxikologie) Potentiale elektronischer Flachbaugruppen im Recycling.

Die detaillierte Darstellung und methodische Analyse des Stands der Technik im Recycling von Platinen ermöglichte eine Quantifizierung der unausgeschöpften ökonomischen Potentiale und der ökologischen Risiken. Aufbauend auf vorhandene werkstoffliche Verwertungsprinzipien wurde ein Recyclingsystem konzipiert, welches erhebliche Beiträge leistet, die ungenutzten Wertstoffpotentiale auszuschöpfen und gleichzeitig ökologische Verbesserungen zu ermöglichen. Kernprozeß dieser neuen Recyclingkette ist die automatisierte Demontage elektronischer Baugruppen mit dem Ziel der schonenden Separierung wiederverwendbarer und gefahrstoffhaltiger Bauelemente und der anschließenden Klassifikation des verbleibenden Leiterplattenschrotts zu Materialfraktionen. In einem detaillierten Konzept wurde Anlagenstruktur sowie die Anforderungsprofile selektiv bzw. simultan entstückender Prozesse definiert.

Die selektive Demontage beruht auf einem Sensor- und Softwaresystem zur Erkennung wiederverwendbarer Bauelemente. Die durch Triangulationsverfahren gewonnenen Leiterplattenabbilder werden mit Hilfe eines Parsers zur Analyse von Strukturgrammatiken verarbeitet, welcher als Ergebnis die Typenbezeichnung der interessanten Bauelemente, deren Koordinaten und deren Orientierung bestimmt. Die Daten werden an eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte mechanische Demontageeinheit übergeben. Der Aufbau des Entstückers beruht auf einem vierachsigen Handhabungssystem, welches es erlaubt, die integrierten Heißgas/Vakuumdüsen, die mit Hilfe eines Werkzeugspeichers nach Bedarf zur Verfügung gestellt werden, über dem zu separierenden Bauelement zu positionieren. Das Werkzeug wird dann in Eingriff gebracht, durch das ausströmende Heißgas die Lötstellen aufgeschmolzen und das Bauelement von der Leiterplatte abgehoben.

Aufgabe der simultanen Demontageeinheit ist es, die Leiterplatte vollständig zu evakuieren und das erzeugte Haufwerk elektronischer Bauelemente recyclingprozeßbezogenen Materialfraktionen zuzuordnen. Mangels simultaner Entstückprozesse wurden auf Basis ingenieurwissenschaftlicher Methoden Demontageprinzipien systematisch hergeleitet, analysiert und exemplarisch entwickelt. Zur Klassifikation der entstückten und vereinzelt Bauelemente wurde ein Sensoraufbau realisiert, der eindimensionale Spannungssignale zur Musterklassifikation erzeugt. Ein realisiertes Softwaresystem ermöglicht es, die Meßsignale einzelner Bauelemente in methodisch ausgewählte Merkmalvektoren zu transformieren und diese mit Hilfe eines Neuronalen Netzes zur Zuordnung der Bauelemente zu Materialfraktionen zu nutzen.

Durch den Einsatz der entwickelten automatisierten Demontagesysteme im industriellen Recyclingsystem elektronischer Baugruppen können große Teile ungenutzter Wertschöpfungspotentiale durch die erweiterte Bauteilverwendung und -verwertung mobilisiert werden. Zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten bestehen nur unter Berücksichtigung von recyclingbezogenen Gestaltungsregeln während der Konstruktion.

Aus diesem Grund wurden im Verlauf der weiteren Arbeit auf Basis der Recyclingkreisläufe Regeln zum 'Design for Recycling' hergeleitet. Ihre Umsetzung im Produkt erfordert aus Gründen der Komplexität der Analysen, der auftretenden Datenvolumina und des Verknüpfungsgrads der Gestaltungsregeln rechnerunterstützte Hilfsmittel. Es wurden im folgenden die aus der Literatur bekannten Bewertungssysteme analysiert, deren Schwachstellen herausgearbeitet und darauf aufbauend ein Pflichtenheft zur Entwicklung eines optimierten rechnerunterstützten Systems zur Bewertung der Recyclinggerechtigkeit elektronischer Produkte hergeleitet.

Darauf aufbauend wurde im folgenden ein Softwaresystem (Recycling Graph Editor, RE-GRED) entwickelt und prototypisch realisiert, welches es erlaubt, den Produktaufbau im Rahmen der Gesamtkonstruktion unter Berücksichtigung recyclingorientierten Rahmenbedingungen mit Hilfe ökonomischer Kennzahlen zu bewerten. In einer Benutzeroberfläche kann der Produktgestalter sein Produkt als abstrakte Netzstruktur von Bauteilen und Verbindungen abbilden und recyclingrelevante Produktdaten erfassen. Der Bewertungsalgorithmus transformiert den durch Vorrangbeziehungen teilgerichteten Graphen in einen AND/OR Graphen, der es ermöglicht alle technisch realisierbaren Demontagesequenzen und die

dabei erzeugten Materialgemische abzuleiten. In weiteren Analysen wird deren Recyclingfähigkeit auf Basis ökonomischer und ökologischer Kriterien untersucht. Dazu stehen eine Reihe von Recyclingprozeß–Templates zur Verfügung, die die Verarbeitbarkeit definierter Materialfraktion bewerten und Aussagen über Recyclingkosten bzw. –erlöse und wiedergewonnene Ressourcen ermöglichen. An einem Produktbeispiel wurde die Leistungsfähigkeit des Bewertungssystems nachgewiesen, indem die ökonomischen Auswirkungen verschiedener konstruktiver Änderungen miteinander verglichen wurden.

10. Literaturverzeichnis

1. Alting, L.: Sustainable industrial production – environmental issues in product development. Proceedings of the IFIP WG 5.3 international conference on life–cycle modelling for innovative products and processes at Berlin, Chapman & Hall, London 1995.
2. Ammer, E.–D.: Rechnerunterstützte Planung von Montageableufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung Dissertation, Universität Stuttgart, 1984.
3. Angerer, G.; Bätcher, K.; Bars, P.: Verwertung von Elektronikschrott. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1993.
4. Beitz, W.: Design for ease of recycling. Prolamat Berlin 1995.
5. Bilitewski, G.; Härdtle, G.; Marek, K.: Abfallwirtschaft. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, New York, u.a., 1994.
6. Bourjault, A.: Contribution a une approach methodologique de l'assemblage automatise: Elaboration automatique des sequences operatoires. Universite de Franche–Comte, Besancon, France 1994.
7. Brand, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen. Meisenbach Verlag, Bamberg 1997.
8. Bringham, E.O.: FFT – Schnelle Fourier–Transformation. Oldenburg Verlag, München 1982.
9. Brinkmann, W.; Ehrenstein, G.; Steinhilper, R.: Recyclinggerechte Produktgestaltung – Kap. 7/8.5: Kunststoffe mit Flammenschutzadditiven. WEKA Verlag, Augsburg 1996.
10. Bullinger, H.J.; Warschat, J.; Bopp, M.S.: Methods and tools to support Design for Recycling. Proceedings 2nd CIRP Seminar on Life Cycle Engineering RECY '94, Erlangen, Maisebach Verlag, Bamberg 1994.
11. Bunke, H.: Attributed programmed graph grammars and their application to shematic diagram interpretation. IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence, Band 4 no. 6, 1992.
12. Craig, B.: Lead free solder an update., Electronic Production, 1994.
13. Danzer, B.: Methodenentwicklung zur schnellen Charakterisierung von Elektronikschrott mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse. Dissertation, Universität Erlangen/Nürnberg, 1996.
14. De Fazio, T.L.; Whitney, D.E.: Simplified generation of all mechanical Assembly sequences. IEEE transactions on robotics and automation, Vol. RA–3 no.6, 1987.

-
15. Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung. Dissertation, Springer Verlag, Berlin, New York, 1995.
 16. Dittmayer, S.: Planung von Arbeitsinhalten unter humanitären und technisch-betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten mit Hilfe des Vorranggraphen. Zwf 73, 1978.
 17. Dornhoff, L.; Horn, F.: Applied modern algebra. New York 1978
 18. Ehrenstein, G.W.; Bittmann, E.; Stampfer, F.: Einfluß der Härtingsparameter auf den Aushärtegrad UV-härtender Epoxidharze. Feldmann, K.; Geiger, M.: Produktionssysteme in der Elektronik, Meisenbach Verlag, Bamberg 1995.
 19. Eversheim, W.; Hartmann, M.; Linnhoff, M.: Zukunftsperspektive Demontage – Ganzheitliche Produkt- und Anlagenplanung als Voraussetzung. VDI-Z 134, Nr. 6, VDI-Verlag, Düsseldorf 1992.
 20. Feldmann, K.; Meedt, O.; Meerkamm, H.; Weber, J.: Entwicklung einer CAD-CADis-Verfahrenskette auf Basis recyclingrelevanter Produktkennzeichnung. Umweltinformationssysteme in der Produktion, Metropolis-Verlag, Berlin, 1995.
 21. Feldmann, K.; Meedt, O.: Recycling and disassembly of electronic devices. International conference on life-cycle modelling for innovative products and processes, PROLAMAT'95, Berlin 1995.
 22. Feldmann, K.; Meedt, O.: Innovative tools and systems for efficient disassembly processes. 3rd international seminar on life-cycle-engineering, ECO-Performance'96, Zürich 1996.
 23. Feldmann, K.; Franke, J.: Schaltungsträger in drei Dimensionen. 13th International Electronics Manufacturing Technology Symposium, New York 1992.
 24. Feldmann, K.; Franke, J.: New Requirements and Solutions for Product Data Processing of Three-Dimensional Moulded Interconnection Devices. 13th International Electronics Manufacturing Technology Symposium, New York 1992.
 25. Feldmann, K.; Franke, J.; Luchs, R.: Dritte Dimension. Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger stellen neue Anforderungen an die Konstruktion. Maschinenmarkt 100/29, Vogel Verlag, Würzburg 1994
 26. Feldmann, K.; Franke, J.; Gerhard, M.: Evaluation of Engineering Thermoplastics for Molded Circuit Board Assembly. Plastronics '93, 1993.
 27. Feldmann, K.; Scheller, H.; Langner, M.: Recyclingfreundliche Alternativen zur konventionellen Leiterplatte. Metalloberfläche Heft 12/96, Hanser Verlag, München.

28. Feldmann, K.; Scheller, H.: The printed circuit board, a challenge for automated disassembly and for the environmental conscious product design. Symposium New Technologies for a closed loop materials economy, Karlsruhe 1996.
29. Feldmann, K.; Scheller, H.: Automatisierte Demontage elektronischer Flachbaugruppen. VDI Seminar: Recyclingfähige elektronische Geräte, Erlangen 1996.
30. Feldmann, K.; Scheller, H.; Franke, J.: Platinen: Zerlegen statt wegwerfen. Elektronik Nr. 20, Franzis-Verlag, Poing 1994.
31. Feldmann, K.; Scheller, H.: The printed circuit board – a challenge for automated disassembly and for the design of a recyclable interconnect device. IEE publication nr. 416, Clean Electronics Products and Technology (CONCEPT), Edinburgh 1995.
32. Fiedler, Niemann, Peterson, Schmid, Weierich: Automatische Detektion von Fehlern in Meßreihen on PKW-Testfahrten. Technisches Messen 62, Oldenburg Verlag, München 1995.
33. Flohr, R.: Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT). Dissertation an der Univ. Erlangen, Carl Hanser Verlag, München 1991.
34. Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumlich spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Dissertation an der Univ. Erlangen, Hanser-Verlag, München 1995
35. Friedmann, T.: Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue, rechnerunterstützte Verfahren. Dissertation, Karlsruhe 1989.
36. Gareiß, B.: Technische Kunststoffe mit halogenfreiem Flammenschutz Plastverarbeiter 46 Jhrg., Nr. 6, 1995.
37. Gehrman, F.: Konstruktion und werterhaltendes Recycling niederwertiger technischer Gebrauchsgüter, dargestellt am Beispiel Haushaltskleinmaschinen. Fortschrittsbericht VDI-Reihe 15, Nr. 40, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986.
38. Gerlach, G.; Sorber, J.; Caden, S.; Daniel, D.: The Problem of data storage and handling for selective disassembly processes of electronic scrap. 2nd international seminar on life cycle engineering, RECY '94, Meisenbach Verlag Bamberg 1994.
39. Gilleo, K.: Assembly with conductive adhesives. IPC Review, Vol. 35, No. 10, 1994.

-
40. Ginsberg, G. L.: TAB and flip–chip technology. The Electronics Assembly Handbook. Editor, F. Riley, Springer Verlag, London, 1988.
 41. Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.: Integriertes Produktmodell. Beuth Verlag, Berlin, Wien 1993.
 42. Gustmann, K.: Verwertung und Entsorgung von Elektronikschrott . *UTECH*, Berlin 1994.
 43. Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1990.
 44. Haberäcker, P.: Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen. Hanser Verlag, München 1989.
 45. Harper, C.A.: Handbook of Materials and Processes for Electronics. McGraw–Hill Book Company, New York, Düsseldorf, London, Mexico 1970.
 46. Hartel, M.: Bewertung der Demontagegerechtheit von Produktstrukturen in der Entwurfsphase als Element des Life–Cycle–Designs. UWF 5, 1994.
 47. Herrmann, G.: Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 1–3. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1993.
 48. Hesselbach, J.; Friedrich, R.; Schütte, G.: Automatization in dismantling of printed circuit boards. Recy '94, Meisenbach Verlag, Bamberg 1994.
 49. Homem de Mello, L.; Sanderson, A.C.: AND/OR–Graph representation of assembly plans. IEEE transactions on robotics and automation, Vol.6 no.2, 1990
 50. Homem de Mello, L.; Sanderson, A.C.: A corrcrt and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. IEEE transactions on robotics and automation, Vol.7 no.2, 1991
 51. Hornbogen, E.; Bode, R.; Donner, P.: Recycling, Materialwissenschaftliche Aspekte. Springer Verlag, Berlin, New York, u.a., 1993.
 52. Iji, M.; Yokoyama, S.: Recycling of printed wiring boards mounting electronic components. Proceedings of Printed Circuit World Convention VII, Basel 1996.
 53. Ishii, K.; Marks, M.D.; Eubanks, C.F.; Shriver, M.B.: Life–cycle Design for Recyclability., ICED '94, Amsterdam 1994.
 54. Ishii, K.; Eubanks, C.F.; Marks, M.: Evaluation Methodology for Post–manufacturing issues in Life–Cycle Design. Concurrent Engineering Research and Applications Nr. 1, 1993.

55. Jakob, R.; Melchiorre, M.: *Recycling of electronic scrap.*, Symposium New Technologies for a closed loop materials economy, Karlsruhe 1996.
56. Jovane, F.; et al.: A Key issue in product life cycle: Disassembly. Annals of the CIRP, Keynote paper, Vol. 42/1/1993, Berne, Stuttgart, Hallwag Publishers Ltd., 1993.
57. Jürschig, H.: ept Einpreßtechnik Tcom press Publikation der ept GmbH&Co., Peiting 1990
58. Kaiser, B.: Beiträge zur visuellen Sensorik in der Elektronikfertigung. Dissertation, Technische Universität, Dresden 1994.
59. Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage und Fertigungsautomatisierung. Dissertation, Technische Universität, München 1989.
60. Keimeier, S.: Wiederverwendung – ein alternatives Konzept zur Verwertung von Elektronikschrott. Elektrik-, Elektronikschrott, Datenträgerentsorgung, Springer Verlag, Heidelberg 1995.
61. Klein Wassink, R.J. Weichlöten in der Elektronik Eugen G. Leuze, Saulgau/Württ. 1991.
62. Koellner, W.; Fichtler, W.: Recycling von Elektro- und Elektronikschrott: Einführung in die Wiederverwertung für Industrie, Handel und Gebietskörperschaften. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1996.
63. Kolb, H.: Erkennung von Geräuschmuster mittels neuronaler Netze. Mustererkennung 13. DAGN-Symposium München, Springer Verlag, Berlin 1991.
64. Kreis, W.; Bönker, T.: Closed loop aligned product development and reuse of components of electronic device. Symposium New Technologies for a closed loop materials economy, Karlsruhe 1996.
65. Kriwet, A.: Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung. Forschungsberichte für die Praxis Nr. 163, Carl Hanser Verlag München, Wien 1994.
66. Kürten, T.: INVITING-InterViews tutorial introduction guide for beginners München 1993.
67. Landeck, H.: Konstruktion eines entsorgungsfreundlichen Farbfernsehgerätes der Loewe Opta GmbH. Umweltwirtschaftsforum, Heft 5, 1994.
68. Lawatscheck, J.: Mengen- und Wertbetrachtung der 50 wichtigsten mineralischen Rohstoffe der Welt. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1990.
69. Leers, U.; Brunzel, A.; Hartmann, H.: *SMD, Trends and Technology.* Panasonic Factory Automation Europe, Hamburg 1995.

-
70. Legarth, J.B.: .Disposal of Electronics. Disseration an der Universität Kopenhagen, 1996.
71. Legarth, J.B.; Scheller, H.; Danzer, B.: A new strategy in recycling printed circuit boards. 2nd Seminar on Life Cycle Engineering 'RECY '94', Erlangen (1994), Meisenbach Verlag, Bamberg 1994.
72. Leicht, T.: Automatische Reparatur elektronischer Baugruppen. Dissertation an der Universität Stuttgart, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1994.
73. Lewandowski, D.; Schemmer, M.: Ansätze, Methoden und Hilfsmittel zum Design for Recycling., VDI–Seminar Kreislaufwirtschaftsgesetz: Entwicklung und Demontage recyclingfähiger Elektronikgeräte und Bauteile, Erlangen, VDI–Verlag, Düsseldorf 1995.
74. Löhr, K.: Aufbereitungstechnik, Recycling von Produktionsabfällen und Altprodukten. Hanser Verlag, München, Wien 1995.
75. Loske, R.; Bleischwitz, R.: Zukunftsfähiges Deutschland Ein Beitrag zur global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umweltm Energie für den BUND und MISEREOR, Birkhäuser Verlag, Basel, Bonn, Berlin 1996.
76. Luchs, R.: Application of electrically conductive adhesives in SMT. Proceedings of Adhesives in Electronics '96, Stockholm 1996.
77. Martini, H.: Methoden der Signalverarbeitung. Franzis–Verlag, München 1987.
78. Meerkamm, H.; Bachschuster, S.: Semantisches, relationsbasiertes Produktmodell für Guteile Workshop "Feature Technology in Design and Manufacturing", Spelzenklamm, 1994.
79. Meerkamm, H.; Weber, A.: Konstruktionssystem mfk – Integration von Bauteilsynthese und –analyse. VDI–Tagung "Wissensbasierte Systeme in Entwicklung und Konstruktion", Heidelberg, 1991.
80. Meerkamm, H.: Features als Grundvoraussetzung für integrierte Konstruktions–systeme.Workshop "Feature Technology in Design and Manufacturing", Spelzenklamm 1994.
81. Meerkamm, H.: Design system mfk – an important step towards an engineering workbench. Journal of Engineering Manufacture, p.105–116, ImechE, 1993.
82. Meerkamm, H.; Weber, J.: Methodik der recyclinggerechten Produktgestaltung auf Basis des Recyclinggraphen. Proceedings of thee ICED'95, p.1073ff., Praha, Heurista–Verlag, Zürich, 1995.

83. Meerkamm, H.; Weber, J.: Design for Recyclability – an Analysis Tool in the "Engineering Workbench. Proceedings of the IFIP WG5.3 international conference on life–cycle modelling for innovative products and processes, Chapman&Hall, Berlin, 1996.
84. Meusel, C.: COB auf Leiterplatten – Drahtbonden und seine Alternativen. Seminar 'Technologische Prozesse des Chip–and–Wire' in München, VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik Teltow 1994.
85. Möller, T.: Beitrag zur automatisierten selektiven Entstückung von Leiterplatten. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen 1996.
86. Navin–Chandra, D.: An Overview of the Green Engineering Projekt. Carnegie Mellon University, Pittsburgh 1993.
87. Navin–Chandra, D.: ReStar: A design tool for environmental recovery analysis. Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 93, The Hague, Schriftenreihe WDK 22, Heurista Verlag Zürich 1993.
88. Neubauer, C.: Moderne visuelle Erkennungs vorgänge mit Neuronalen Netzen. Fraunhofer Institut, IIS, Erlangen 1996.
89. Niemann, H.: Methoden der Mustererkennung. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1974.
90. Niemann, H.: Klassifikation von Mustern. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1983.
91. Nitzsche, K.; Ullrich, H.–J.: Funktionswerkstoffe in der Elektrotechnik und Elektronik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart 1993.
92. n.n. Dioxins. A program for research and action. National Swedisch Environmental Protection Board, Information Service, Sweden 1988.
93. n.n. Computerschrott ist umweltfreundlich recyclebar. Norddeutsche Affinerie, Pressemitteilung, Hamburg 1990.
94. n.n.: Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. VDI–Richtlinie 2243, VDI–Verlag, Düsseldorf 1993.
95. n.n.: Insellösung – Neue umweltverträgliche Lamine. Elektronik Praxis, Nr. 17, September 1994.
96. n.n.: Materialbeschreibung VECTRAN. Advanced Film Systems, Hoechst AG, Wiesbaden 1995.
97. n.n. Siemens Nixdorf spart durch ökologisches Denken. Entsorgungs Praxis 1–2/96, Bertelsmann Verlag, Gütersloh 1996.
98. n.n. Umweltbericht 1995. Daimler Benz AG, Stuttgart 1995.

-
99. n.n.: Decree of 25 november 1993 on designation hazardous waste and designation spent oil as waste (Hazardous Waste Designation Decree) Bulletin of Acts, Orders and Decrees of the Kingdom of the Netherlands 617, Den Haag 1993.
100. n.n.; Entwicklung einer automatisierten Anlage für die Entstückung von Flachbaugruppen. SMT – Kolloquium, Institut für Elektronik – Technologie an der TU Dresden 1992
101. n.n.: New laminate material to incorporate LCPs. Electronic packaging & Production Nr. 26, 1996.
102. n.n.: Materialbeschreibung BEND/flex®. Rogers – Mektron n.V., Gent, 1992.
103. n.n. Automated process and assembly inspection by 3D – Vision. Esprit Project 2017 TRIOS.
104. n.n. DIN 8580 Fertigungsverfahren Begriffe und Einteilung (Entwurf) Beuth Verlag, Berlin 1985.
105. n.n. DIN 8591 Fertigungsverfahren Zerlegen (Entwurf). Beuth Verlag, Berlin 1985.
106. n.n. ABW Produktbeschreibung Automatisierte Bildverarbeitung Dr. Wolf, Neuhausen a.d.F. 1995.
107. n.n. Lieferprogramm für Handbuch für DSP, Meßdatenerfassung, Digitale Bildverarbeitung. Data Translation GmbH, Beithem Bis-singen, 1995.
108. n.n. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz; KrW – /AbfG). Drucksache des Deutschen Bundestags, Bonn 1996.
109. n.n.: Vorrichtung zum Auslöten elektronischer Bauteile aus Leiterplatten, Patent Nr. DE 3040274 ERSÄ, Wertheim 1982.
110. n.n.: Produktionsbeschreibung. Heraeus, Hanau 1995.
111. n.n. Verordnung über die Entsorgung von Geräten der Informationstechnik (IT – Geräte – Verordnung, Entwurf vom 20.02.1996 BMU, WA II3 – 30114/8, Bonn 1996
112. n.n. Produktdokumentation Analogsensoren Lichtleitertyp und Reflexionstaster. Baumer electric GmbH, Frauenfeld 1989.
113. n.n.: Materialbeschreibung KERATHERM. Kerafol, 1996.
114. n.n.: Materialbeschreibung DURAVER. Isola, Düren 1995.
115. n.n.: Halogenfrei flammwidrige duroplastische Werkstoffe für die Elektronik.. Abschlußbericht zum BMBF – Projekt 01 ZH 90028, DLR, Bonn 1995.

116. n.n.: Microceramics Technical Specification. Information Coors Ceramic, Golden Colorado 1993.
117. n.n.: Neuro Graph 3.4 – Bedienhandbuch. Lehrstuhl für Programmiersprachen, Universität Erlangen–Nürnberg, 1995.
118. n.n.: Roadmap: Bauelementeentwicklung. Siemens, Regensburg 1995.
119. n.n.: Rubalit–Substrate für Dickfilmtechnologie, gelasert., Information Hoechst CeramTec, Markt Redwitz 1994.
120. n.n.: Dünne Keramik als Ersatz für BeO. Produktinformation curamik electronics, Eschenbach 1991.
121. n.n. SILOET, SMD–Arbeitsplatz, Betriebsanleitung. Siemens, Erlangen 1992.
122. n.n.: DIN 41611, Blatt 5: Lötfreie elektrische Verbindungen: Einpreßverbindungen. DIN Norm, Beuth Verlag, Berlin 1984.
123. n.n.: DIN IEC 48(Sec)334: Lötfreie elektrische Verbindungen: Einpreßverbindungen. DIN Norm, Beuth Verlag, Berlin 1991.
124. n.n.: Entscheidung des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle, 94/904/EG. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, 1994.
125. n.n.: Richtlinie des Rates über gefährliche Abfälle, 91/689/EWG. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, 1991.
126. n.n. Verordnung zur Bestimmung von besonders überwachungsbedürftiger Abfälle (BestbÜAbfV). Bundesgesetzblatt, Bonn 1996.
127. Noetstaller, R.: Industrial minerals, a technical review. International Bank for Reconstruction and Development, Washington 1988.
128. Nolde, R.: Einpresstechnik: Eine praxisnahe Einführung. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ. 1994.
129. Orthmann, K.: Elektrische und mechanische Eigenschaften von Leitklebungen im Vergleich zu Lötungen bei der Leiterplattentechnik. Dissertation, Vogel Fachzeitschriften GmbH, München 1991.
130. Pedersen, S.: 1996 electronics industry environmental roadmap. MCC technical report MCC–ECESM–001–96, MCC, Austin 1996.
131. Pfeifer, T.: Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung. expert Verlag, Ehningen 1993.
132. Prenting, T.O.; Battaglin, R.M.: The precedence diagram, a tool for analysis in assembly line balancing. Journal of industrial engineering 15, 1964.

-
133. Rabiner, L.; Juang, B.H.: Fundamentals of speech recognition. Prentice Hall, New Jersey 1992.
134. Rahn, A.; Diehm, R.; Beske, E.: Blei in der Elektronik–Fertigung. productronic, Nr. 1, 1995.
135. Reihhart, G.; Löffler, T.: Signalklassifikation im Rahmen der akustischen Fügeprozeßüberwachung. Technisches Messen 62, Oldenburg Verlag, München 1995.
136. Richter, R.: Wissensbasierte CAD–Systemkomponente zum Entwurf montagegerechter Produkte. Dissertation, Springer Verlag, Berlin 1991.
137. Rommel, W.; Kreibe, S.; Wagner, J.; Hölzer, B.; Scheppach, M.: Verwertung von Leiterplattenschrott: Verfahren und ihre Bewertung. VDI Jahrbuch 1996/1997 Umweltechnik, VDI Verlag Düsseldorf 1996.
138. Rothhaupt, A.: Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. Dissertation. München: Carl Hanser Verlag, 1995.
139. Rubner, R.: Neuer umweltfreundlicher Kunststoff für Leiterplatten. Siemens–Zeitschrift Special FuE Nr. 3, 1993.
140. Scheidt, L.G.: Starting a new solution to electronic recycling. R'95 International congress Genf, Dübendorf, CH 1995.
141. Scheller, H.; Legarth, J.B.; Danzer, B.: A new strategy in recycling printed circuit boards. Circuit World Vol. 21, Nr. 3, Wela Publications, Isle of Man 1995.
142. Scheller, H.; Luchs, R.; Schaller, A.: Beiträge zur Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft am Beispiel des komplexen Massenprodukts TV–Gerät – Kunststoffvariante. Abschlußbericht zur ersten Phase an das BMBF, Erlangen–Nürnberg 1996.
143. Schiebisch, J.: Zum Recycling von Faserverbundkunststoffen mit Duroplastmatrix. Dissertation an der FAU Erlangen, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen 1996.
144. Schimmelpfennig, L.; Huber, R.: Elektrik–, Elektronikschrott, Datenträgerentsorgung. Springer Verlag, Berlin, New York u.a. 1995.
145. Schmidheiny, S.: Kurswechsel, Globale unternehmerische Perspektiven für Entwicklung und Umwelt. Bericht des Business Council for Sustainable Development, Artemis & Winkler Verlag, München 1992.
146. Schmidt, G.: Relationen und Graphen. Springer Verlag, Berlin 1989.
147. Schmidt, J.; Blum, B.: Schadstoffe in elektrischen und elektronischen Geräten. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1996.

148. Schmidt, W.; Röhrs, G.; Kostelnik, J.: Neue Dimension in der Leiterplattentechnik. F&M Nr. 102 1994.
149. Schmitz, A.: Entwicklung eines Verfahrens zur graphischen Darstellung von Netzplänen mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitung. Dissertation, RWTH Aachen 1974.
150. Schöneburg, E.; Hansen, N.; Gaweletzky, A.: Neuronale Netze – Einführung, Überblick, Anwendungsmöglichkeiten. Verlag Markt & Technik, Haar bei München 1990.
151. Scholz, W.: Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen. Dissertation, Hanser Verlag, München 1989.
152. Schwegler, T.: Umweltfreundliche Gestaltung eines PC's. VDI Seminar Recyclingfähige elektronische Produkte, Erlangen 1996.
153. Simon, M.; Fogg, B.; Chambellant, F.: Design for Cost–Effective Disassembly. International Forum on Design for Manufacture and Assembly, Newport 1992.
154. Slyman, D.: Kleben statt Löten. SMT 6, 1993.
155. Spath, D.; Hartel, M.: Entwicklungsbegleitende Beurteilung der ökologischen Eignung technischer Produkte als Bestandteil des ganzheitlichen Gestaltens. Konstruktion 47, Springer–Verlag, Berlin 1995.
156. Strauss, R.: SMD–Oberflächenmontierte Bauteile. VTT–Verlag für technische Texte, Bonn 1989.
157. Subramani, A.K.; Dewhurst, P.: Automatic generation of product disassembly sequences. Annals of the CIRP, Vol. 40/1/1991, Hallwag Publishers Ltd., Stuttgart 1991.
158. Swanson, D.: Electrically conductive adhesives in SMT. Electronic Packaging & Production No. 5, 1994.
159. Tartler, D.: Analytisch–chemische Behandlung von elementreichen Verbundmaterialien und Möglichkeiten ihrer stofflichen Verwertung am Beispiel Elektronikschrott. Dissertation an der FAU Erlangen, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Erlangen 1995.
160. Thurston, D.L.; Essington, S.K.: A tool for optimal manufacturing design Decisions. Manufacturing Review 6, Vol.1, 1993.
161. Töpfer, P.: Elektronikschrottentorgung/Recycling. VDMA, Impulsstiftung, Frankfurt 1993.
162. Topsoe, F.: Informationstheorie. Teubner Verlag, Stuttgart 1974.
163. Tritsch, C.: Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter., Dissertation Universität Karlsruhe, 1996.

-
164. Van Dieren, W.: Mit der Natur rechnen; der neue Club-of-Rome-Bericht . Birkhäuser Verlag, Basel, Bonn, Berlin 1995.
165. Vlissides, J.M.: Unidraw: a framework for building domain-specific graphical editors. Stanford University, 1989.
166. von Gentzkow, W.; Rogler, W.: Latest results with halogen-free flame-retardant base materials. Circuit World Vol. 21 Nr. 1, 1994.
167. Wang, J.: A new edge detection method through template matching. International journal of pattern recognition and artificial intelligence, Band 8, no. 4, 1994.
168. Warnecke, H.-J.: Production strategies for the 21st century – reflections on the environmental protection – chances for business success. Symposium New Technologies for a closed loop materials economy, Karlsruhe 1996.
169. Wolf, A.: Möglichkeiten einer chemischen Verwertung von Tantal-Kondensatoren. Unveröffentlichte Studie, Institut für Anorganische und analytische Chemie, Univ. Erlangen/Nürnberg 1994.
170. Wolfe, J.A.: Mineral resources, A world review. Chapman and Hall, New York, London 1984.
171. Zachariassen et. al.: Environmentally friendly choice of components for the realization of cleaner technology in electronic manufacture. Delta Electronics Testing, 1994.
172. Zussman, E.; Kriwet, A.; Seliger, G.: Disassembly oriented assessment methodology to support design for recycling. , Annals of the CIRP Vol. 43/1, Technische Rundschau, Hallwag Verlag, Bern 1994.

Lebenslauf:

Herbert Scheller,
geboren am 24.07.1965 in Neuendettelsau,
verheiratet mit Kiki Taube-Scheller, 2 Kinder

08/75-05/85	Platengymnasium Ansbach
07/85-09/86	Grundwehrdienst, Instandsetzungseinheit Heidenheim
10/86-07/92	Studium der Fertigungstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg
08/92-07/96	Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik in Erlangen
08/96-	Leiter der Abteilung 'Umwelt' am European Manufacturing Research Center (EMRC) der Motorola GmbH in Wiebaden

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.
Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

- Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartonierte.
- Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartonierte.
- Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartonierte.
- Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartonierte.
- Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartonierte.
- Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartonierte.
- Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartonierte.
- Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartonierte.
- Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartonierte.
- Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartonierte.
- Band 21
Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartonierte.
- Band 22
Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 23

Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35

Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung

XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36

Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden

129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37

Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem

188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher

145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39

Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung

187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40

Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien

178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41

Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie

169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42

Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser

160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43

Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren

149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44

Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung

180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45

Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46

Bodo Vormann

**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48

Rainer Klotzbücher

**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49

Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50

Jörg Franke

**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51

Franz–Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52

Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53

Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro– und Elektronikindustrie

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54

Thomas Rebhahn

**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55

Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56

Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57

Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

- Band 58
Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartonierte.
- Band 59
Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartonierte.
- Band 60
Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartonierte.
- Band 61
Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartonierte.
- Band 62
Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartonierte.
- Band 63
Peter Steinwässer
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartonierte.
- Band 64
Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartonierte.
- Band 65
Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartonierte.
- Band 66
Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartonierte.
- Band 67
Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln.
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartonierte.
- Band 68
Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartonierte.
- Band 69
Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartonierte.

Band 70
Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71
Michael Steber
**Prozessoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 72
Pfezstorf, Markus
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 73
Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen
für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 74
Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.