

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich für die Förderung meiner Arbeit sowie den Freiraum zu deren Durchführung. Insbesondere danke ich ihm für die Unterstützung, die er mir während einer persönlich schweren Zeit zuteil werden ließ.

Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, Leiter des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie für den erwiesenen Humor.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dr.-Ing. Stefan Slama und Herrn Dipl.-Ing. Andreas Dobroschke aussprechen, die während meiner Zeit am Lehrstuhl das Büro mit mir geteilt haben und mir sowohl in fachlichen als auch privaten Gesprächen motivierend zur Seite standen.

Meinen Kollegen, insbesondere den Mitgliedern der Gruppe Handhabungs- und Montagetechnik danke ich für die vielfältige Unterstützung in den vergangenen Jahren. Hier möchte ich insbesondere Frau Dr.-Ing. Gordana Michos, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Lang, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Kunze und Herrn Dipl.-Ing. Tobias Schmuck nennen. Darüber hinaus möchte ich Herrn Leo Maußner einen besonderen Dank aussprechen, der mir bei den praktischen Arbeiten sehr hilfreich zur Seite stand.

Weiterhin danke ich folgenden Kollegen, die durch Ihr Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Herrn Dipl.-Chem. Manfred Pöhlein, Frau Dipl.-Chem. Raquel Urpi und Frau Dipl.-Chem. Birgit Schindler, Lehrstuhl für anorganische und analytische Chemie (AOC), Herrn Dipl.-Ing. Christian Seidel, Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (LSP) und Herr Dipl.-Ing. Florian Albert, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT).

Mein Dank gilt ebenfalls folgenden Studierenden, die mich im Rahmen meiner Lehrstuhl­tätigkeit unterstützt haben: Frau Ana-Maria Buchleitner, Herr Christian Schübel, Herr Andras Nemes, Herr Michael Holtmannspötter und Herr Ivan Grozev.

Danke auch an Herrn Dipl.-Ing. Roland Dörfler, Herrn Ing. Kenneth Marin und Herrn Georg-Ludwig Radke für die redaktionellen Beiträge zu dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie – insbesondere meinen Eltern – Dank erweisen, die leider den erfolgreichen Abschluss meiner Lehrstuhl­tätigkeit nicht mehr miterleben konnten. Ohne ihre Unterstützung hätte ich diesen Weg nie beschreiten können. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet!

München, Oktober 2005

Katrin MELZER

Lieber in den Humor flüchten,
statt dem Wahnsinn verfallen...!
W. Göttlicher

Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele und Vorgehensweise	3
2	Aktivitäten zur Umsetzung von Verwertungsrichtlinien und Stoffverboten	5
2.1	Die Verwertungssituation in Deutschland	5
2.2	Einführung der EU-Altgeräte richtlinie.....	8
2.2.1	Grundlagen der WEEE-Richtlinie	8
2.2.2	Die Rolle des Endverbrauchers.....	10
2.2.3	Verpflichtung der Hersteller	10
2.3	Anforderungen zur Einführung einer europäischen Stoffverbotsrichtlinie	12
2.4	Maßnahmen in Deutschland.....	14
2.4.1	Die Position der Öffentlich Rechtlichen Entsorger	16
2.4.2	Die Rolle der Hersteller im ElektroG.....	17
2.4.3	Funktion der Gemeinsamen Stelle	18
2.5	Weiterführende politische Maßnahmen zur nachhaltigen Produktentwicklung ..	19
2.5.1	Die EU-Chemikalienpolitik	19
2.5.2	Rahmenrichtlinie für energiegetriebene Produkte	20
3	Ganzheitliche Produktoptimierung durch Integrierte Produktpolitik	25
3.1	Ziele und Ansätze Integrierter Produktpolitik	26
3.2	Interdisziplinäre Kommunikation als Grundlage Integrierter Produktpolitik	30
3.3	Mechanismen und Instrumente zur Umsetzung Integrierter Produktpolitik.....	32
3.3.1	Ökobilanzen zur Quantifizierung von Umweltwirkungen.....	34
3.3.2	Demontageanalysen zur Produktstrukturbewertung.....	37
3.4	Differenzierung geeigneter Produktarten	38

4	Produktoptimierung klassischer Massengebrauchsgüter	41
4.1	Charakterisierung klassischer Massengebrauchsgüter.....	41
4.2	Umsetzung Integrierter Produktpolitik an klassischen Massengebrauchsgütern.....	43
4.2.1	Der Produktlebenszyklus von Kleingeräten	44
4.2.2	Forderungen der EU Richtlinien WEEE und RoHS bei Kleingeräten der Massenproduktion	46
4.3	Anforderungen an Kleingeräte zur Umsetzung Integrierter Produktpolitik	47
4.4	IPP am Beispielprodukt Bodenstaubsauger.....	51
4.4.1	Herangehensweise an das Projekt im Rahmen von BEnefiT	51
4.4.2	Entwicklung alternativer Energieversorgungskonzepte	53
4.4.3	Nutzung der ökologischen Bewertung zur Entscheidungsfindung	60
4.4.4	Innovative Gehäusekonzepte zur Strukturoptimierung	66
4.4.5	Zusammenfassende Bewertung der Umsetzung Integrierter Produktpolitik am klassischen Massengebrauchsgut Bodenstaubsauger.....	68
5	Refurbishing als Strategie zur Optimierung von Investitionsgütern	72
5.1	Refurbishing und dessen Umsetzung	72
5.2	Beschreibung des mechatronischen Systems „Medizingerät“.....	74
5.3	Prozessanalyse des Refurbishing von Medizinanlagen	75
5.3.1	Darstellung des Umweltpotenzials.....	75
5.3.2	Gesetzliche Anforderungen an Gebrauchtanlagen.....	76
5.3.3	Abwicklung der Ersatzteilversorgung.....	78
5.4	Entwicklung eines rechnergestützten Planungssystems zur effektiven Prozessgestaltung	81
5.5	Abschätzung des Umweltpotenzials durch das Refurbishing medizinischer Anlagen.....	84
5.6	Zusammenfassung	85
6	Integrierte Produktpolitik bei schnelllebigem Massenprodukten.....	86
6.1	Aktuelle Marktsituation bei Mobiltelefonen	87
6.2	Entsorgungsproblematik mobiler Endgeräte	89
6.3	Demontagegerechtheit rückläufiger Mobiltelefone	91

6.3.1 Manuelle Demontageanalyse mittels Display/ReGrEd	91
6.3.2 Optimierungspotenzial	98
6.4 Einfluss des Nutzerverhaltens auf die ökologische Gesamtbilanz	101
6.5 Zusammenfassung	104
7 Selektive Demontage von Bauelementen zu ReUse-Zwecken	105
7.1 Charakteristika von Ball Grid Arrays	107
7.2 Standardverfahren zum ReUse von BGAs	112
7.2.1 Entlöten von BGAs	113
7.2.2 Anschlussflächenvorbereitung	117
7.2.3 Verfahren zum Reballing von BGAs	117
7.3 Alternative Verfahren zum Lösen der BGAs von Baugruppen	120
7.3.1 Einsatz von Laser	121
7.3.2 Anwendung von Säure	124
7.3.3 BGA-Entfernung mittels Kälte	131
7.4 Zusammenfassung	132
8 Zusammenfassung und Ausblick	133
Literaturverzeichnis	137
Normen und Rechtsvorschriften	147
Glossar	150

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Anforderungen der Gesellschaft an die soziale Marktwirtschaft bestehen im Wesentlichen darin, Produkte und Dienstleistungen zur Befriedigung materieller Bedürfnisse und Wünsche bereitzustellen. In Abhängigkeit von der Produktart spielt dabei der Innovationsprozess eine wesentliche Rolle für wirtschaftliches Wachstum.

Im Rahmen der Produktentwicklung muss der Hersteller als einer der zentralen Akteure des Produktlebenszyklus primär drei Grundanforderungen gerecht werden (Bild 1): Neben der Funktionserfüllung, die auf den jeweiligen Einsatzbereich angepasst sein muss und Kriterien wie Langlebigkeit, Wartungs- und Reparaturfreundlichkeit beinhaltet, stellt die Wirtschaftlichkeit der Prozesse die Basis wettbewerbsfähigen Handelns dar. Darüber hinaus gewinnt die Umweltverträglichkeit in zunehmendem Maße an Bedeutung.

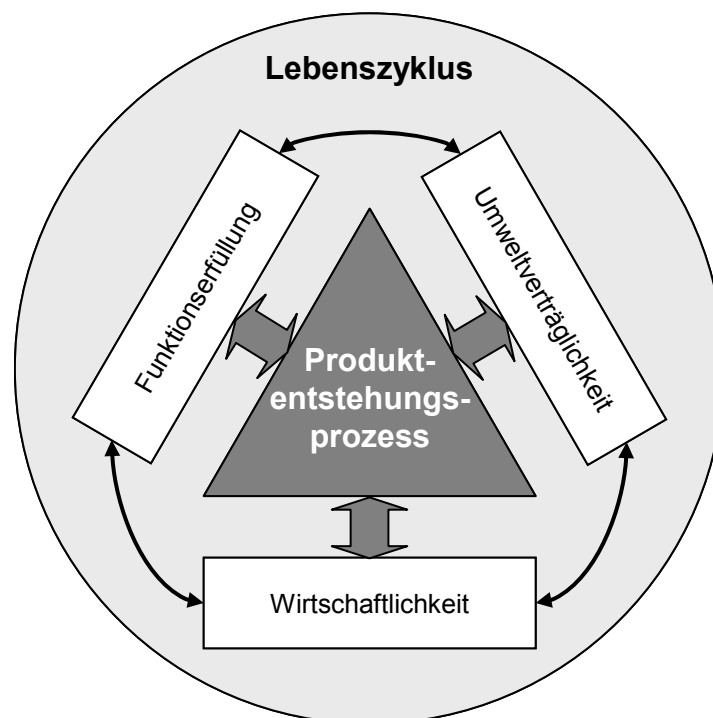


Bild 1: Grundanforderungen an den Produktentstehungsprozess

Hauptsächliches Augenmerk lag in der Vergangenheit neben nachsorgenden Maßnahmen, d. h., der Erfüllung politischer Anforderungen hinsichtlich strenger Schadstoffgrenzwerte zum Schutz der Umweltkompartimente Boden, Luft und Wasser [109] auf dem betrieblichen und produktbezogenen Umweltschutz. Diese Strategien bedingen jedoch, dass Umweltwirkungen nicht zwangsläufig am Ort ihres Entstehens begrenzt werden, sondern über verschiedene Produktlebensphasen hinaus verschleppt werden können.

Das ständig wachsende Umweltbewusstsein führt seit 1996 dazu, dass in zunehmendem Maße Umweltmanagementsysteme nach DIN ISO 14.001 [116] oder EMAS [123]

als Werkzeuge genutzt werden, um die Aktivitäten der Unternehmen hinsichtlich Umweltschutz zu erfassen [42] und außenwirksam darzustellen. Eine Identifikation mit den von ihnen umgesetzten umweltpolitischen Themen findet bislang jedoch erst bei rund einem Drittel der fertigen Unternehmen statt, da oftmals die systematische Information der Beschäftigten zu umweltrelevanten Themen gering ist [42].

Über den Bereich der Produktion hinausgehend, umfasst der gesamte Produktlebenszyklus, der aus ökologischer und ökonomischer Sicht in Bild 2 dargestellt wird, ein komplexes Gefüge von Aktivitäten, die jeweils vielfältige Auswirkungen auf die Umwelt haben. Darüber hinaus sind diverse Akteure am Prozess der Produktbereitstellung, -nutzung und -entsorgung beteiligt, die je nach Position individuelle Interessen verfolgen.

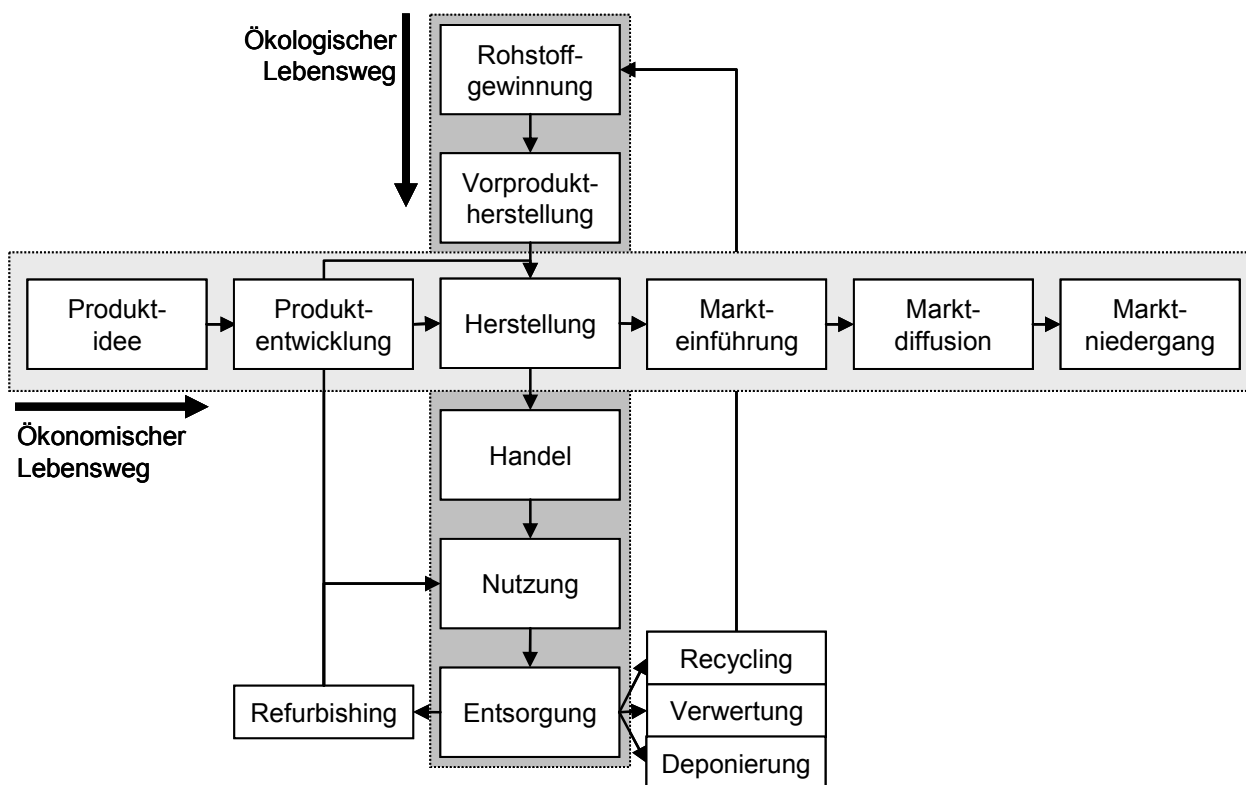


Bild 2: Darstellung des ökologischen und ökonomischen Produktlebensweges

Der Integration des Umweltgedankens in den gesamten Produktlebenszyklus, sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Perspektive und unter Berücksichtigung aller produktlebenszyklusrelevanten Prozesse und Beteiligten, wird seitens der Europäischen Union verstärkt Rechnung getragen. Mit Einführung der EU-Richtlinien zur Handhabung von Elektroaltgeräten (WEEE) [121] und der Umsetzung von Stoffverboten in elektrischen und elektronischen Geräten (RoHS) [122] erlangt der Hersteller eine starke Verantwortung hinsichtlich des verantwortungsvollen Umgangs mit seinen Produkten entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Darauf aufbauend stellen EU-Richtlinienentwürfe zum Chemikalienrecht (REACH) [148] und insbesondere Eco-Design-Anforderungen an energiebetriebene Produkte (EUP) [149] weitere Schritte zu einer nachhaltigen Umweltpolitik dar. Die Bedeutung der Umsetzung dieser Richtlinien

und die Übernahme einer Vorreiterrolle der Europäischen Union in Sachen Umweltschutz wird auch anhand internationaler, über die Grenzen der EU hinausgehender Aktivitäten deutlich, da beispielsweise die USA und China die Implementierung nationaler Gesetzestexte auf Basis der EU-Richtlinien WEEE und RoHS forcieren [18].

Ziel des Nachhaltigkeitsgedanken ist es, ökologische, ökonomische und soziale Faktoren in Einklang zu bringen [97], [101]. Ein Instrument, welches sich mit der umweltverträglichen Optimierung von Produkten und Prozessen entlang des gesamten Produktlebenszyklus auseinandersetzt, stellt die Integrierte Produktpolitik dar. Sie berücksichtigt neben allen Lebensphasen eines Produktes, ebenfalls die daran beteiligten Akteure, beeinträchtigten Umweltmedien und alle darüber hinausgehenden Handlungsfelder. Die politische Bedeutung der Integrierten Produktpolitik wird durch Einführung eines Grünbuchs der Europäischen Union bereits im Jahr 2001 deutlich [59]. Darüber hinaus beschäftigt sich der Freistaat Bayern eingehend mit der Umsetzung der Prinzipien Integrierter Produktpolitik [105] und implementiert diese als eines der Schwerpunktthemen in den Umweltpakt Bayern – einer Vereinbarung zwischen Politik und Industrie basierend auf freiwilligen Maßnahmen zur Realisierung einer nachhaltigen, ökologischen Entwicklung der bayerischen Wirtschaft.

Statt der Betrachtung eines Teilbereiches des in Bild 2 dargestellten Produktlebensweges stellt die Integrierte Produktpolitik den Systemgedanken in den Vordergrund, denn nur unter Berücksichtigung aller auftretender Wechselwirkungen ist es möglich, dauerhaft die natürlichen Lebensgrundlagen zu bewahren und das ökologische Gleichgewicht als Faktor marktwirtschaftlichen Wettbewerbs zu erhalten [97].

1.2 Ziele und Vorgehensweise

Die Integration des Systemgedankens in den gesamten Produktlebenszyklus ist bislang in zu wenigen Bereichen der industriellen Fertigung verankert. Die Integration aller Beteiligten in den Gesamtprozess stellt dabei das zentrale Element zur Umsetzung Integrierter Produktpolitik dar. Nur auf diese Art und Weise kann das notwendige Expertenwissen gebündelt werden, welches zwingend notwendig ist, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit als Basis zur Erschließung von Innovationspotentialen effektiv zu nutzen.

Darüber hinaus ist die Integrierte Produktpolitik kein Instrument, das nach Umsetzung wiederkehrender Schemata auf alle Produktkategorien gleichermaßen angewandt werden kann, sondern erfordert die individuelle Auseinandersetzung mit spezifischen Produktanforderungen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, zunächst den Einfluss aktueller EU Politik auf den Elektro- und Elektronikgerätemarkt und dessen Umsetzung in deutsches Recht darzustellen. Darüber hinaus wird der Trend hin zu einer ganzheitlichen Produktionssystematik im Sinne der Integrierten Produktpolitik und deren Bedeutung aufgezeigt. Als wesentliches Instrument der Integrierten Produktpolitik wird dabei die interdisziplinäre

Kommunikation entlang des gesamten Produktlebenszyklus gesehen, die als Basis für die erfolgreiche Umsetzung nachhaltiger Strategien unerlässlich ist.

Nachdem die Berücksichtigung der Prinzipien der Integrierten Produktpolitik bisher keine weite Verbreitung in die Unternehmensphilosophien gefunden hat, werden anhand unterschiedlicher Produktkategorien allgemeine Methoden zu deren Umsetzung abgeleitet und ökologische sowie ökonomische Potenziale aufgezeigt. Hierbei werden primär Konsum- und Investitionsgüter fokussiert, da diese entweder in hohen Stückzahlen gefertigt werden oder über eine hohe Wertschöpfung im Fertigungsbereich verfügen und somit einen wesentlichen Umwelteintrag hervorrufen. Anhand eines für jeden genannten Produktbereich typischen Gerätes wird das mittels der Integrierten Produktpolitik erzielbare ökologische Potenzial konkretisiert und sie als effektives Instrument der Industrie zur Bereitstellung nachhaltiger Produkte vorgestellt.

2 Aktivitäten zur Umsetzung von Verwertungsrichtlinien und Stoffverboten

Die weltweite industrielle Entwicklung führt zu einem wachsenden Konsumverhalten in der Gesellschaft. Hierbei haben insbesondere technische Produkte aus dem Elektro- und Elektronikbereich eine hohe Bedeutung, die sowohl in privaten als auch industriellen Bereichen stark verbreitet sind, um diverse Prozesse des täglichen Lebens zu unterstützen und den Lebensstandard zu erhöhen.

Die steigende Anzahl elektronischer Geräte führt gleichzeitig zu höheren Abfallströmen dieser Produktkategorien. Nachdem Elektronikgeräte aufgrund der verarbeiteten Inhaltsstoffe besonders kritisch zu entsorgen sind, existieren gesetzliche Rahmenbedingungen, um die Verwertung der Geräte möglichst effizient und umweltschonend zu gestalten. Im Weiteren wird ein Überblick über die aktuelle Entwicklung der Gesetzgebung hinsichtlich Verwertungsrichtlinien und Stoffverboten bei Elektrogeräten gegeben und deren Einfluss auf das Produktdesign aufgezeigt.

2.1 Die Verwertungssituation in Deutschland

Elektro- und Elektronikgeräte sind Produkte mit sehr unterschiedlich ausgeprägten Nutzungsdauern, stark variierenden Anschaffungspreisen und - abhängig vom Einsatzbereich - sehr unterschiedlichen Nutzungsprofilen. Ein besonderes Problem der Entsorgung dieser Geräte stellt die Vielzahl eingesetzter Materialien, insbesondere von Kunststoffen und die Verwendung von Schadstoffen wie Schwermetallen, Flammschutzmitteln, etc. dar. Die Motivation für die Entsorgung eines Elektrogerätes folgt im Wesentlichen den vier in Bild 3 dargestellten Strategien.

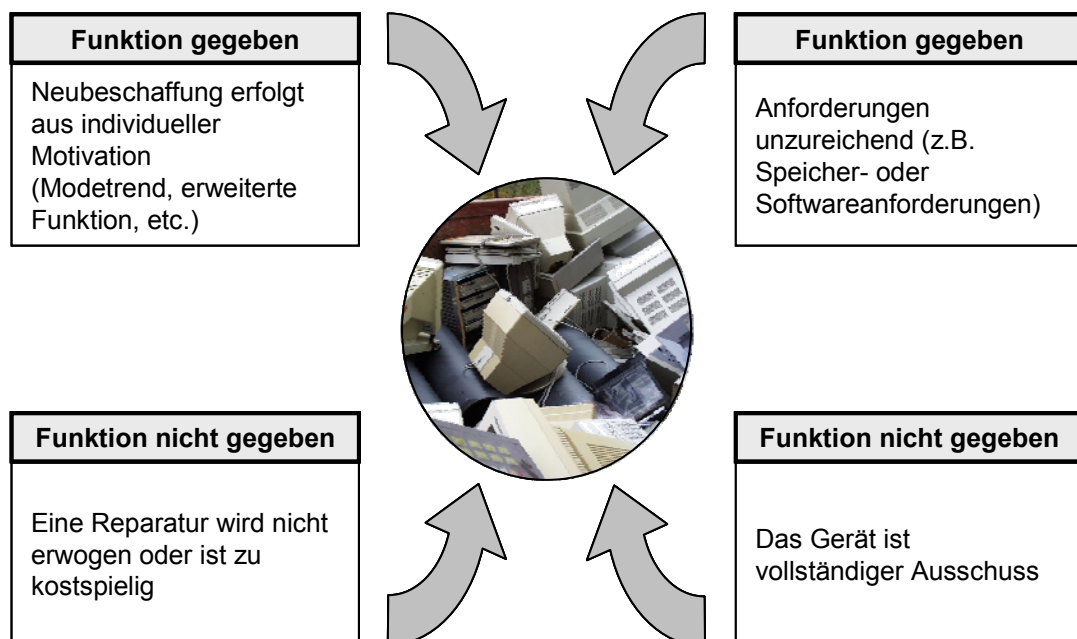


Bild 3: Motivation für die Entsorgung von Elektrogeräten

Insgesamt zweidrittel des Aufkommens an Elektronikschrott wird dem Konsumbereich zugeordnet [103]. Elektrogeräte aus dem Haushaltsbereich werden aufgrund ihrer geringen Baugröße oftmals über die kommunale Abfallwirtschaft bzw. den Sperrmüll entsorgt und gelangen damit in Verbrennungsanlagen oder auf Deponien. Das Verbrennen von Elektronikschrott ohne vorhergehende Behandlung und nachgeschaltete Gasreinigungsverfahren birgt die Gefahr des Erzeugens und Weiterleitens von Schad- und Giftstoffen in die Umgebung, so dass eine Schädigung der Umwelt und unmittelbar davon betroffener Personen die Folge ist.

Um der Freisetzung von Schadstoffen bei der Verbrennung von Elektrogeräten entgegenzuwirken, wurden 1994 mit Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) [127] erste Schritte zu einer nachhaltigen Abfallpolitik unternommen. Es strebt unter Berücksichtigung des EG-Abfallbegriffs eine grundlegende Umgestaltung der gesamten Abfallwirtschaft an. So unterscheidet das KrW-/AbfG nach Abfällen zur Verwertung und zur Beseitigung. Nach der Gesetzesdefinition sind Abfälle „*alle beweglichen Sachen, deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss*“ [127]. Ein Gesetzesanhang erläutert, welche „beweglichen Sachen“ unter diese Definition fallen.

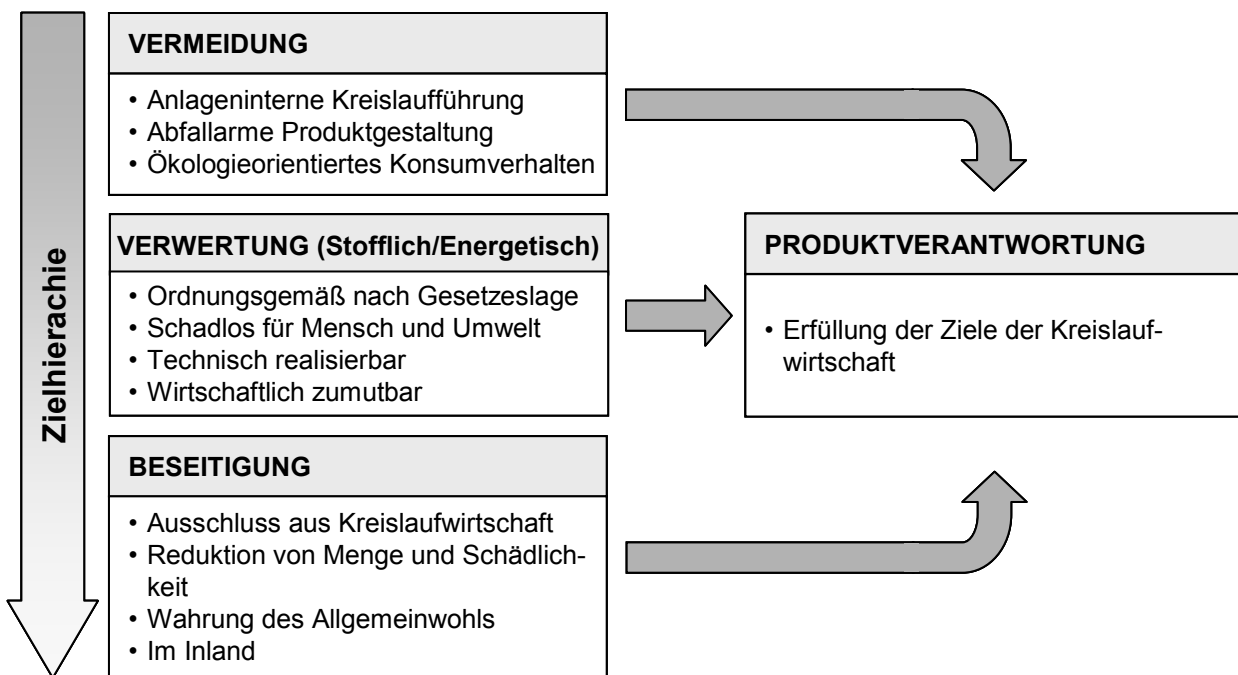


Bild 4: Ziele des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes

Zentraler Gedanke ist weiterhin die Produktverantwortung, welche besagt, dass Produkte so zu gestalten sind, dass sowohl bei ihrer Herstellung als auch bei ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und nach ihrem Gebrauch eine möglichst umweltverträgliche Entsorgung gewährleistet wird. Entscheidend ist ferner die in Bild 4 dargestellte Zielhierarchie des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes: Abfälle sind demnach vorrangig zu vermeiden, insbesondere durch die Verminderung ihrer Menge und Schädlichkeit. Sie sind erst in zweiter Linie stofflich zu verwerten oder zur Gewinnung von Energie zu nutzen. Wenn dies technisch und ökonomisch nicht umsetzbar ist,

dürfen die Abfälle umweltverträglich beseitigt werden. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz wird außerdem von einem umfangreichen gesetzlichen Regelwerk begleitet, das unter anderem die Überwachung der Abfallentsorgung festschreibt.

Weiteres Ziel der Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes war die Erfassung rückläufiger Altgeräte, nachdem Hersteller und Händler von Elektrogeräten dazu verpflichtet wurden, diese zurückzunehmen.

Vor diesem Hintergrund wertete das Umweltbundesamt die Abfallbilanzen aller Bundesländer hinsichtlich der Anzahl separat erfasster Elektroaltgeräte aus. Die Aktualisierung einer Studie über das „Erfasste Abfallaufkommen an Elektroaltgeräten aus Abfallbilanzen der Bundesländer“ [111] wurde im Februar 2004 vor dem Hintergrund der Einführung der EU-Richtlinien „Waste of Electric- and Electronic Equipment (WEEE)“ [121] und „Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electric- and Electronic Equipment (RoHS)“ [122] durchgeführt.

Ergebnis der Studie war, dass die Datenerfassung abhängig vom Bundesland sehr unterschiedlich erfolgt. Weiterhin ist die Datentiefe je Gerätekategorie divergent. Die Mengenerfassung erfolgt zum Teil in Tonnage bzw. nach Stückzahl, so dass ein direkter Vergleich nur über das Durchschnittsgewicht möglich ist.

Insgesamt wurden laut Studie im Jahr 2002 insgesamt 279.162 t Elektroaltgeräte gesammelt. Dies entspricht einem durchschnittlichen Aufkommen von 3,38 kg pro Einwohner und Jahr. Diese Zahl liegt weit unter dem vom Umweltbundesamt bereits 1992 geschätzten Aufkommen von 800.000 t gebrauchter Elektrogeräte pro Jahr, so dass das Ziel des KrW-/AbfG, eine Steigerung der Erfassungsquote zu erzielen, fraglich erscheint.

Weiterhin fehlt der Ansatz, Maßnahmen zur Vermeidung von Elektroaltgeräten zu schaffen, da der Fokus des Gesetzes im Wesentlichen auf deren Recycling gelegt wird. Allerdings fehlt eine Beurteilung der technologisch vorhandenen Verwertungsverfahren hinsichtlich Umweltverträglichkeit.

Dem Anspruch einer ganzheitlichen Produktanalyse zur Vermeidung von Elektroaltgeräten wird das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz somit nicht gerecht. Dem soll mit der Einführung zweier EU-Richtlinien entgegengewirkt werden. Basierend auf Artikel 174 des Vertrages der Europäischen Union [76] und dem „Fünften Aktionsprogramm für den Umweltschutz“ [57] der EU werden in Europa zwei Richtlinien Gesetzesgrundlage, welche eine Reduktion von Elektronikschrott und umweltgefährdender Substanzen hervorgehend aus Elektrogeräten vorsehen. Im Folgenden werden diese Richtlinien vorgestellt und die Instrumentarien zu deren Umsetzung – insbesondere in Deutschland – aufgezeigt.

2.2 Einführung der EU-Altgeräte Richtlinie

Nachdem in der Vergangenheit politische Vorgaben im Wesentlichen den nachsorgenden Umweltschutz fokussierten, der durch sog. End-of-Pipe Technologien wie Anlagen zur Luft- oder Bodenreinerhaltung etc. charakterisiert wird, folgt die EU-Richtlinie „Waste of Electric and Electronic Equipment“ (WEEE) [121] dem Vorsorgeprinzip. Das bedeutet, Ziel des Handelns ist, Umweltbeeinträchtigungen bereits in ihrem Ursprung zu erfassen, so dass eine Schädigung von Mensch und Umwelt bereits im Vorfeld auf ein Minimum reduziert wird.

Die Festlegung der Grundsätze des gemeinsamen Handelns erfolgt auf EU-Ebene, um die Wirksamkeit der Umsetzung der Verwertungskonzepte zu gewährleisten, gleichzeitig aber individuelle Freiheiten bei der Einführung nationaler Maßnahmen für alle Mitgliedstaaten sicherzustellen. Zentrale Akteure der EU-Richtlinie WEEE sind einerseits die Hersteller von Produkten, andererseits die Kunden.

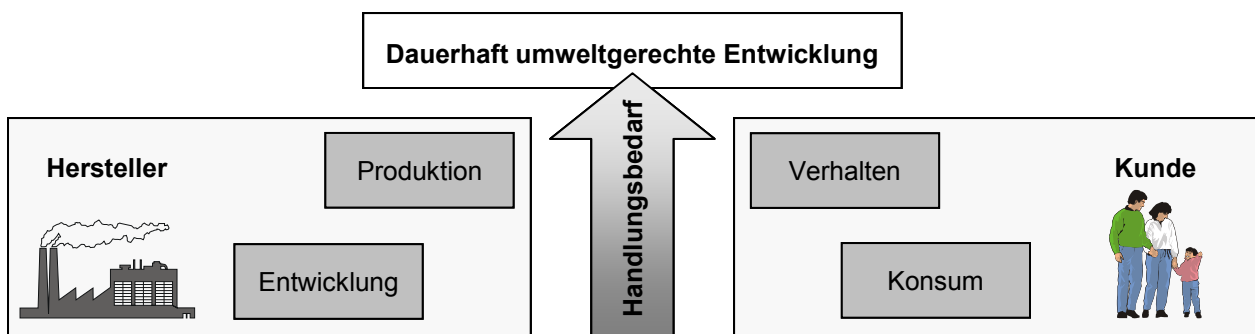


Bild 5: Hauptakteure bei der Umsetzung der WEEE-Richtlinie

Wie in Bild 5 dargestellt, erfordert die erfolgreiche Umsetzung der Richtlinie ein Umdenken bei den am Produktlebenszyklus beteiligten Parteien. Nachdem die Hersteller die Verantwortung für die Verwertung der von Ihnen gefertigten Elektrogeräte bekommen, müssen sie sich bereits in den Entwicklungs- und Fertigungsprozessen ihrer Produkte auf die geänderten Anforderungen einstellen. Dies erfordert eine Berücksichtigung von Verwertungsanforderungen bereits während der Herstellung sowie eine Umstellung der Fertigungsprozesse.

Der Kunde muss ein verändertes Bewusstsein sowohl für das Konsumverhalten, als auch für den verantwortungsbewussten Umgang mit Elektroaltgeräten entwickeln. Die zu diesem Zweck seitens der Richtlinien vorgesehenen Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln dargelegt.

2.2.1 Grundlagen der WEEE-Richtlinie

Bereits am 13. Februar 2003 wurde die EU-Richtlinie WEEE im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht und somit rechtskräftig. Innerhalb einer Umsetzungsfrist von 18 Monaten waren die Vorgaben der WEEE in nationales Recht umzusetzen, so dass

seit 13.08.2004 alle EU-Mitgliedstaaten über geeignete Verfahren zur Abfallbehandlung aus Elektronikschrott verfügen müssen (Bild 6).

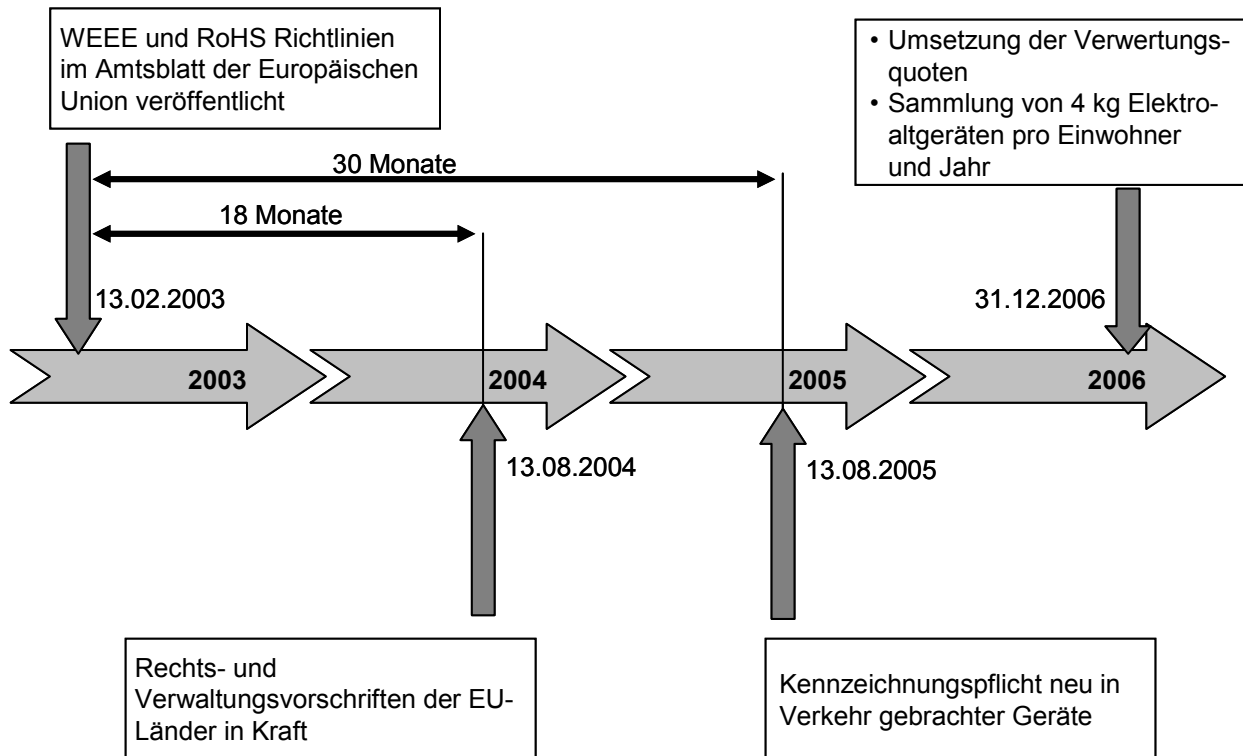


Bild 6: Zeitlicher Ablauf zur Einführung der EU-Richtlinie WEEE

Ziel der WEEE ist, von Elektro- und Elektronikaltgeräten ausgehende Abfallströme zu vermeiden. Hierzu werden Konzepte von Produkten gefördert, die primär die Demontage und Verwertung von Altgeräten sowie ihrer Bauteile und Werkstoffe berücksichtigen und erleichtern. Auftretende Reststoffe sind zunächst der Wiederverwendung zuzuführen, bzw. durch Recycling und andere Formen der Verwertung zu beseitigen (Artikel 4, [121]).

Nachdem nicht für alle Geräte gleiche Maßstäbe bei der Verwertung angesetzt werden können, unterteilt die WEEE die relevanten Elektrogeräte in 10 Kategorien, denen unterschiedliche Verwertungsquoten zugeordnet werden. Zur näheren Eingrenzung enthält die Richtlinie in Anhang IB eine Liste, welche die Zugehörigkeit der Produkte zu den jeweiligen Kategorien näher spezifiziert. Tabelle 1 stellt die in der Richtlinie aufgeführten Geräte mit den zu erzielenden Quoten dar.

Die angegebenen Werte sind zunächst bis 31.12.2006 umzusetzen. Neue Zielvorgaben werden auf Basis erster Erfahrungen mit der Umsetzung der Richtlinie bis zum 31.12.2008 durch das Europäische Parlament festgelegt.

Weiterhin haben die Mitgliedstaaten die Pflicht, ab 31.12.2006 eine Sammelquote von mindestens 4 kg Elektronikschrott pro Einwohner und Jahr zu erfüllen. Dies umfasst die Geräte der Kategorie 1 bis 7 der Tabelle 1, da diese Produkte dem Handel zwischen Hersteller und privatem Endverbraucher (Business to Customer) entsprechen. Kategorie 8 bis 10 berücksichtigen den Handel auf industrieller Ebene (Business to Business).

	Gerätekategorie	Verwertung insgesamt		Entsorgung	
		Wiederverwendung/ Materialrecycling	Thermische Verwertung		
1.	Haushaltsgroßgeräte	75%	5%	20%	Business to Consumer
2.	Haushaltskleingeräte	50%	20%	30%	
3.	IT- und Telekommunikationsgeräte	65%	10%	25%	
4.	Geräte der Unterhaltungselektronik	65%	10%	25%	
5.	Beleuchtungskörper	50%	20%	30%	
6.	Elektrische und elektronische Werkzeuge	50%	20%	30%	
7.	Spielzeug, Sport- und Freizeitgeräte	50%	20%	30%	
8.	Medizinische Geräte	Berücksichtigung ab 31.12.2008			Business to Business
9.	Überwachungs- und Kontrollinstrumente	50 %	20 %	30 %	
10.	Automatische Ausgabegeräte	75%	5%	20%	

Tabelle 1: Gerätekategorien und Verwertungsquoten für Elektroaltgeräte nach WEEE

2.2.2 Die Rolle des Endverbrauchers

Der Kunde spielt eine zentrale Rolle im Prozess der Elektroaltgeräteverwertung. Nachdem ab 2007 durchschnittlich 4 kg Elektronikschrott pro Einwohner und Jahr zu sammeln sind, ist der Endverbraucher zunächst durch entsprechende Maßnahmen zur Abgabe seiner Altgeräte zu motivieren. Dies bedeutet in erster Linie eine Aufklärung über die Verpflichtung, Elektroschrott nicht gemeinsam mit dem Hausmüll zu beseitigen, sondern getrennt zu sammeln und über geeignete Verwertungssysteme zu entsorgen.

Um die kostenfreie Abgabe der Altgeräte aus privaten Haushalten zu gewährleisten, sind abhängig von der Bevölkerungsdichte Sammelsysteme zu etablieren. Ebenfalls hat der Endverbraucher die Möglichkeit, bei Neukauf eines vergleichbaren Gerätes seine Altgeräte direkt beim Händler abzugeben.

Die Verpflichtung zur Deklaration von Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit ausgehend von Elektroneugeräten gibt dem Kunden die Möglichkeit, einen unabhängigen Gerätevergleich anzustellen. Dadurch können – ähnlich wie bei weißer Ware - ökologische Vergleiche von Geräten gezogen und als Kaufkriterium herangezogen werden.

2.2.3 Verpflichtung der Hersteller

Der Hersteller wird mit Einführung der WEEE wichtigster Akteur im Handlungskreis der Verwertung von Elektroaltgeräten. Ihm obliegt die Verantwortung zur Verwertung der von ihm in Verkehr gebrachten Elektrogeräte, d. h., er schließt Verträge mit Verwer-

tungsunternehmen zur Behandlung von Altgeräten. Dies stellt eine wesentliche Veränderung im Entsorgungsprozess dar, da diese Aufgabe bislang lediglich von den Kommunen gemeinsam mit Recyclingunternehmen wahrgenommen wurde.

Verbunden mit dieser Verantwortung ergeben sich zusätzliche Pflichten für den Hersteller, die in Bild 7 zusammengefasst werden: Zunächst muss jeder Hersteller von Elektrogeräten Informationen über die Menge und Art der in Verkehr gebrachten Neugeräte dokumentieren. Hersteller ist dabei jeder, der unabhängig von der Verkaufsmethode Elektro- und Elektronikgeräte unter seinem Markennamen herstellt und verkauft, Geräte anderer Anbieter unter seinem Markennamen weiterverkauft (hier tritt er nicht als Hersteller auf, sofern der Markenname des Herstellers auf dem Gerät ausgewiesen ist), bzw. Elektro- und Elektronikgeräte gewerblich in einen Mitgliedsstaat ein- oder ausführt (Artikel 3, [121]).

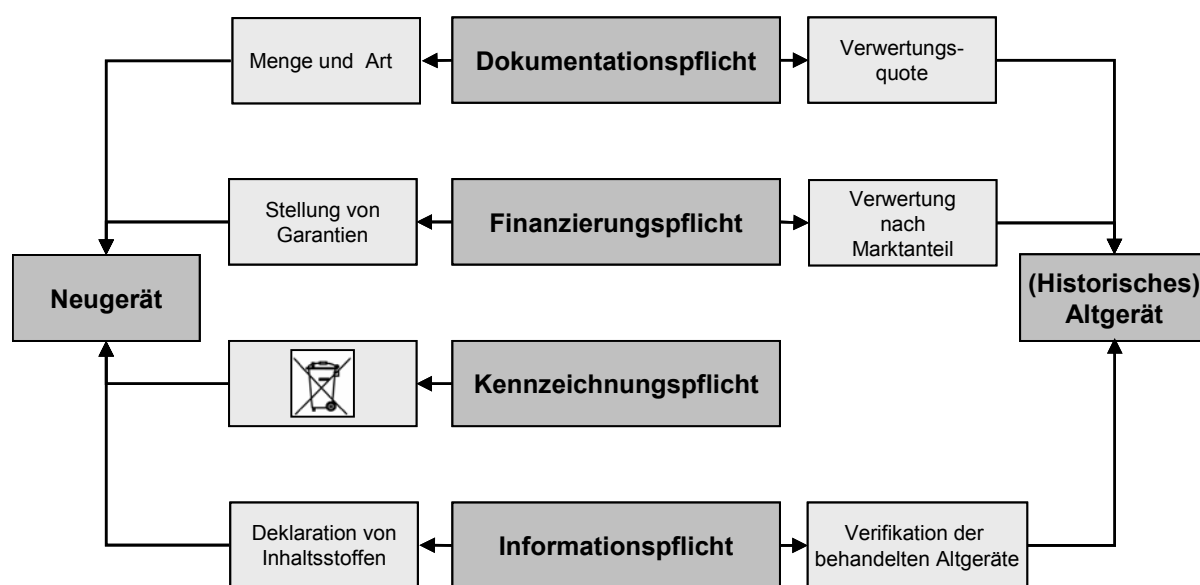


Bild 7: Pflichten des Herstellers mit Einführung der WEEE

Diese Angaben dienen als Grundlage zur Bestimmung des Marktanteils und somit als Basis zur Ermittlung der Quote zur Festlegung des Verwertungsanteils. Die Erfüllung der Verwertungsquote ist ebenfalls zu dokumentieren. D.h., die Menge der gesammelten, behandelten oder ins Ausland ausgeführten Altgeräte muss ebenfalls in Gewicht oder Anzahl erfasst und belegt werden.

Die Kosten, die im Zusammenhang mit der Sammlung, Behandlung und umweltgerechten Verwertung entstehen, sind vom Hersteller zu tragen. Zu diesem Zweck müssen beim Inverkehrbringen von Neugeräten Garantien gestellt werden, so dass auch über eine mögliche Insolvenz des Unternehmens hinaus die Verwertung der nach Inkrafttreten der WEEE-Richtlinie in Verkehr gebrachten Geräte gesichert ist. Diese Kosten dürfen seitens der Hersteller beim Verkauf von Neuprodukten für einen Zeitraum von 8 Jahren (Kategorie 1 für 10 Jahre) gegenüber dem Kunden ausgewiesen werden. Neugeräte sind weiterhin deutlich mit der „durchgestrichenen Mülltonne auf zwei Rädern“ (s. Bild 7) zu kennzeichnen, um das Bewusstsein der Kunden zur ordnungsgemäßen Entsorgung der Geräte zu schärfen. Die Finanzierung der Entsorgung historischer Alt-

geräte ist abhängig vom jeweiligen Marktanteil des Herstellers in seinem Produktsegment. Historische Altgeräte bezeichnen dabei diejenigen Geräte, die vor Inkrafttreten der WEEE auf den Markt gebracht wurden.

Weiterhin ist der Hersteller verpflichtet, innerhalb eines Jahres nach Inverkehrbringen neuer Geräte Informationen über Inhaltsstoffe, Bauteile und Werkstoffe den Recyclingunternehmen zur Verfügung zu stellen, um den Verwertungsprozess bestmöglich zu optimieren.

2.3 Anforderungen zur Einführung einer europäischen Stoffverbotsrichtlinie

Zeitgleich mit der Einführung der Regelungen zur Behandlung von Elektroaltgeräten durch die EU-Richtlinie „Waste of Electric and Electronic Equipment“ (WEEE) wurde seitens der Europäischen Union eine weitere Richtlinie verabschiedet, welche sich mit der Beschränkung der Verwendung bestimmter Stoffe in Elektrogeräten beschäftigt und als „Restriction of the Use of certain hazardous substances in electric and electronic equipment“ (RoHS) [122] bezeichnet wird.

Vornehmliches Ziel dieser Richtlinie ist, die umweltgerechte Verwertung und Beseitigung von Elektroaltgeräten zu sichern und gleichzeitig einen Beitrag zum Gesundheitsschutz zu leisten, indem die Verwendung der Schwermetalle Blei, Quecksilber, Cadmium und sechswertigem Chrom, sowie der Flammenschutzhemmer polybromiertes Biphenyl (PBB) und polybromierter Diphenylether (PBDE) bei Elektro- und Elektronikgeräten, die ab 01.07.2006 neu in Verkehr gebracht werden, untersagt wird. Einen Einblick in Anwendungsbereiche der oben genannten Substanzen gibt Tabelle 2.

Die Richtlinie bezieht sich auf die in der WEEE genannten Gerätekategorien 1 bis 7 sowie 10 (Tabelle 1) und zusätzlich auf elektrische Glühlampen und Leuchten des Haushaltsbereichs. Von der Richtlinie ausgeschlossen werden jedoch Ersatzteile, die zur Reparatur bzw. zur Wiederverwendung der vor dem 01. Juli 2006 in Verkehr gebrachten Geräte verwendet werden.

Da die Diskussion über den Verzicht umweltgefährdender Substanzen in Elektro- und Elektronikgeräten bereits seit vielen Jahren geführt wird, existieren in der Industrie technologische Ansätze, um kritische Stoffe zu substituieren. Statt bleihaltiger Lote sind bleifreie Lotpasten wie Zinn-Silber-Lot (Sn 96,5 Ag 3,5) etc. bereits in der Praxis erprobt und die Prozessabläufe an die geänderten Standards angepasst. Sechswertiges Chrom, das in der Oberflächenbehandlung verwendet wurde, ist durch dreiwertiges Chrom ersetzbar. Weitreichende Lösungen für den Verzicht auf polybromierte Flammenschutzmittel in Leiterplatten und Kunststoffen zeigt das Umweltbundesamt in Teil 5 eines „Leitfadens zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe“ [1] auf. Ein Verzicht auf die in der RoHS genannten Substanzen ist somit zum Zeitpunkt der Umsetzung der Richtlinie am 01.07.2006 weitestgehend möglich.

Substanz	Verwendung	Konzentrationshöchstwert
Blei	Lotmaterial, Akkumulatoren, Kabelummantelung, Legierungen, elektronische Bauelemente etc.	0,1 Gewichtsprozent je homogenem Werkstoff
Quecksilber	Antikorrosionsmittel, Batterien, Legierungen, Stabilisator in Kunststoffen und Pigmenten, Schalter, etc.	
Cadmium	Bildschirmglas, Oberflächenbeschichtung, Batterien,	0,01 Gewichtsprozent je homogenem Werkstoff
Sechswertiges Chrom	Legierungsbestandteil, Galvanik, Katalysator, etc.	0,1 Gewichtsprozent je homogenem Werkstoff
Polybromiertes Biphenyl	Flammschutz, Weichmacher für Kunststoffe, etc.	
Polybromierter Diphenylether	Flammschutz	

Tabelle 2: Überblick über die durch die EU-Richtlinie RoHS verbotenen Substanzen, deren ursprünglicher Verwendungszweck sowie die vorgeschlagenen Konzentrationshöchstwerte

Nachdem die Einhaltung eines 0% Grenzwertes aus technologischen Gründen nicht für alle Werkstoffe und Bauteile umsetzbar ist, bestimmt die Kommission eine Festlegung von Konzentrationshöchstwerten, die zum Zeitpunkt der Einführung der RoHS noch nicht näher spezifiziert wurden. Am 23.09.04 schlägt die Kommission der Europäischen Gemeinschaft dem Rat Konzentrationshöchstwerte zur Umsetzung im Rahmen der RoHS vor, auf die der Rat innerhalb von drei Monaten reagieren musste, anderenfalls würde der Vorschlag als Maßnahme von der Kommission angenommen. Der Vorschlag sieht als Konzentrationshöchstwert 0,1 Gewichtsprozent Blei, Quecksilber, sechswertiges Chrom, polybromiertes Biphenyl (PBB) oder polybromierter Diphenylether (PBDE) je homogenem Werkstoff, bzw. 0,01 Gewichtsprozent Cadmium je homogenem Werkstoff als tolerabel an, um ein hohes Niveau an Umwelt- und Personenschutz zu gewährleisten [150].

Von der Umsetzung der Richtlinie werden Werkstoffe und Bauelemente freigestellt, wenn die Substitution der Elemente technisch und wissenschaftlich nicht praktikabel ist bzw. aus ökologischer und verbraucherorientierter Sicht nicht zielführend erscheint. Hierzu legt die Richtlinie im Anhang eine Reihe von Ausnahmen fest, die der Auflage unterliegen, alle vier Jahre hinsichtlich des technologischen und wissenschaftlichen Fortschritts überprüft zu werden. Ein besonderes Anliegen der Kommission ist es, insbesondere die Verwendung von Decabromdiphenylether (Deca-BDE) sowie Quecksilber in stabförmigen Leuchtstofflampen für besondere Verwendungszwecke, Blei in Lötmitteln für Server, Speichersysteme und Storage-Array-Systemen sowie Netzinfrastrukturausrüstungen für Vermittlung, Signalverarbeitung, Übertragung und Netzmanagement im Telekommunikationsbereich sowie Glühlampen vorrangig zu evaluieren [122], da diese am ehesten verzichtbar erscheinen. Bei Verstoß gegen die durch die RoHS

vorgegebenen Regelungen obliegt es den Mitgliedsstaaten, über innerstaatliche Vorschriften Sanktionen gegen die Hersteller festzulegen.

2.4 Maßnahmen in Deutschland

Nachdem die EU-Richtlinien „Waste of Electric and Electronic Equipment“ (WEEE) und „Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electric and Electronic Equipment“ (RoHS) am 13.02.2003 im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht wurden, hatten die EU-Mitgliedstaaten, wie bereits in Kapitel 2.2.1 dargestellt, bis 13.08.2004 Zeit, entsprechende Verwaltungs- und Rechtsvorschriften zur Umsetzung der Richtlinien zu erlassen. Im Juli 2004 reagierte das Bundesumweltministerium auf die Anforderung, indem es dem Bundesrat einen Referentenentwurf zur Umsetzung der genannten Richtlinien vorgelegte, welcher am 01.09.2004 durch Kabinettsbeschluss genehmigt wurde. Durch Veröffentlichung des „Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten“ (Elektro- und Elektronikgesetz – ElektroG) [125] am 23.03.2005 im Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2005, Teil 1, Nr. 17 wurde dieses für die Bundesrepublik Deutschland rechtskräftig.

Damit folgt das Bundesumweltministerium im Wesentlichen den Vorgaben der WEEE und RoHS. Gleichzeitig legt es mit den Richtlinien die Anforderungen an die Produktverantwortung, die in § 22 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes verlangt wird, detailliert fest. Begriffsbestimmungen zu Altgeräten, privaten Haushalten und der Verwertung bzw. Beseitigung im Sinne des ElektroG folgen ebenfalls den im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vorgegebenen Definitionen, die im Einklang mit WEEE und RoHS stehen.

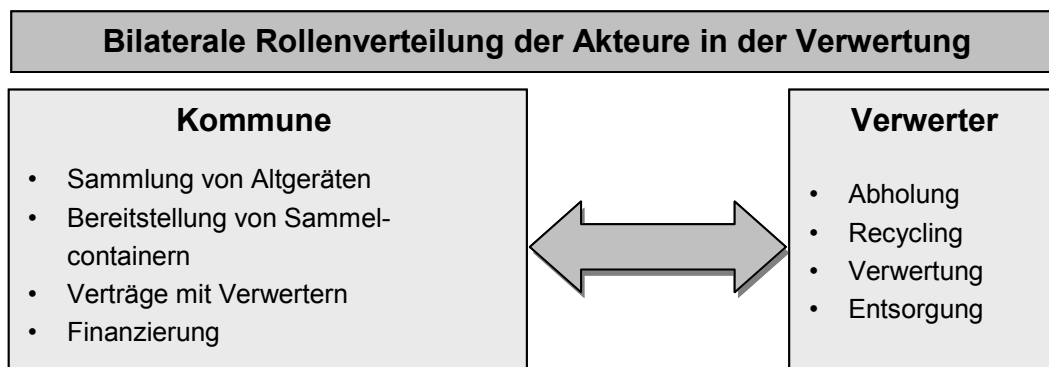


Bild 8: Akteure und Aufgabenverteilung bei der Elektroaltgeräteverwertung vor Einführung des ElektroG

Vor Einführung des ElektroG oblag die Verantwortung zur Behandlung von Elektroaltgeräten den Kommunen und Verwertungsunternehmen. Im Rahmen von Sperrmüllsammungen oder durch Abgabe der Elektroaltgeräte auf Verwertungshöfen kamen die Kommunen der Sammelverantwortung nach. Diese beauftragten den Verwerter zur Abholung und Behandlung der Geräte entsprechend technologisch optimaler Möglichkeiten.

Die Finanzierung der Sammlung erfolgte über gängige Abfallgebührensyste-me. Dem Hersteller oblag bei dieser Regelung keinerlei Verantwortung in der Akteurskette.

Mit Einführung des ElektroG verschieben sich einerseits die Aufgaben innerhalb der Entsorgungskette, andererseits wurde die Einführung einer neutralen Stelle, dem so genannten Elektro-Altgeräte Register (EAR) notwendig. Bereits am 02.06.2003 wurde das EAR seitens des Zentralverbandes Elektrotechnik und Elektronikindustrie (ZVEI) und des Bundesverbandes Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) als Projektgesellschaft gegründet und am 19.08.04 als rechtskräftige Stiftung anerkannt. Sie stellt als unabhängige Organisation die „Gemeinsame Stelle“ dar, zu deren Aufgaben es gehört, branchenübergreifend und unter Berücksichtigung des Wettbewerbs die Umsetzung der WEEE mit allen erforderlichen Maßnahmen durchzuführen, d. h. eine Registrierungs- und Koordinierungsstelle aufzubauen.

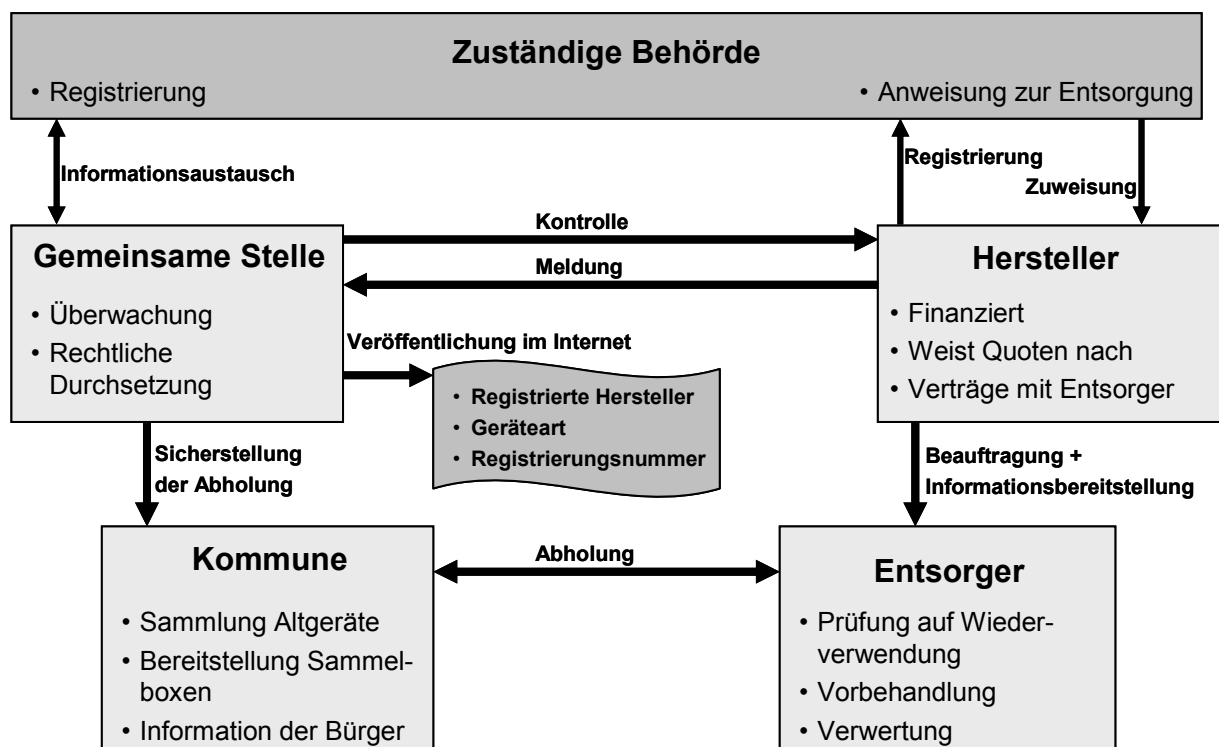


Bild 9: Organigramm nach Einführung des ElektroG

Neben der Gemeinsamen Stelle tritt das Umweltbundesamt als zuständige Aufsichtsbehörde auf. Beiden gemeinsam obliegt die Verantwortung der EU-konformen Umsetzung des ElektroG in Deutschland.

Die praxisgerechte Implementierung des ElektroG in Deutschland sieht vor, bestehende Sammel- und Verwertungssysteme bestmöglich zu nutzen und gleichzeitig dem Hersteller die Entsorgungsverantwortung zu übertragen. Das dabei entstandene Modell legt, wie in Bild 9 dargestellt, eine Trennung der Verantwortung für Sammlung und Entsorgung der Elektroaltgeräte durch die Kommunen und Hersteller fest. Das bedeutet, dass die Kommunen nach wie vor ihre Kapazitäten zur Sammlung der Altgeräte bereitstellen, wohingegen die Hersteller die Entsorgungsverantwortung übernehmen. Dadurch kommen die Kommunen einerseits ihrer durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

vorgegebenen Verpflichtung zur Daseinsvorsorge nach, gleichzeitig werden bestehende, kommunale Infrastrukturen, die dem Verbraucher durch bereits etablierte Sammelsysteme vertraut sind, effizient genutzt. Mit Übernahme der Entsorgungsverantwortung durch den Hersteller und Einführung der Gemeinsamen Stelle entstehen neue Pflichten und Aufgabenverteilungen für die am Entsorgungsprozess beteiligten Akteure, welche im Weiteren zusammengefasst werden.

2.4.1 Die Position der Öffentlich Rechtlichen Entsorger

Waren die Öffentlich Rechtlichen Entsorger (ÖRE) bislang für die Sammlung und Verwertung der Elektroaltgeräte zuständig, beschränken sich Ihre Pflichten mit Einführung des ElektroG auf die Sammlung der Altgeräte und die Information der Bürger über die zur Verfügung stehenden Rückgabemöglichkeiten, welche als Bring-, Hol- oder kombinierte Systeme eingerichtet werden können.

Kategorien nach WEEE (EU-Ebene)	Kategorien nach ElektroG (Deutschland)
1. Haushaltsgroßgeräte	1. Haushaltsgroßgeräte, automatische Ausgabegeräte
2. Haushaltskleingeräte	2. Kühlgeräte
3. IT- und Telekommunikationsgeräte	3. Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik
4. Geräte der Unterhaltungselektronik	4. Bildschirmgeräte (Fernsehgeräte und Monitore)
5. Beleuchtungskörper	5. Gasentladungslampen
6. Elektrische und elektronische Werkzeuge	6. Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, medizinische Geräte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente
7. Spielzeug, Sport- und Freizeitgeräte	
8. Medizinische Geräte	
9. Überwachungs- und Kontrollinstrumente	
10. Automatische Ausgabegeräte	

Tabelle 3: Sammelkategorien der WEEE und deren Umsetzung in Deutschland

Abweichend von der EU-Richtlinie werden in Deutschland lediglich sechs Sammelboxen vorgegeben, die in Tabelle 3 denen der WEEE gegenübergestellt werden.

Ein Vergleich mit Tabelle 1 zeigt, dass in Deutschland die Gerätekategorien, die über gleiche Verwertungsquoten verfügen, zusammengelegt wurden. Zusätzlich werden aus dem Bereich der Haushaltsgroßgeräte die Kühlgeräte sowie Bildschirmgeräte und Gasentladungslampen getrennt gesammelt, da diese einer gesonderten Behandlung unterliegen. Die Geräte der Kategorie 1 bis 4 werden ab einer gesammelten Menge von 30 m³ je Gruppe, die der Kategorie 6 ab 15 m³ und die der Kategorie 5 bereits ab 3 m³ seitens der ÖRE zur Abholung an die Gemeinsame Stelle gemeldet.

2.4.2 Die Rolle der Hersteller im ElektroG

Die Einführung der Herstellerverantwortung für die Entsorgung der Elektroaltgeräte bedingt, dass sich die Hersteller zunächst bei der zuständigen Behörde, dem Umweltbundesamt, unter Angabe der von ihnen produzierten Gerätearten registrieren lassen müssen. Die Registrierungsnummer hat der Hersteller in seinem schriftlichen Geschäftsverkehr zu führen und sich somit ordnungsgemäß auszuweisen.

Für die in privaten Haushalten genutzten und nach 13.08.2005 in Verkehr gebrachten Geräte ist jährlich eine insolvenz sichere Garantie zur Entsorgungsfinanzierung zu stellen. Dies kann z. B. in Form einer Versicherung, eines gesperrten Bankkontos etc. erfolgen. Nachträglich umgesetzte Übergangsfristen sind Bild 10 zu entnehmen.

Der Hersteller ist verpflichtet, die ihm seitens der zuständigen Behörde zugewiesenen Behältnisse mit Altgeräten aus privaten Haushalten unverzüglich abzuholen und der weiteren Behandlung zuzuführen. Dies kann neben der Entsorgung ebenfalls die Wiederverwendung und Verwertung bedeuten.

Die Kosten für die Entsorgung der Altgeräte, die vor Inkrafttreten der Richtlinie (13.08.2005) in Verkehr gebracht wurden, können für einen gewissen Zeitraum, der von der jeweiligen Kategorie abhängt, vom Hersteller beim Verkauf von Neugeräten gegenüber dem Kunden ausgewiesen werden. Die Fristen betragen bei Kategorie 1 (Tabelle 1) bis 13.02.2013, bei alle anderen Kategorien bis 13.02.2011.

Zur Ermittlung der Verwertungsverantwortung je Hersteller ist dieser verpflichtet, der Gemeinsamen Stelle monatlich die von ihm in Verkehr gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte zu melden. Nachdem sich daraus die Quote der zu verwertenden Altgeräte berechnet, muss der Hersteller darüber hinaus durch Angabe der von ihm im Laufe eines Jahres bei Öffentlich Rechtlichen Entsorgern oder in eigenen Systemen gesammelten Altgeräte seine Verwertungspflicht dokumentieren. Hierzu sind die Menge der wieder verwendeten, der stofflich verwerteten, der verwerteten und der ausgeführten Altgeräte auszuweisen. Die Angabe hat vorrangig in Gewicht zu erfolgen, einer Größe, die von den Herstellern bislang im Rahmen ihrer Prozessdaten nicht dezidiert erfasst wurde. Sollte die Angabe des Gewichts nicht möglich sein, genügt es ebenfalls, die Anzahl der Geräte oder einen auf Schätzungen beruhenden Wert anzugeben.

Gegenüber den Verwertern haben die Hersteller Informationen zur Behandlung der je Typ in Verkehr gebrachten Geräte innerhalb eines Jahres bereitzustellen, sofern dies zur Verwertung zweckmäßig ist. Diese müssen sowohl Bauteile als auch Werkstoffe angeben sowie Ort und Zugänglichkeit gefährlicher Stoffe.

Im Bereich der B2B-Geräte liegt die Entsorgungspflicht und somit die Übernahme der Kosten unmittelbar beim Hersteller, sofern das Gerät nach dem 13.08.2005 in Verkehr gebracht wurde. Der direkte Kontakt zwischen Hersteller und Kunde bedingt ebenfalls, dass keine Garantien für B2B-Geräte zu stellen sind und diese auch keiner Kennzeichnungspflicht unterliegen. Für ältere Geräte ist der Nutzer selbst für die Verwertung und Kostenübernahme verantwortlich, wobei abweichende Vereinbarungen beider Parteien

getroffen werden können, solange die Entsorgung der Geräte gesetzeskonform stattfindet.

Bei Zuwiderhandlung der Hersteller gegen die Vorgaben des ElektroG sind abhängig vom Delikt Geldbußen in Höhe von 10.000,- € bzw. 50.000,- € vorgesehen.

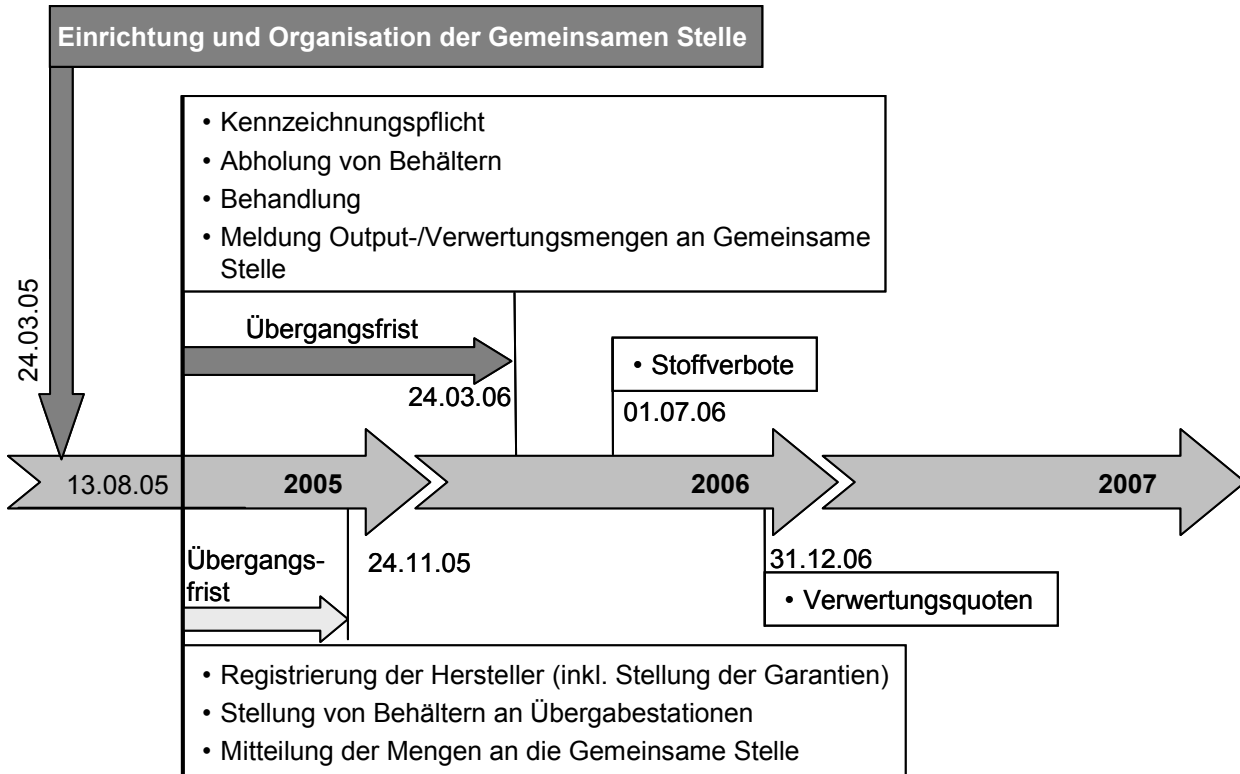


Bild 10: Zeitschiene der umzusetzenden Herstellerverpflichtungen im Rahmen des ElektroG

Eine über die Entsorgungspflicht hinausgehende Anordnung des ElektroG beschäftigt sich mit der Produktkonzeption. Der Hersteller wird nach § 4, Satz 1 des ElektroG dazu angehalten, seine Produkte „so zu gestalten, dass die Demontage und die Verwertung, insbesondere die Wiederverwendung und die stoffliche Verwertung von Altgeräten, ihren Bauteilen und Werkstoffen, berücksichtigt und erleichtert werden“. Mit Aufnahme des § 4 in das ElektroG geht die Bundesregierung über die Forderungen der WEEE hinaus und stellt Weichen für eine nachhaltige Produktentwicklung im Sinne der Integrierten Produktpolitik.

2.4.3 Funktion der Gemeinsamen Stelle

Die Gemeinsame Stelle wurde am 19.08.2004 als Stiftung Elektro-Altgeräte-Register (EAR) gegründet. Als neutrale Organisation unterstützt sie die zuständige Behörde (Umweltbundesamt) bei der Umsetzung des ElektroG hinsichtlich der Vorgaben zur Elektroaltgeräteverwertung. Zur Wahrung der ihr übertragenen Aufgaben wird die Stiftung mit Hoheitsrechten beliehen, die sie dazu befähigt, die ihr übertragenen Aufgaben

gegenüber Herstellern durchzusetzen, ohne gerichtliche Maßnahmen einleiten zu müssen.

Die Beleihung einer privaten Organisation bedeutet, ihr Staatsaufgaben zu übertragen und die Wahrnehmung von Verwaltungsaufgaben in den Handlungsformen des öffentlichen Rechts zu ermöglichen.

Nach Registrierung der Hersteller bei der zuständigen Behörde ermittelt die Gemeinsame Stelle die von jedem Hersteller bei den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern abzuholende Menge Elektroaltgeräte und übermittelt diese an die zuständige Behörde.

Anhand der seitens der Hersteller und Verwerter übermittelten Daten erstellt die Stiftung bis zum 01. Juli eines jeden Jahres eine Vorjahresübersicht, die sie ebenfalls an die zuständige Behörde übermittelt. Sie enthält Informationen zu folgenden Daten:

- Erstellung eines Verzeichnisses aller registrierten Hersteller,
- Erfassung der von sämtlichen Herstellern je Kategorie in Verkehr gebrachten Elektrogeräte,
- Menge der von den Herstellern bei Öffentlich Rechtlichen Entsorgern bzw. von eigenen oder alternativen Sammelsystemen abgeholten Altgeräte,
- Menge der wieder verwendeten, der stofflich verwerteten und der in weiterer Art verwerteten Altgeräte,
- Menge der von den Herstellern ausgeführten Altgeräte.

2.5 Weiterführende politische Maßnahmen zur nachhaltigen Produktentwicklung

Mit Verabschiedung der Richtlinien „Waste of Electric and Electronic Equipment“ und „Restriction of the Use of certain Hazardous Substances in Electric- and Electronic Equipment“ hat die Europäische Union erste Schritte für eine ökologische Behandlung elektrischer und elektronischer Geräte sowohl in der Produktentwicklungs- als auch der -verwertungsphase in die Wege geleitet.

Diese Maßnahmen sind allerdings nicht ausreichend, um einen nachhaltigen Produktlebenszyklus, der die Phasen der Entwicklung, Nutzung und Verwertung beinhaltet, zu erzielen.

Daher setzt die Europäische Union auf weiterführende Schritte, die zum Teil auf freiwilligen Handlungen der Hersteller basieren.

2.5.1 Die EU-Chemikalienpolitik

Aufbauend auf den Vorgaben der RoHS bereitet die Europäische Union eine Neugestaltung der Chemikalienpolitik vor. Der Vorschlag einer Richtlinie zur „Registration, Evalua-

tion, Authorisation and Restriction of Chemicals“ (REACH) [148] sieht vor, rund 30.000 Chemikalien einer Registrierung zu unterziehen, wobei deren Anwendungsbereiche erfasst werden, sobald die hergestellte Menge der betrachteten Chemikalien mehr als eine Tonne pro Jahr beträgt. Insbesondere besorgniserregende Stoffe unterliegen einer Zulassungspflicht. Neben der Herstellung sollen der Import und die Verwendung aller Stoffe entlang des gesamten Lebensweges und für alle Anwendungsbereiche erfasst werden (Bild 11). Dies bedeutet weit reichende Maßnahmen für alle Produkte und Prozesse der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, da hier der Einsatz chemischer Substanzen wesentlicher Faktor für die gesamte Produktpalette ist.

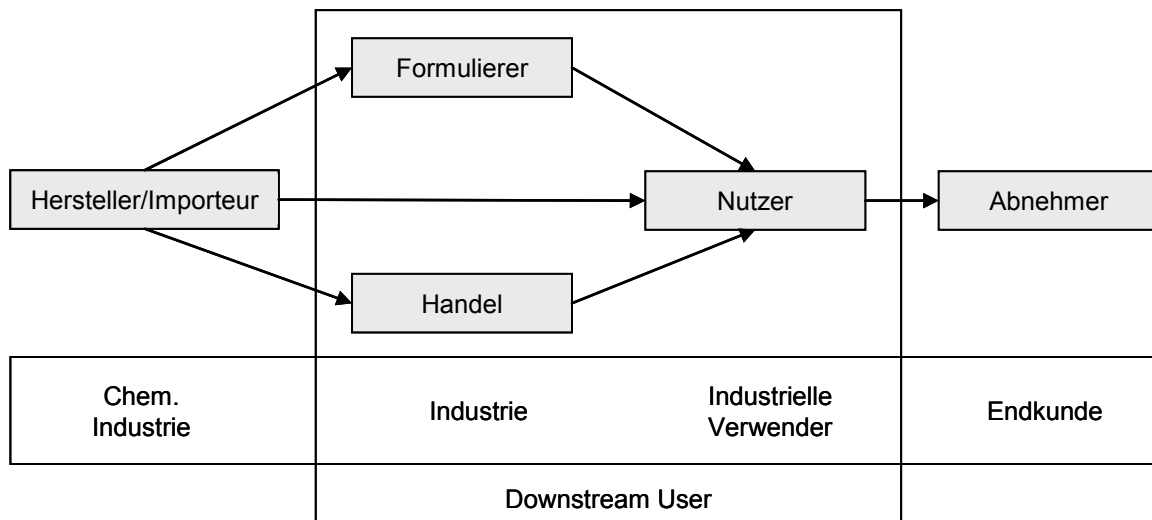


Bild 11: Von den Anforderungen der REACH betroffene Akteure

Neben der Offenlegung vertraulicher Daten bezüglich der Verwendung chemischer Substanzen führt ebenfalls der Aufwand zur Bereitstellung der Informationen zu Einwänden der betroffenen Industriezweige. Abhängig von der Gestaltung der Zulassungspflicht besonders gefährlicher Substanzen werden Innovationsprozesse als gefährdet angesehen. Weiterhin kann sich die Registrierung von Produktneuentwicklungen als zeitverzögernder Faktor bei der Markteinführung auswirken. Die mit Umsetzung der REACH entstehenden Kosten werden ebenfalls seitens des ZVEI kritisiert, da sich insbesondere in schnelllebigen Märkten wie der Chipindustrie sowohl Kostenzuwächse als auch Registrierungsmaßnahmen als ein Wettbewerbsnachteil der europäischen Industrie gegenüber der weltweiten Konkurrenz erweisen können [47].

Zur endgültigen Auslegung der Richtlinie besteht demnach noch wesentlicher Diskussionsbedarf, um die Ziele der REACH ökologisch nutzbringend und gleichzeitig für die Industrie praktikabel und wirtschaftlich zu gestalten.

2.5.2 Rahmenrichtlinie für energiegetriebene Produkte

Mit Umsetzung der WEEE hat die Europäische Union erste Schritte zu einer ganzheitlichen Produktgestaltung in die Wege geleitet. Nachdem diese Richtlinie primär die Ver-

wertung der Elektroaltgeräte fokussiert, zielt ein neuer Ansatz der EU auf die umweltverträgliche Produktgestaltung ab.

Ausgehend davon, dass bereits 80% aller von einem Produkt ausgehenden Umweltwirkungen in der Entwurfsphase bestimmt werden [112], hat diese einen wesentlichen Stellenwert im Rahmen des gesamten Produktlebenszyklus. Darauf basierend hat die Europäische Union im August 2003 einen Vorschlag für eine Rahmenrichtlinie erlassen, der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte festlegt und bis 01.07.2006 in nationales Recht umgesetzt werden soll.

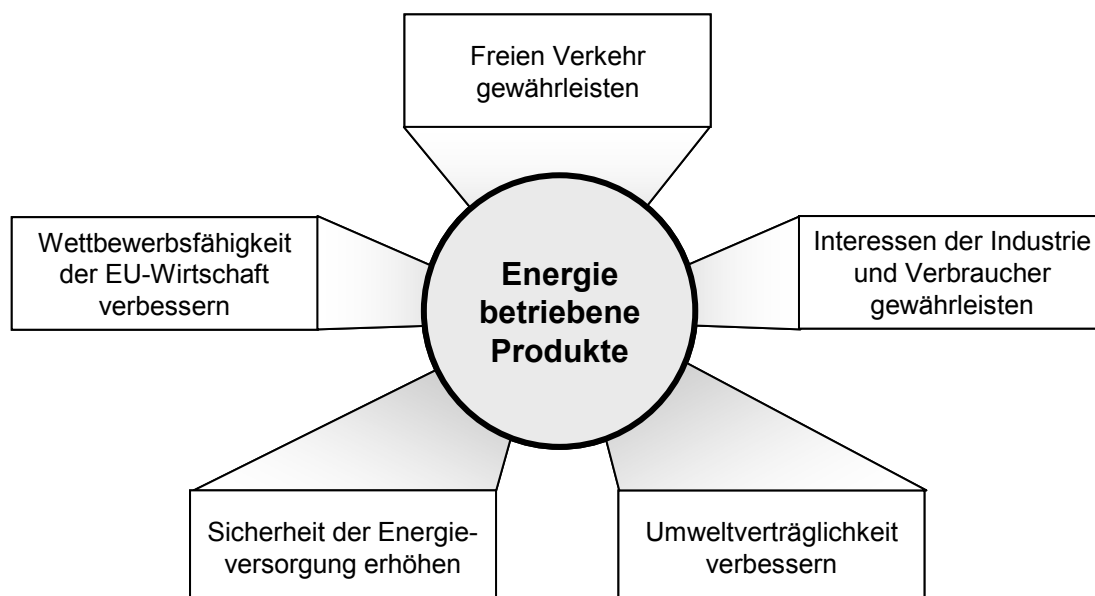


Bild 12: Ziele des EU-Richtlinienvorschlags Energy-Using Products (EUP)

Mit dem Richtlinienvorschlag „Proposal for a directive of the European Parliament and of the council on establishing a framework for the setting of Eco-design requirements for Energy-Using Products and amending Council Directive 92/42/EEC“ (EUP) [149] möchte die Europäische Union die von energiebetriebenen Produkten verursachten Umweltbelastungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus minimieren. Dies kann nur erlangt werden, indem der nachhaltigen Produktentwicklung höhere Priorität eingeräumt wird, da langfristige Perspektiven die Notwendigkeit der Ressourcenschonung verbunden mit verantwortungsbewusstem ökologischem und ökonomischem Handeln deutlich machen. Die von Produkten ausgehenden Umweltbelastungen müssen demnach gemindert und durch Reduktion des Energieverbrauchs während der Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsphase der Geräte ein Beitrag zur Sicherung der Energieversorgung geleistet werden. Um diesem Ansatz gerecht zu werden, fokussiert der Richtlinienentwurf einschneidende Maßnahmen in der Produktfertigung. Die Offenlegung prozessrelevanter Daten ist dabei notwendig, um eine Transparenz hinsichtlich Schwachstellen entlang des gesamten Lebenszyklus aufzuzeigen. Die allgemeinen Ziele der Richtlinie werden in Bild 12 dargestellt.

In den Geltungsbereich der Rahmenrichtlinie fallen prinzipiell alle Produkte, zu deren Funktion Energie notwendig ist. Dabei finden in besonderem Maße diejenigen Berück-

sichtigung, die in großen Stückzahlen in der EU vertrieben werden und somit einen wesentlichen Beitrag zu relevanten Umweltwirkungen leisten. Zunächst stehen Geräte aus privaten Haushalten im Vordergrund, da diese sowohl eine weite Verbreitung als auch einen Mangel an umweltrelevanten Kenndaten aufweisen. Die Rahmenrichtlinie basiert auf freiwilligen Maßnahmen der Hersteller. Gleichzeitig ermöglicht sie der Europäischen Gemeinschaft, rechtsverbindliche Maßnahmen mit konkretem Anforderungsprofil zu erlassen, so genannte Durchführungsmaßnahmen (Bild 13), falls Trittbrettfahrer überhand nehmen oder die Industrie den Möglichkeiten zur Selbstverpflichtung in nicht ausreichendem Maße nachkommt.

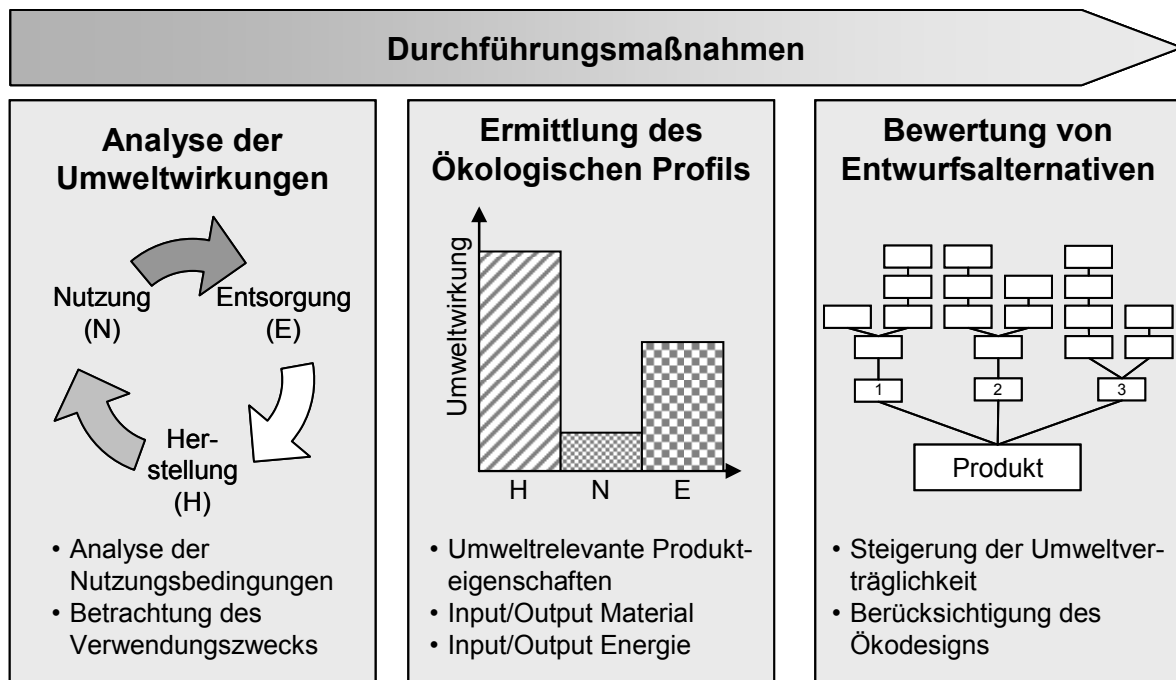


Bild 13: Durchführungsmaßnahmen zur Umsetzung der EUP zu Produktlebenszyklusanalysen

Die Rahmenrichtlinie konzentriert sich auf das Ökodesign der Produkte, da die Hersteller über den Entwicklungsprozess den maßgeblichen Einfluss auf die Energieeffizienz der Produkte nehmen können. Zur Steigerung des umweltrelevanten Potenzials eines Gerätes ist es somit notwendig, eine Produktlebenszyklusanalyse vom Hersteller durchführen zu lassen. Über Regelungen hinsichtlich des Inverkehrbringens der Geräte wird eine Harmonisierung der Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung angestrebt. D.h., der Hersteller hat die Aufgabe, die umweltrelevanten Merkmale seines Produktes, die bereits während des Produktentwurfs maßgeblich gestaltet werden können, über den gesamten Produktlebensweg in Form von ökologischen Profilen zu dokumentieren (Bild 14). Die dabei ermittelten Ergebnisse tragen zur Entwicklung von Produktvarianten bei und nehmen somit Einfluss auf die Gestaltung von Produkten weiterer Generationen. Auf diese Art und Weise wird eine ökologische Optimierung entlang des gesamten Produktlebenszyklus angestrebt, so dass eine Verschleppung umweltrelevanter Wirkungen von einer Lebensphase in die nächste verhindert wird.

Die Vorgaben der EUP sind in Anhang I der Richtlinie klar definiert. Die Analysen sind demnach für die Beschaffung des Rohmaterials, die Fertigung, die Verpackung, Transport und Vertrieb sowie Installation und Wartung durchzuführen.

Weiterhin erstreckt sie sich über die Nutzung und Entsorgung der Geräte. Über jede der Phasen sind Aussagen hinsichtlich der folgenden Kriterien zu treffen [149]:

- Material- und Energieverbrauch sowie andere Ressourcen wie Wasser,
- Immissionen in Luft, Boden und Wasser,
- Umweltbelastungen durch Schall, Schwingungen, Strahlung und elektromagnetische Felder,
- Abfallstoffe,
- Möglichkeiten der Wiederverwendung, des Recyclings und der Verwertung.

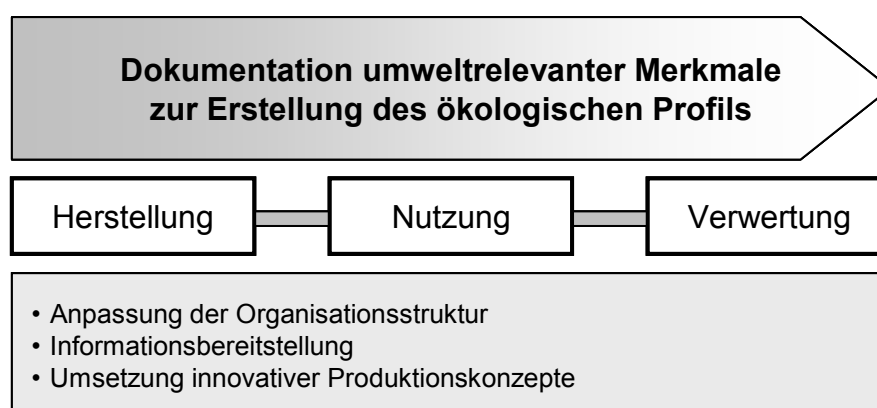


Bild 14: Herstelleranforderungen zur Entwicklung ganzheitlicher Produkte

Diese Daten, die im Rahmen einer Ökobilanz ermittelbar sind, sollen die voraussichtlich auftretenden Belastungen erfassen. Die Erstellung der Datenbasis wird insbesondere für den Beginn der Umsetzung der Richtlinie als arbeits- und kapitalintensiv angesehen. Dabei dürfen die zur Ermittlung des ökologischen Profils eines Produktes anfallenden Kosten nicht übermäßig hoch sein. Der angestrebte ökonomische Nutzen entsteht aus der Differenz der alten und neuen Produkte und sollte aufgrund der schnell wachsenden Datenbasis, die sich im Laufe der Zeit entwickeln wird, zügig erreichbar sein. Eine Umstellung auf nachhaltiges Produktdesign wird eine Minderung der Fertigungskosten nach sich ziehen. Weiterhin wird die Entsorgung, die durch die WEEE an Bedeutung gewonnen hat, durch eine recyclinggerechte Produktstruktur kostengünstiger werden.

Die Vergabe eines EG-Umweltzeichens kennzeichnet solche Produkte, die sich durch ihre Umweltverträglichkeit auszeichnen und die für sie geltenden und durch die EUP vorgeschriebenen Durchführungsmaßnahmen erfüllen. Mittels einer Konformitätserklärung sichert der Hersteller weiterhin zu, dass seine Produkte den Anforderungen zum Inverkehrbringen genügen.

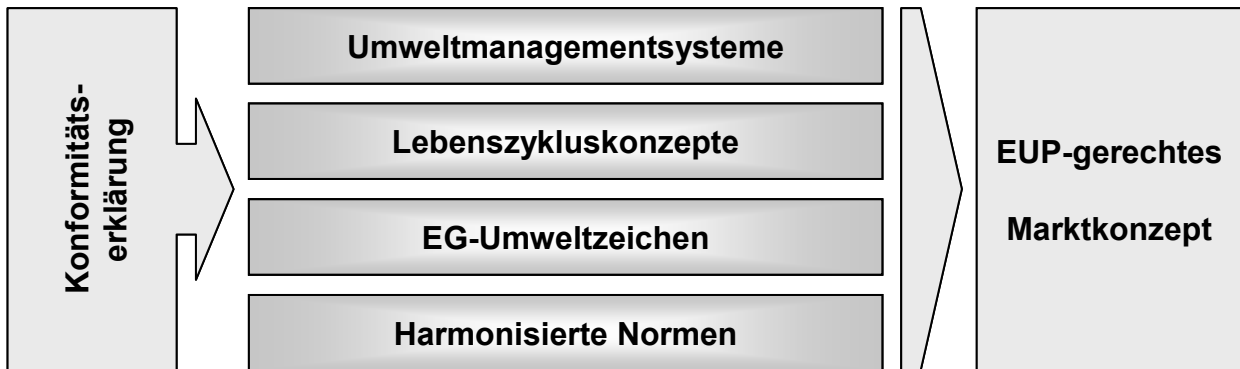


Bild 15: Maßnahmen zur Erlangung der Konformitätserklärung vor Inverkehrbringung eines Produktes

Sobald ein Produkt einem der in Bild 15 genannten Kriterien folgend gefertigt wurde, wird davon ausgegangen, dass es den Anforderungen der Konformitätserklärung genügt und somit auf dem europäischen Markt verkauft werden darf.

Mit Umsetzung der EUP setzt die Europäische Union erstmalig Maßnahmen zur Einführung einer Integrierten Produktpolitik um, welche das Ziel hat, die von Produkten und Prozessen ausgehenden Umweltwirkungen zu verringern. Auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten, rechtlichen Grundlagen wird die Integrierte Produktpolitik als Instrument eingeführt und deren ökologisches und ökonomisches Optimierungspotential anhand von Praxisbeispielen aufgezeigt.

3 Ganzheitliche Produktoptimierung durch Integrierte Produktpolitik

Die heutige Produktentwicklung obliegt nicht mehr allein der Verantwortung des Herstellers, sondern wird ebenfalls stark durch gesellschaftspolitische Faktoren beeinflusst. Die unterschiedlichen Interessen der am Produktlebenszyklus beteiligten Akteure und die differenzierten Anforderungen der Produktphasen (Bild 16) sind nicht mehr unabhängig voneinander zu betrachten, sondern ganzheitlich zu analysieren. Lag früher der Fokus auf einem rein kostenoptimierten Fertigungsprozess, so spielen heutzutage Einflüsse der Nutzungs- und insbesondere der Verwertungsphase eine wesentliche Rolle. Weiterhin hat neben der Ökonomie ebenfalls die Ökologie an bedeutenden Einfluss gewonnen. Dieser spiegelt sich u. a. auch in einer Reihe rechtlicher Vorschriften wider.

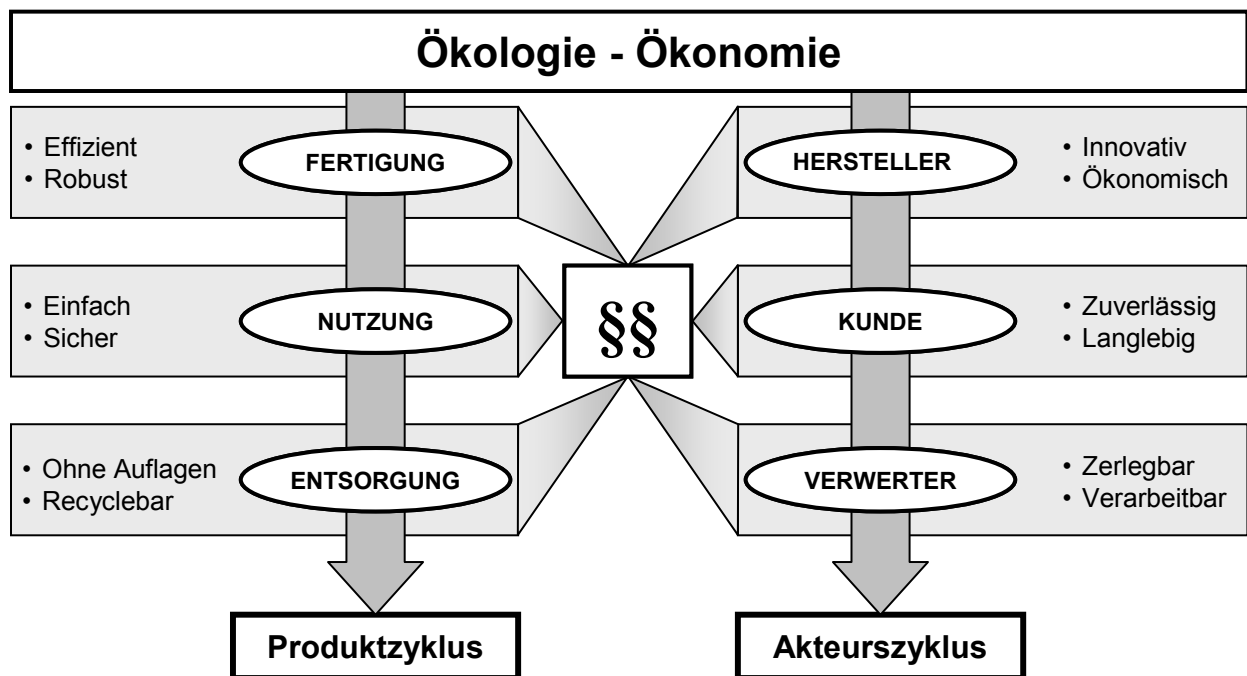


Bild 16: Anforderungen der Akteure und Produktzustände an den Produktlebenszyklus

Bezogen sich - wie bereits in Kapitel 2 dargestellt - viele der rechtlichen Vorschriften auf den nachsorgenden Umweltschutz der einzelnen Produktlebensphasen, findet heutzutage ein Wandel statt und der Systemgedanke tritt immer mehr in den Vordergrund. Das bedeutet, es werden nicht mehr die singulären Wirkungen einzelner Phasen betrachtet, sondern deren Gesamtheit über den vollständigen Produktlebenszyklus.

Die Forderungen nach ganzheitlicher Produkt- und Prozessanalyse resultieren einerseits aus Ansätzen der Politik, andererseits liegen sie ebenfalls im Interesse der Industrie, da eine ökologisch sinnvolle Produkthandhabung ebenfalls ökonomische Vorteile hervorbringen kann [20]. Die in Kapitel 2 beschriebenen, seitens der Europäischen Union vorgegebenen Gesetzesvorschriften verdeutlichen die politische Entwicklung hin zur ganzheitlichen Produktbetrachtung im Sinne einer nachhaltigen Umweltpolitik. Übergreifend über diese Regularien verfolgt die Integrierte Produktpolitik Bestrebungen, Maß-

nahmen auf freiwilliger Basis zur Bereitstellung umweltfreundlicher Produkte durchzuführen. Die wachsende Bedeutung und das Potenzial der Integrierten Produktpolitik sowie Instrumente zur deren effektiven Umsetzung werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

3.1 Ziele und Ansätze Integrierter Produktpolitik

Seit Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes im Jahr 1994 fand eine stetige Entwicklung der Entsorgungspolitik auf nationaler sowie europäischer Ebene statt. Globaler Handel von Produkten erfordert ebenfalls die Entwicklung gemeinschaftsstaatlicher Maßnahmen. Daher wurde bereits, wie die Zeitachse in Bild 17 zeigt, im Jahr 2001 die Notwendigkeit seitens der Europäischen Union erkannt, Strategien für eine ganzheitliche Produktbehandlung durchzuführen.

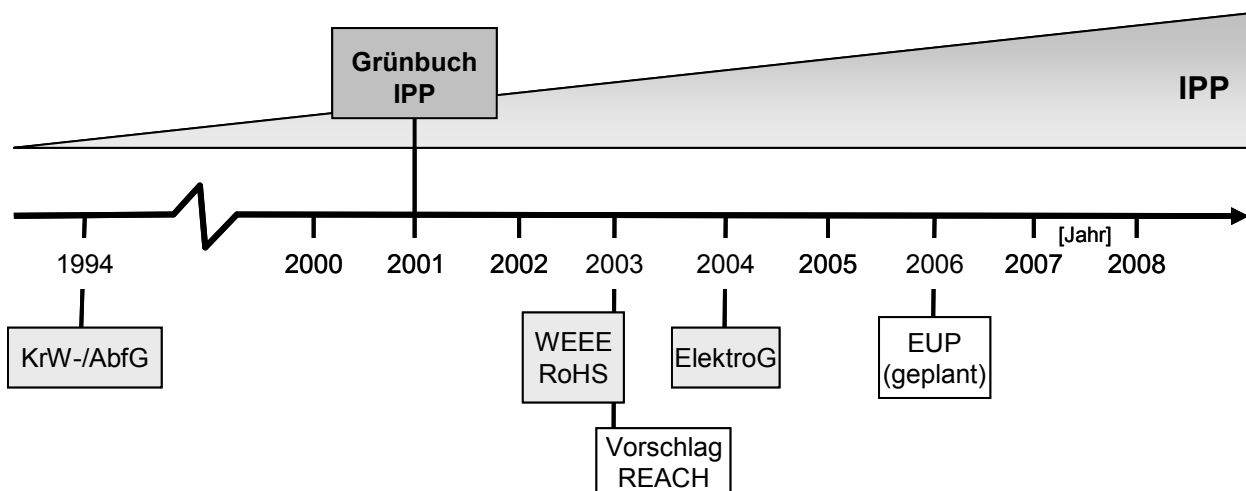


Bild 17: Zeitliche Entwicklung der Einführung EU-rechtlicher Gesetzesvorgaben zur ökologischen Produkt- und Prozessoptimierung

Im Februar 2001 veröffentlichte die Kommission der Europäischen Gemeinschaften ein Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik (IPP) [59]. Inhalt dieses Grünbuches ist ein „Vorschlag für eine Strategie zur Stärkung und Neuorientierung produktbezogener umweltpolitischer Maßnahmen mit dem Ziel, die Entwicklung eines Markts für umweltfreundlichere Produkte zu fördern“ [59]. Wesentlicher Ansatz des Grünbuches ist, ergänzend zu bereits bestehenden, umweltpolitischen Maßnahmen, auf den Produktlebenszyklus einzuwirken, um bislang ungenutzte Potenziale für Produkte und Dienstleistungen hinsichtlich nachhaltiger Produktstrategien gewinnbringend umzusetzen. Dabei existiert keine exakte Vorgabe, wie Integrierte Produktpolitik bestmöglich anzuwenden ist. Abhängig von der betrachteten Produktkategorie sind entsprechende Mechanismen zu wählen, so dass über eine Feinabstimmung der individuellen Instrumente die Zielsetzung der Integrierten Produktpolitik, ökologisch und ökonomisch gewinnbringend zu wirken, erfüllt werden kann.

Hauptakteure im Sinne der IPP sind einerseits die Hersteller, andererseits die Verbraucher. Nachdem bereits in der Entwicklungsphase die Weichen für im Laufe eines Produktlebens auftretende Umwelt- und Energieströme gelegt werden [112], ist es Pflicht der Hersteller, ein Bewusstsein für derartige Stoffströme zu schaffen, um zukunftsweisend verantwortlich an Mensch und Umwelt zu handeln [19]. Der Einsatz der Hersteller kann allerdings nur durch aufgeklärte Verbraucher honoriert werden, deren Produktkenntnisse umweltspezifisch geschult wurden, so dass sie eine unabhängige, verantwortungsbewusste Kaufentscheidung treffen sowie Geräte umweltgerecht handhaben und entsorgen können. Nachdem sich die Herstellerverantwortung aktueller Gesetzgebung folgend über den gesamten Produktlebenszyklus, insbesondere die Fertigung und Verwertung, erstreckt, trägt der Kunde primär die Verantwortung für die Nutzungsphase und die Entsorgung der Altgeräte, sprich deren Abgabe beim Verwerter (Bild 18).

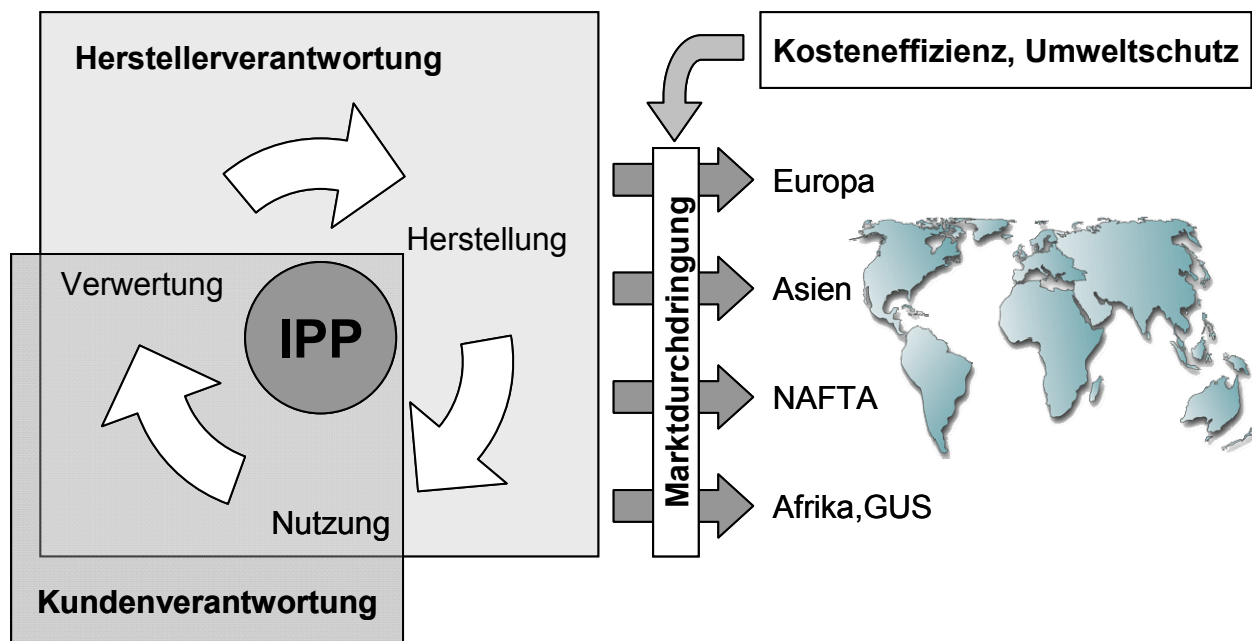


Bild 18: Akteursverantwortung im Sinne der Integrierten Produktpolitik

Der europäische Anstoß zur Umsetzung nachhaltiger Produktstrategien hat einen internationalen Wettbewerbsvorteil zum Ziel: Die optimierte Umsetzung bestehender Regelungen zur Entwicklung eines ökologisch und ökonomisch sinnvollen Produktkonzepts in Europa soll sich ebenfalls auf dem Weltmarkt durchsetzen. Erste Erfolge zeigen sich bereits im internationalen Umfeld, da Länder wie die USA und China Richtlinien in Anlehnung an die WEEE und RoHS zur nachhaltigen Fertigung ihrer Produkte erlassen [18]. Da die Marktdurchdringung primär durch ökonomische Faktoren gesteuert wird, wird sie dem Wettbewerbsvorteil nachhaltig entwickelter Produkte im Sinne einer Integrierten Produktpolitik folgen. Der damit einher gehende Schutz der Umwelt zeichnet diesen Ansatz als zusätzliches Kriterium positiv aus.

Die Integrierte Produktpolitik wird durch ihren lebenszyklusübergreifenden Ansatz charakterisiert. Das heißt, die Einbeziehung aller mit dem betrachteten Produkt bzw. der Produktkategorie im Zusammenhang stehenden Umweltwirkungen finden bei dieser

Strategie Berücksichtigung. Der „Integrierte“ Ansatz beinhaltet darüber hinaus die Kombination unterschiedlicher Instrumente, die individuell auf das Produkt abgestimmt werden. Die produktlebenszyklusübergreifende Verantwortung spiegelt sich darin wider, dass sich die beteiligten Akteure über die Konsequenzen ihres Handelns bewusst sind und die Verlagerung umweltrelevanter Stoffströme in frühere oder spätere Phasen dem Nachhaltigkeitsgebot widerspricht. Insgesamt muss „das lebenszyklusbezogene Denken [...] in der gesamten Volkswirtschaft gefördert werden“ [59], welches dazu führt, dass neben dem Hersteller auch der Verbraucher seine übergeordnete Verantwortung erkennt und danach handelt. An dieser Stelle tritt die Bedeutung der interdisziplinären Kommunikation in den Vordergrund. Der integrierte Ansatz macht eine intensive Kommunikation innerhalb des fertigenden Unternehmens notwendig, um produktspezifisch definierte, ökologische Kennwerte ganzheitlich zu erfassen. Neben der direkten, firmeninternen Kommunikation ist die Kommunikation mit dem Kunden von hoher Bedeutung. Um den Kunden in den lebenszyklusorientierten Gesamtprozess einzubeziehen, müssen sowohl die Hersteller, als auch die Politik gezielt dem Verbraucher Informationen bereitstellen. Dies kann über Marketingstrategien und gezielte Werbung in Massenmedien erfolgen. Weiterhin bietet das Internet die Möglichkeit, produktspezifische Informationen dem Kunden vergleichbar darzustellen.

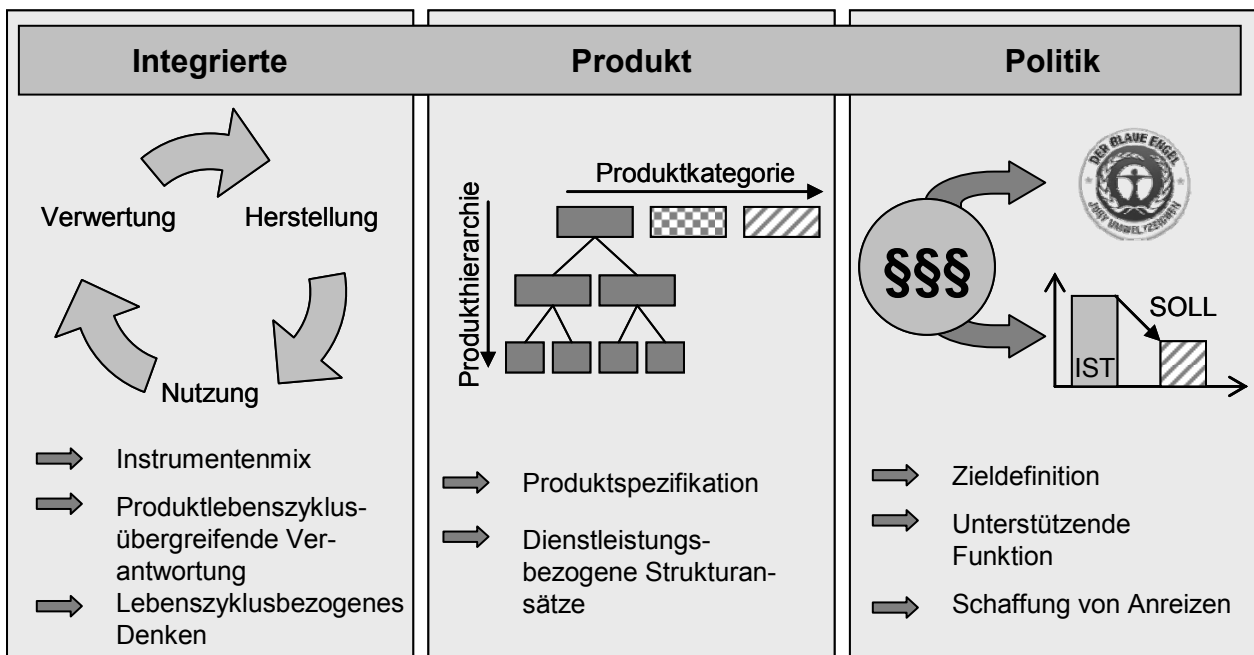


Bild 19: Zusammenfassung der Intention Integrierter Produktpolitik

Das Grünbuch der Integrierten Produktpolitik beschränkt sich nicht auf eine Auswahl von „Produkten“ oder Dienstleistungen, wie beispielsweise die EU-Richtlinien WEEE bezogen auf Elektrogeräte oder die REACH hinsichtlich des Chemikaliengesetzes. Vielmehr dient die Strategie der IPP der grundsätzlichen Reduktion der von Produkten und Dienstleistung ausgehenden umweltrelevanten Ströme. Erst bei Anwendung der Prinzipien auf definierte Produkte bzw. Produktkategorien können konkrete Maßnahmen entsprechend der Charakteristika zusammengestellt und erarbeitet werden, wie in den Ka-

piteln 4 bis 6 anschaulich anhand ausgewählter Produktkategorien und -beispiele demonstriert werden wird.

Die „Politik“ sieht sich im Zusammenhang mit IPP nicht als vorschreibendes Organ, sondern als unterstützende Behörde. Lediglich durch die Vorgabe definierter Ziele und durch die Entwicklung von Modellen, die der Industrie besondere Anreize zur ganzheitlichen Produktentwicklung bieten, trägt die Politik zu einer nachhaltigen Lösung umweltintegrierter Problemstellungen ausgehend von Produkten und Dienstleistungen bei. So könnte die Vergabe eines europäischen Umweltzeichens die Produkte auszeichnen, die den Prinzipien der IPP entsprechen.

Nutznieser der Integrierten Produktpolitik sind alle am Lebenszyklus beteiligten Parteien. Die Einführung einer nachhaltigen Produktpolitik erfordert beim Hersteller die Implementierung einer vorausschauenden Managementpraxis, die sich letztendlich in Form ökonomischer Wettbewerbsvorteile auszahlt. Beispielhaft seien die in Kapitel 5 aufgezeigten Aktivitäten im Bereich des Refurbishing genannt. Denn nur auf Grundlage innovativer Prozessentwicklungen kann sich ein ökologischer Strukturwandel durchsetzen. Aktivitäten lokaler Initiativen sind zu bündeln und positive Erfahrungen hinsichtlich praxisorientierter Umsetzung einzelner Strategien als Beispiele wirksamer Nachhaltigkeitsprinzipien aufzuzeigen.

Der Verbraucher erhält beim Kauf von Produkten eine umfassende Transparenz über das Vorhandensein ökologischer Kenndaten (Bild 20). Dadurch entsteht eine Vergleichbarkeit der Produkte hinsichtlich der von ihnen ausgehenden umweltrelevanten Wirksamkeit, so wie es bei „Weißer Ware“ durch Einführung von Ökolabels bereits umgesetzt wurde. Der Verbraucher kann somit über seinen Beitrag zum aktiven Umweltschutz frei und wissentlich entscheiden. Gleichzeitig kann er mit einer höheren Qualität der Produkte rechnen, die sich weiterhin durch eine längere Lebensdauer auszeichnen, so dass insgesamt - bezogen auf den Produktlebenszyklus - niedrigere Gesamtkosten entstehen.

Forschung und Entwicklung sind in Zusammenarbeit mit dem Hersteller gefordert, neue Produkt- und Fertigungsstrategien zu erarbeiten. Die Entwicklung des bislang ungenutzten ökologischen und ökonomischen Potenzials erfordert eine enge, interdisziplinäre Zusammenarbeit wissenschaftlicher Disziplinen wie Konstruktion, Fertigung, Analytik, Mechanik, Elektronik, etc., die durch kompetentes Fachwissen in Forschungseinrichtungen fundiert geboten werden.

Nachdem durch die Politik Rahmenbedingungen zur Umsetzung der IPP festgelegt werden, ermöglicht dies unabhängigen Organisationen, Grundlagen für die neutrale Bewertung der Produkte oder Produktkategorien umzusetzen. Diese Informationsbasis ist wesentlicher Grundstein für den Konsumenten, ein unabhängiges Urteil über den von den Produkten ausgehenden, ökologischen Impact zu treffen.

Erst das kontinuierliche Zusammenwirken der genannten Akteure des Produktlebenszyklus macht die effektive und nachhaltige Umsetzung der Integrierten Produktpolitik möglich.

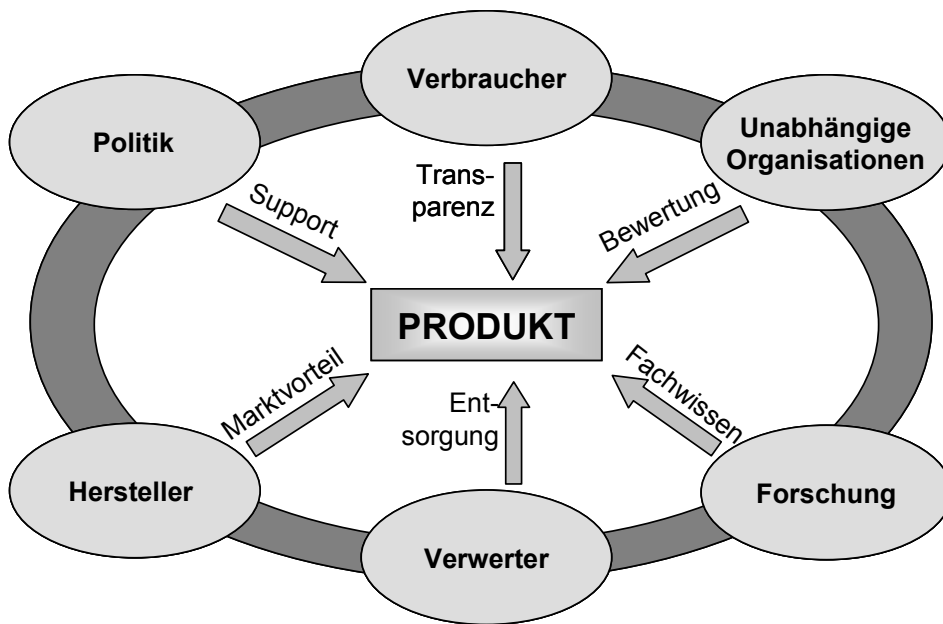


Bild 20: Interessen der beteiligten Akteure am Produkt

Eine herausragende Rolle bei der Umsetzung der Integrierten Produktpolitik wird seitens des Bayerischen Umweltministeriums eingenommen: Nachdem bereits 1992 in der Vorlage des 5. Europäischen Umweltaktionsprogramms erstmals Bezug auf Instrumente und Maßnahmen mit IPP-Charakter genommen wurde, wurde 1996 in dem Beschluss zur Überprüfung des 5. Europäischen Umweltaktionsprogramms der Entwicklung eines Rahmens für die integrierte, produktlebenszyklus-orientierte Politik bis 2000 vorrangige Priorität eingeräumt. Aufbauend auf einem informellen Treffen der EU-Umweltminister im Mai 1999 in Weimar zielte eine im April 2000 vom Bayerischen Umweltministerium durchgeführte Konferenz auf die Entwicklung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten auf Basis Integrierter Produktpolitik in Bayern ab. Im Oktober 2000 wurde im Bayerischen Umweltministerium eine eigenständige Organisationseinheit für IPP und Stoffflussmanagement gegründet sowie die IPP als Handlungsfeld innerhalb des Umweltpaktes Bayern festgeschrieben. Daher nimmt Bayern eine Vorreiterrolle hinsichtlich der Aktivitäten zur Integrierten Produktpolitik ein [105], deren initiierte Pilotprojekte sowohl produktbezogene Ansätze aus dem Konsumenten- und Businessbereich [56], [61], als auch Managementstrategien für kleine und mittelständige Unternehmen (KMU) [55] sowie für die ökologische Produktentwicklung (COUP 21) [39] umfassen.

3.2 Interdisziplinäre Kommunikation als Grundlage Integrierter Produktpolitik

Zur erfolgreichen Umsetzung der Prinzipien Integrierter Produktpolitik stellt die interdisziplinäre Kommunikation, wie anhand Bild 21 deutlich wird, einen wesentlichen Faktor dar. Nachdem sich IPP über den gesamten Produktlebenszyklus erstreckt, sind, abhän-

gig von der umgesetzten Strategie, diverse Akteure in die Gesamtprozesskette involviert (Bild 20).

Kommunikation wird in [26] als zentrale Voraussetzung zur externen Unternehmensdarstellung beschrieben: *„Der unternehmenspolitische Dialog manifestiert sich in internen Prozessen der Identitätsfindung, mit denen die Organisationsmitglieder einen Beitrag zur Konstitution und Restrukturierung des Unternehmens als sozialer Einheit leisten. Praktische Erfahrungen zeigen, dass die Dialogorientierung im Bereich der Unternehmenskultur und Organisationskommunikation eine unabdingbare Voraussetzung für den unternehmenspolitischen Dialog mit Marktpartnern und gesellschaftlichen Anspruchsgruppen ist.“* [7]

Nachdem der Kommunikation bereits unternehmensintern eine hohe Bedeutung zugezogen wird, wächst ihr Stellenwert im Rahmen einer ganzheitlichen Perspektive um ein Vielfaches an. Die Komplexität unternehmensinterner Kommunikation macht sich bereits innerhalb unterschiedlicher Hierarchieebenen bemerkbar. Über das in Bild 21 hinausgehende allgemeine Kommunikationsmodell [108] existieren zwischen vorhandenen Subsystemen hierarchischer Organisationsstrukturen, so genannte Kommunikationskanäle. Entstehende Subsysteme erstrecken sich einerseits innerhalb eines Unternehmens in einer Hierarchieebene oder über mehrere Hierarchieebenen hinweg, andererseits über die Grenzen des Unternehmens hinaus zur angrenzenden Umwelt, d. h., zu Kooperationspartnern, Lieferanten, etc.. Das Gesamtgefüge der Kanäle umfasst somit intra- und interpersonelle bis hin zu Organisations-Umwelt Beziehungen, d. h. externen Strukturverknüpfungen.

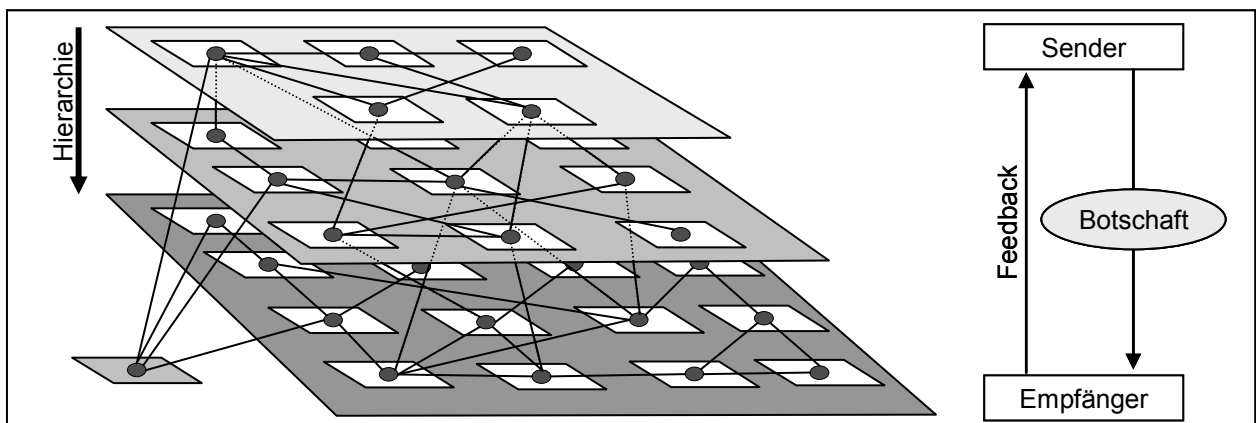


Bild 21: Kommunikationshierarchien mit vernetzten Subsystemen und allgemeines Kommunikationsmodell [108]

Koordinationsprobleme entstehen durch Interessenskonflikte einzelner Subsysteme, da diese versuchen, ihre Interessen und Ziele gegenüber anderen Subsystemen zu vertreten und durchzusetzen. Zur Effizienzsteigerung ist es somit notwendig, Verständnis- und Verständigungsprobleme über Systemgrenzen hinweg aufzulösen und diese zu einem funktionsfähigen Ganzen zusammen zu führen.

Insbesondere für die erfolgreiche Umsetzung der Integrierten Produktpolitik ist die kommunikationsbedingte Überwindung von Systemgrenzen zwingend notwendig. So

sind alle am Gesamtprozess beteiligten Akteure auf die Notwendigkeit des gemeinsamen, zielgerichteten Handelns aufmerksam zu machen. Zur Steigerung der Produktivität müssen durch gezielte Aktionen des Managements alle Hierarchieebenen von der Erfordernis systemübergreifender Zusammenarbeit überzeugt werden, so dass ein Verlust von Kontextwissen vermieden werden kann.

Nachdem die Integrierte Produktpolitik unternehmensintern ein innovatives Themenfeld darstellt, erstreckt sie sich weitestgehend auf den Bereich Forschung und Entwicklung. Hier reduzieren sich die Grenzen der Kommunikationsbarrieren dahingehend, dass auf technischer Sachebene eine gemeinsame Fachsprache existiert.

Die Herausforderung besteht in diesem Fall somit weniger in der unternehmensinternen Kommunikation, sondern im Wesentlichen darin, politisch und kulturell motivierte Hemmnisse zu reduzieren. Die politisch motivierte Informationsoffenlegung zuliefernder Subunternehmen, bzw. die Verlagerung der Fertigung ins Ausland schafft Kommunikationsbarrieren, deren Überwindung zur nachhaltigen Umsetzung der IPP zwingend notwendig ist.

Die Einführung neuer Kommunikations- und Informationstechnologien kann dazu beitragen, den Prozessablauf im Sinne der Integrierten Produktpolitik zieloptimiert zu gestalten. Auch hier hängen Einführung, Nutzung und insbesondere deren Effizienz vom organisatorischen Umfeld, d. h., interpersonellen Kommunikationsmechanismen, ab.

3.3 Mechanismen und Instrumente zur Umsetzung Integrierter Produktpolitik

Die Beteiligung aller Akteure an der Umsetzung der Integrierten Produktpolitik entlang des gesamten Produktlebenszyklus erfordert, wie bereits in Kapitel 3.2 dargestellt, eine enge und kontinuierliche Kommunikation. Dem voran steht jedoch zunächst die Erkenntnis, dass Defizite vorhanden sind, die unter Einbeziehung der Prinzipien der Integrierten Produktpolitik ganzheitlich und somit zum Wohle des Unternehmens und der Gesellschaft zu beseitigen sind. Dementsprechend ist ein Mechanismus zu entwickeln, der sich in drei aufeinander folgende Schritte gliedert:

Mechanismus 1: Bewusstsein für Defizite schaffen

Mangelhafte Kenntnisse hinsichtlich der von Elektrogeräten ausgehenden Umweltwirkungen treten nicht nur beim Verbraucher, sondern auch beim Hersteller von Produkten auf. Die Art der Auswahl an Geräten beim Einzelhändler, der gewohnte Umgang mit den Geräten im Haushalt und Fehleinschätzungen hinsichtlich der Geräteeffektivität schaffen ein falsches Bewusstsein des Kunden für deren ökologisches Potenzial. Produktspezifische Defizite, die dem Anwender in vielen Fällen nicht offensichtlich sind, sind z. B. der Energieverbrauch durch stille Verbraucher (vgl. Kapitel 4.2.1) oder Fehleinschätzungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit von Produkten. Oftmals wird Laut-

stärke (wie z. B. beim Staubsauger) mit Leistungsfähigkeit gleich gesetzt. Das Potenzial hinsichtlich Gewichtseinsparung, das mit der optimierten Raumnutzung einhergeht, stellt kein primäres Kaufkriterium dar.

Hersteller fokussieren hauptsächlich die kosteneffizienteste Methode der Produktentwicklung und qualitätsoptimierte Fertigungsprozesse. Die nach Verkauf der Geräte auftretenden Umweltwirkungen entziehen sich ihrem Kenntnisstand und haben somit keine Relevanz für die Entwicklung eines nachhaltigen Produktdesigns.

Aufgabe der Integrierten Produktpolitik ist es daher, sowohl beim Kunden, als auch beim Hersteller das Bewusstsein für vorhandene, primär nicht augenscheinliche Defizite zu schaffen. Hierfür stellt die Kommunikation zwischen Hersteller, bzw. Politik oder Interessenvertretern und dem Kunden eine wesentliche Basis dar. Weiterhin ermöglicht die Einführung vergleichbarer Kriterien, wie z. B. das Ökolabeling, dem Kunden, produktspezifische Umweltcharakteristika vergleichend bewerten zu können und somit in die Kaufentscheidung einfließen zu lassen.

Mechanismus 2: Entwicklung produktneutraler Methoden

Nachdem das Bewusstsein für vorhandene Defizite geschaffen ist, gilt es, zunächst produktneutrale Ansätze entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu entwickeln. Die Einbeziehung des gesamten Lebenszyklus ist insofern von Bedeutung, da Entscheidungen im Entwicklungsprozess nachhaltige Wirkungen für die Nutzung oder Verwertung haben können.

Die Entwicklung produktneutraler Methoden (wie z. B. differenzierte Strategien des Refurbishingprozesses) zur Umsetzung der Integrierten Produktpolitik schafft zunächst einen generellen Überblick über Möglichkeiten des nachhaltigen Produkthandlings. Dazu gehören neben produktlebenszyklusübergreifenden Verfahren (z. B. Ökobilanzen) ebenfalls Ansätze zur Produktentwicklung, Konsequenzen für die Nutzung sowie Auswirkungen auf Demontage und Verwertung.

Mechanismus 3: Produktspezifische Umsetzung

Nachdem das Bewusstsein für Defizite und die Notwendigkeit zum Handeln seitens der Industrie erkannt und danach ein Überblick über allgemein vorhandene Werkzeuge geschaffen wurde (Managementtools, Ökobilanzen, Demontageanalysen, etc.), sind Methoden produktspezifisch umzusetzen. Das heißt, entsprechend der Charakteristika des Produktes sind über die allgemein entwickelten Werkzeuge hinaus Ansätze zu erarbeiten und umzusetzen, die individuell dem Anspruch des Gerätes gerecht werden. Als Beispiel sei hier der in Kapitel 4.4 betrachtete Bodenstaubsauger genannt, der beispielsweise neben einer Demontageanalyse und Ökobilanzierung ebenfalls strömungstechnische Untersuchungen des Sauggeschirrs erforderlich macht.

Im Folgenden werden zwei produktneutrale Instrumente vorgestellt, die im Sinne der Integrierten Produktpolitik grundlegende Aussagen entlang des Produktlebenszyklus

ermöglichen, um Aussagen über die von Geräten ausgehenden Umweltwirkungen treffen zu können und Schwachstellen im Lebenszyklus zu ermitteln.

3.3.1 Ökobilanzen zur Quantifizierung von Umweltwirkungen

Die Ökobilanz stellt ein Instrument dar, das einen unabhängigen Vergleich der von Produkten, Systemen und Dienstleistungen ausgehenden Umweltwirkungen ermöglicht. Dabei wird die Bilanz im Allgemeinen über den gesamten Produktlebenszyklus durchgeführt, so dass spezifische Charakteristika einzelner Lebensphasen in die Gesamtaussage integriert und berücksichtigt werden. Neben der Analyse des gesamten Produktlebenszyklus hinsichtlich ökologischer Schwachstellen bietet die Ökobilanz die Möglichkeit des Vergleichs verwandter Produkte bezüglich des ökologischen Potenzials oder den Blick auf einzelne Lebenszyklusabschnitte, die besonders relevant erscheinen. Prinzipiell bietet die Bilanz eine umweltmedienübergreifende Sichtweise, da eine ganzheitliche Betrachtung durchgeführt wird und somit die Wechselwirkungen der einzelnen Phasen Berücksichtigung finden.

Die Durchführung einer Ökobilanz gliedert sich grundsätzlich in die in Bild 22 dargestellten vier aufeinander folgenden Phasen, die in den DIN EN ISO Normen 14040 bis DIN EN ISO 14043 definiert werden [117], [118], [119], [120].

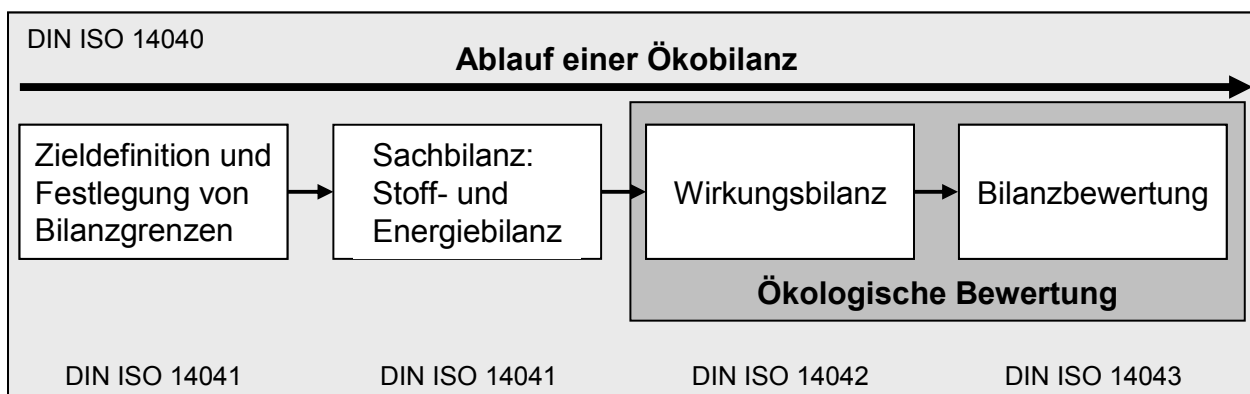


Bild 22: Bestandteile zur Durchführung einer Ökobilanz [117]

Die Art der Durchführung einer Ökobilanz ist abhängig vom unternehmensinternen Ziel, das mit der Analyse verbunden ist. Mit Festlegung des Ziels wird somit einer der wichtigsten Schritte im Rahmen einer Bilanzierung durchgeführt. Über die Bestimmung der Bilanzgrenzen werden der Betrachtungsrahmen und somit die Grenzen der Analyse eindeutig definiert. Die Grundeinheit beschreibt die Bezugsgröße, auf deren Basis die sich anschließende Analyse durchgeführt wird. Sie kann sich beispielsweise auf 1 kg eines Stoffes, dessen Gewinnungs-, Fertigungs- oder Verwertungsprozess beziehen oder um ein Gerät, dessen Lebenszyklus betrachtet werden soll. Dementsprechend müssen als Grundlage zur Durchführung folgende Punkte nach DIN EN ISO 14041 [118] vorliegen:

- Funktion des zu untersuchenden Systems und Festlegung der funktionalen Einheit,
- Analysegrenzen, Einschränkungen und Abschneidekriterien,
- Anforderungen an die ermittelten Daten und deren Qualität,
- Beabsichtigte Aussagen und Art der Ergebnisdarstellung.

Darauf aufbauend wird die sich anschließende Stoff- und Energiebilanz (Sachbilanz) durchgeführt.

Innerhalb der Sachbilanz werden im Rahmen der festgelegten Systemgrenzen die für das betrachtete Produkt vorhandenen Stoff- und Energieflüsse ermittelt. Dabei werden je nach gewünschter Aussage die Fertigungs-, Nutzungs- und auch die Entsorgungs- bzw. Recyclingphase eines Produktes betrachtet.

Die Aufgliederung der Sachbilanz in Einzelprozessschritte wird in [34] dargestellt. Dabei erfolgt eine Betrachtung jedes einzelnen Prozesses und der dazu gehörenden Input- und Output-Flüsse (Bild 23). Flüsse werden unterschieden in Elementarflüsse, die Ströme in die Ökosphäre ohne weitere Behandlung liefern, wie beispielsweise Emissionen oder Ressourcen. Nicht-Elementarflüssen stellen demgegenüber z. B. Wertstoffe dar und gehen nicht in die Ökosphäre ein.

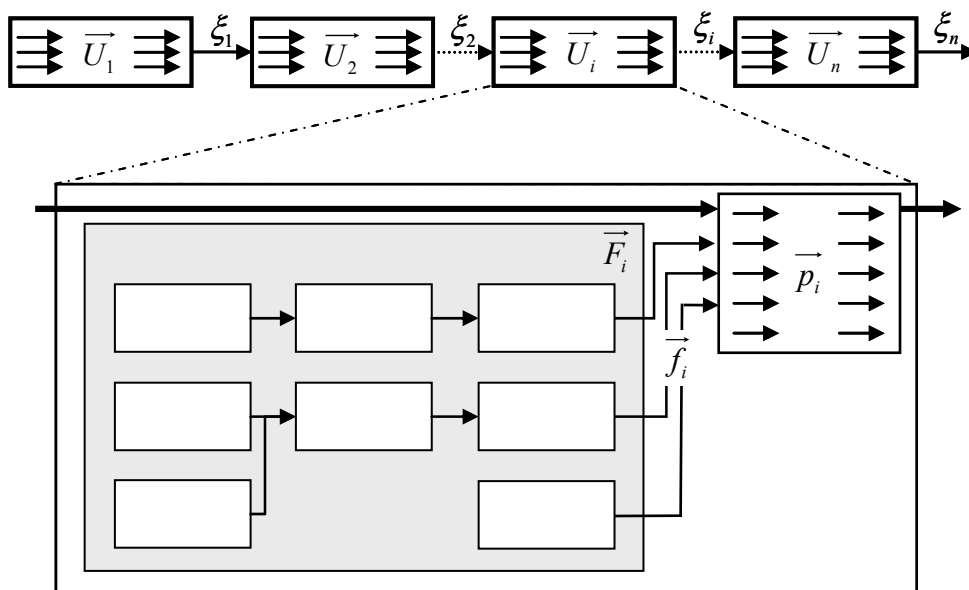


Bild 23: Modellierung von Prozessschritten zur Darstellung der Sachbilanz [34]

Bezogen auf die funktionale Einheit, die im Rahmen der Zieldefinition festgelegt wird, summiert jeder Prozessschritt die Menge der einzelnen auftretenden Flüsse. In [34] wird dies mit (Gl. 1) in Form einer Prozessmatrix dargestellt:

$$\vec{U}_{ges} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \vec{U}_i = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot (\vec{F}_i \cdot \vec{f}_i + \vec{p}_i) \quad (Gl. 1)$$

- Mit: \vec{U}_{ges} = Umwelt- oder Sachbilanzvektor eines gesamten Lebenszyklus
 \vec{U}_i = Sachbilanzvektor eines Prozessschrittes i oder Lebenszyklusabschnitts i
 ξ_i = Skalar der Sachbilanzvektoren \vec{U}_i zur Quantifizierung der Prozessschritte i
 \vec{F}_i = Fertigungsmatrix des Prozessschrittes i oder Lebenszyklusabschnitts i
 \vec{f}_i = Fertigungsvektor des Prozessschrittes i oder Lebenszyklusabschnitts i
 \vec{p}_i = Prozessvektor des Prozessschrittes i oder Lebenszyklusabschnitts i
n = Anzahl der Prozessschritte oder Lebenszyklusabschnitte

Mit zunehmender Komplexität eines Produktes kann die Durchführung einer Sachbilanz sehr aufwendig werden. Daher ist es zielführend, diese in Teilprozesse zu untergliedern, so dass der Ablauf der Bilanz überschaubar bleibt. Dabei bietet sich an, die betrachteten Systeme in drei Hauptbereiche zu untergliedern:

- die Hauptprozesskette,
- die Energieerzeugung und
- Nebenprozessketten zur Herstellung von Hilfs- und Zusatzstoffen.

Dabei erfordert die Betrachtung der Nebenprozessketten ebenfalls die Erfassung der zur Herstellung der Hilfs- und Zusatzstoffe relevanten Hauptprozessströme. Um Nebenprozessketten vernachlässigen zu können, muss deren Beitrag zur eigentlich betrachteten Hauptprozesskette hinreichend klein sein. Entsprechende Grenzen werden im Rahmen der Zieldefinition festgelegt.

Detaillierte Aussagen über die im Zusammenhang mit der Sachbilanz auftretenden Herausforderungen bezüglich Rückkopplungseffekten, Allokationen, etc. werden an dieser Stelle nicht getroffen. Weiterführende Erläuterungen können bei [34] gefunden werden.

Die im Rahmen der Sachbilanz ermittelten Flüsse zeigen input- sowie outputseitig Umweltwirkungen auf. Um diese Einflüsse zu quantifizieren, schließt sich an die Sachbilanz eine Wirkungsbilanz [119] an, welche neben der Klassifizierung die Charakterisierung umfasst. Die Klassifizierung der Daten ordnet die auftretenden Emissionen Wirkungskategorien zu, die gewisse Umwelteffekte (z. B. Treibhauseffekt, Eutrophierung, etc.) widerspiegeln. Mittels der Charakterisierung wird der Beitrag eines durch eine Emission entstehenden Umwelteintrags innerhalb einer Wirkungskategorie quantifiziert und gegenüber anderen auf eine vergleichbare Ebene gestellt.

Die abschließende Bilanzbewertung fasst die in der Sach- und Wirkungsbilanz ermittelten Daten zusammen. In DIN EN ISO 14043 [120] werden die Anforderungen an die Auswertung und Darstellung von Ökobilanzen definiert. Die zielgerichtete Betrachtung der Daten erlaubt einerseits eine Aussage über das Erreichen der in der Zieldefinition vorgegebenen Anforderungen. Weiterhin dienen die ermittelten Daten als Grundlage

einer Schwachstellenanalyse, die in eine lebenszyklusübergreifende Optimierung des Produktes im Sinne einer Integrierten Produktpolitik einfließen kann.

Das in Teilkapiteln dieser Arbeit verwendete Bilanzierungsprogramm CUMPAN [12] ermöglicht in Form eines Flussdiagramms, die während der Herstellung, Nutzung und Entsorgung anfallenden Flüsse zu modellieren und sequentiell oder als Ganzes zu analysieren. Dabei stehen Datenbanken zur Erstellung der Sachbilanz zur Verfügung. Entsprechende Algorithmen zur Durchführung der Wirkbilanz sind in die Software implementiert. Ähnliche Softwarelösungen werden durch die Systeme GaBi [15], [58], SimaPro [86], Umberto [74], CALA [14] und EDIP [33] ausgeführt.

Insgesamt ist die Erstellung einer Ökobilanz sehr zeit- und kostenintensiv, da neben dem hohen Aufwand zur Datenermittlung die Modellierung aufwendig und abhängig vom Detaillierungsgrad sehr komplex ist. Nachdem nicht jedem Hersteller die Inhaltsstoffe seiner Produkte, die zum Teil aus Zukaufteilen bestehen, bekannt ist, wird die Erstellung von Ökobilanzen entsprechend der Anforderungen des EU-Richtlinienvorschlags „Energy using Products“ [149] zunächst eine nicht zu vernachlässigende Belastung der Industrie darstellen.

3.3.2 Demontageanalysen zur Produktstrukturbewertung

Nachdem die Daten zur Montage und Demontage von Produkten nur bedingt vergleichbar sind, ermöglichen speziell erstellte Demontageanalysen eine Hilfe bei der Ermittlung der idealen Vorgehensweise zur ordnungsgemäßen Verwertung.

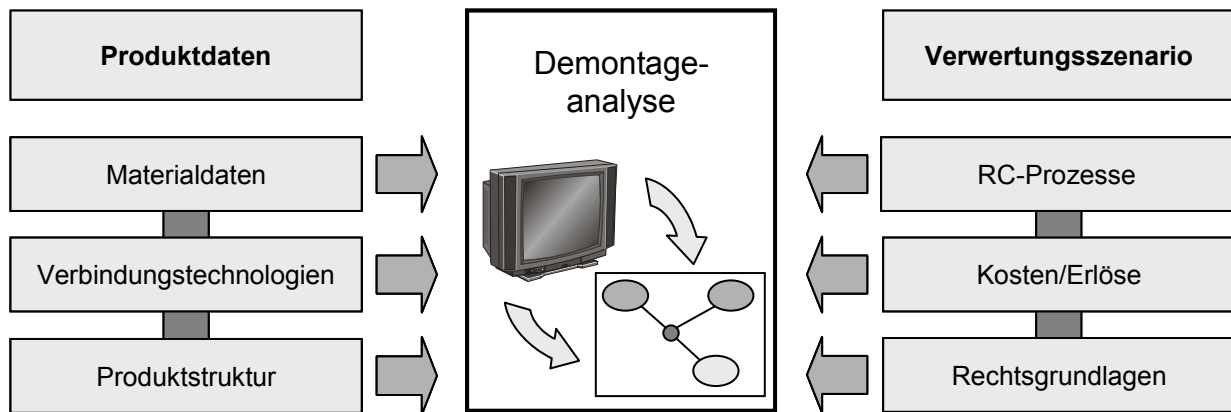


Bild 24: Datengrundlage zur Durchführung von Demontageanalysen

Wie in Bild 24 dargestellt, bieten Softwaretools zur Unterstützung der Demontageplanung die Möglichkeit, neben aktuellen Verwertungsbedingungen ebenfalls rechtliche Anforderungen in die Betrachtung zu integrieren. Hierzu ist zunächst die Produktstruktur unter Berücksichtigung der verwendeten Komponenten und Verbindungstechnologien abzubilden. Weiterhin ist das Verwertungsszenario zu modellieren. Dieses umfasst neben aktuell technisch umsetzbaren Recyclingprozessen ebenfalls die Betrachtung derzeit erzielter Erlöse für Materialfraktionen sowie aufzuwendende Kosten für Personal und Infrastruktur [22]. Weiterhin sind die Anforderungen, die aus der Umsetzung rechtli-

cher Vorgaben wie der EU-Richtlinie WEEE resultieren, in das Modell zu implementieren.

Das in Teilbereichen dieser Arbeit verwendete Demontagetool Display/ReGrEd wurde gemeinsam von den Lehrstühlen für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik sowie Konstruktionstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt [48], [95], [113]. Die Ermittlung der optimalen Demontagetiefe ermöglicht die Minimierung der Entsorgungskosten von Altgeräten. Weiterhin ist, wie in Bild 25 dargestellt, eine Schwachstellenanalyse der Produktstruktur hinsichtlich Materialkompatibilitäten und Verbindungstechniken möglich.

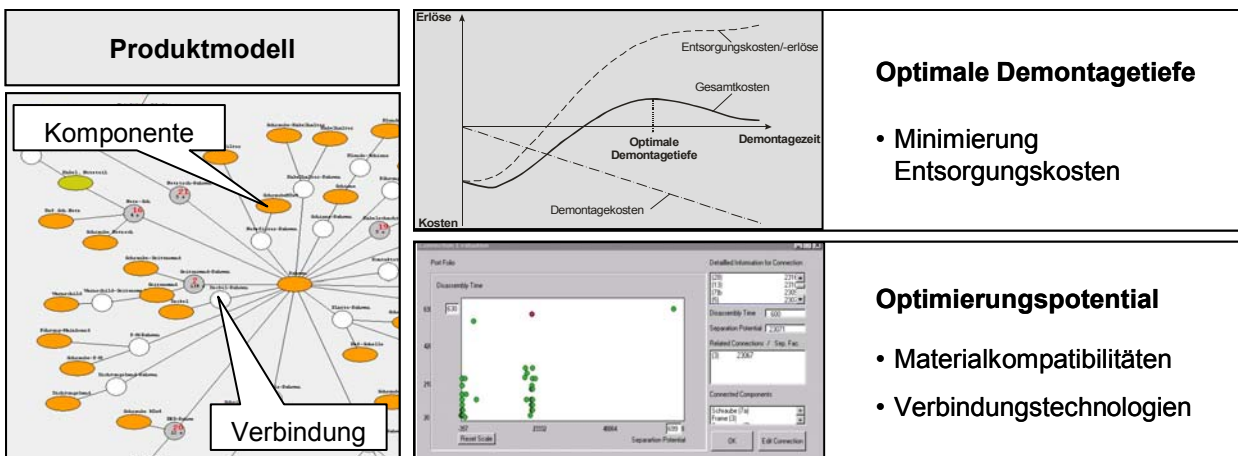


Bild 25: Potential des Demontageanalysetools Display/ReGrEd

Die Bedeutung von Demontageanalysetools im Bereich der ökonomischen und ökologischen Produktbewertung zeigt sich darin, dass auf nationaler und internationaler Ebene zahlreiche vergleichbare Systeme entwickelt wurden. Neben BAMOS [87], ATROiD [35], DEMROP Plus [9], die ihren Ursprung in Deutschland haben, entstanden auf internationaler Ebene das Design for Environment Tool (DfE Tool) [30] sowie der End-of-Life Design Advisor (ELDA) [88]. Eine vergleichende Analyse der Systeme kann in [109] nachgelesen werden.

3.4 Differenzierung geeigneter Produktarten

Die Bandbreite der Produkte und Güter, die sowohl vom Consumer als auch im Businessbereich konsumiert werden, ist sehr groß und wird in Bild 26 dargestellt. Die aufgeführten Produktkategorien unterscheiden sich dabei wie folgt [64]:

Freie Güter sind für jeden Konsumenten uneingeschränkt zugänglich und verfügen somit über keinen monetären Gegenwert. Sie entwickeln sich zu knappen Gütern, wenn sie in geringem Maße vorhanden sind und somit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewirtschaftet werden. Private Güter werden jeweils nur von einem Kunden genutzt - öffentliche Güter hingegen stehen mehreren Konsumenten gleichzeitig zur Verfügung, ohne dass Einschränkungen in der Nutzung für das Individuum auftreten.

Konsumgüter stellen die von privaten Haushalten zur Bedürfnisbefriedigung nachgefragten Produkte dar, die wiederum Verbrauchs- und Gebrauchsgüter beinhalten. Verbrauchsgüter zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch ihre bestimmungsmäßige Anwendung aufgebraucht oder unverwendbar werden. Diese Gebrauchsgüter hingegen verfügen über eine relativ kurze Nutzungsdauer von wenigen Jahren. Im Vergleich dazu werden im industriellen Bereich genutzte Gebrauchsgüter als Investitionsgüter bezeichnet. Investitionsgüter zeichnen sich im Allgemeinen durch eine lange Abschreibefrist von mehreren Jahren aus und gehören zum Anlagevermögen der Unternehmen.

Meritorische Güter stehen nach dem Ausschlussprinzip lediglich einem Konsumenten zur Verfügung, werden allerdings aufgrund politischer Entscheidungen öffentlichen Gütern gleichgestellt. Anderenfalls käme es zu einer unzureichenden Versorgung der Konsumenten, so dass der Staat als Lenkungsorgan eingreift. Als Beispiel seien die Gesundheit, Bildung oder soziale Dienstleistungen genannt.

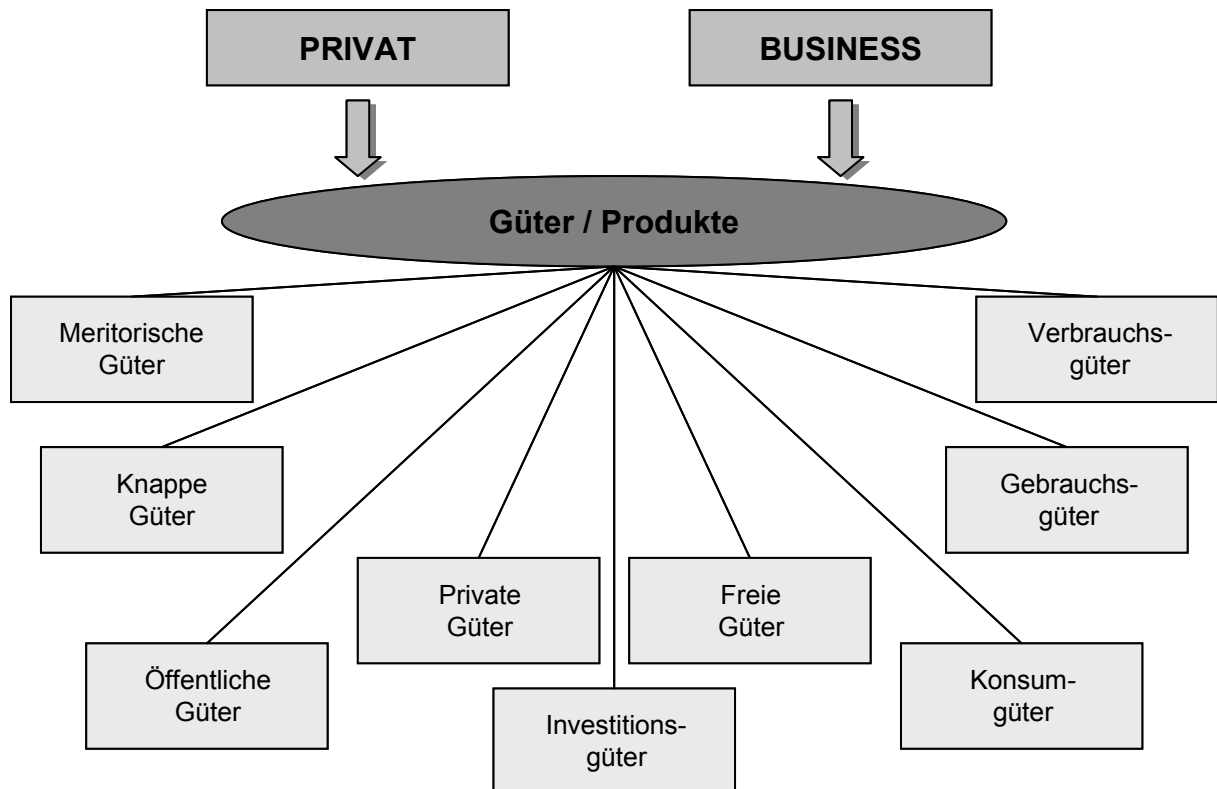


Bild 26: Untergliederung der Güter entsprechend ihres Einsatz- und Funktionsbereichs

Der Ansatz der Integrierten Produktpolitik zielt darauf ab, Produkte und Dienstleistungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu optimieren. Somit bleibt der Ansatz universell umsetzbar und beschränkt sich nicht auf ausgewählte Produktkategorien.

Nachdem neben dem ökologischen Nutzen der ökonomische Anreiz ein wesentliches Kriterium zur Umsetzung strategischer Maßnahmen im Sinne der IPP darstellt, fokussiert die Industrie zur Anwendung der Strategien der Integrierten Produktpolitik primär Konsum- und Investitionsgüter, da diese entweder in hohen Stückzahlen gefertigt werden oder über ein hohes Investitionsvolumen verfügen.

In den folgenden Kapiteln werden anhand von Beispielen die Umsetzung und der Nutzen Integrierter Produktpolitik vorgestellt. Dabei wird einerseits ein klassisches Massenbrauchsgut aus dem Haushaltsbereich, andererseits ein Investitionsgut aus dem Medizingerätesektor betrachtet.

Weiterhin werden die Konsequenzen der EU-Richtlinie WEEE an einem Beispiel aus dem Bereich der Informationstechnologie dargestellt und Ansätze für die Integrierte Produktpolitik abgeleitet. Daraus resultiert eine Strategie für den ReUse von Bauelementen, so dass eine Darstellung integrierter Methoden für unterschiedliche Produktkategorien aufgezeigt wird. Diese sollen Hersteller dazu animieren, die vielfältigen Möglichkeiten der Umsetzung Integrierter Produktpolitik zu erkennen, und als Basis für eine eigene Herangehensweise an die Herausforderung alternativer Entwicklungs- und Fertigungsverfahren im Sinne nachhaltiger Produktstrategien dienen.

4 Produktoptimierung klassischer Massengebrauchsgüter

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Grundlagen der Integrierten Produktpolitik erläutert wurden, werden im Folgenden Strategien zu deren Umsetzung aufgezeigt. In diesem Kapitel werden klassische Massengebrauchsgüter betrachtet. Dazu werden diese zunächst definiert und später die Herangehensweise zur Anwendung der Integrierten Produktpolitik auf diese Geräteklasse anhand eines Beispiels verifiziert.

4.1 Charakterisierung klassischer Massengebrauchsgüter

Die uneingeschränkte Möglichkeit, sich mit Massenkultur zu umgeben, charakterisiert heutzutage einen Großteil der Weltbevölkerung. Dabei beinhaltet die moderne Massenkultur nach [98] neben dem Massenkonsum auch die Massenmedien, Massenwohnverhältnisse, Massentourismus, etc.

Massenkonsumgüter sind dabei insbesondere Produkte, die von der Bevölkerung nahezu täglich verwendet werden und Einzug ins Alltagsleben gefunden haben. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein komfortables Leben ermöglichen, jedoch nicht zwangsläufig zur Existenzsicherung notwendig sind. Hierzu gehören beispielsweise Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen, Bügeleisen, elektrische Zahnbürsten genau so wie elektrische Werkzeuge, Einrichtungsgegenstände, aber auch Lebensmittel wie Tabak und Alkoholika. Sie stellen einen wesentlichen Anteil des jährlichen Bruttoinlandsproduktes dar, unterliegen allerdings sehr unterschiedlichen Konjunkturschwankungen.

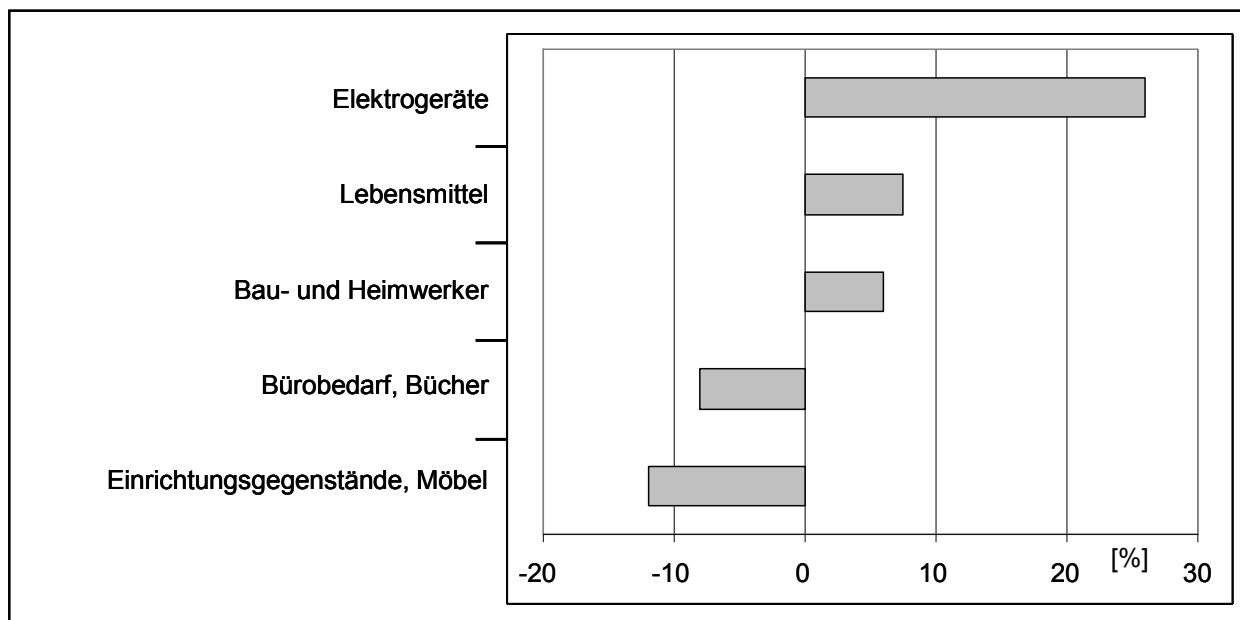


Bild 27: Reales Umsatzwachstum verschiedener Einzelhandelsbranchen in Bayern von 1995 – 2001 [46]

Der Einzelhandelsumsatz in Bayern weist in der Zeit von 1995 bis 2001 ein Wachstum von durchschnittlich 3,3% auf. Wie in Bild 27 erkennbar ist, unterliegen hierbei die Branchen sehr differenzierten Tendenzen. Während im Bereich der Einrichtungsge-

genstände und Büroartikel der Trend rückläufig ist, verzeichnet der Einzelhandel der Bau- und Heimwerkergeräte und der Lebensmittel einen Umsatzgewinn. Insbesondere im Bereich der Elektrogeräte fällt das überdurchschnittlich starke Wachstum auf. Hierbei handelt es sich sowohl um Geräte der Unterhaltungselektronik, als auch der Telekommunikation und Haushaltsgeräte.

Bild 28 zeigt den Anstieg der Elektrogeräte in deutschen Haushalten in den vergangenen vierzig Jahren. Eine Sättigung von 100% bedeutet, dass im Mittel jeder deutsche Haushalt über das entsprechende Gerät verfügt. Es fällt auf, dass sich der Bereich der Haushaltsgeräte bis auf Kühlschränke und Waschmaschinen eher unterdurchschnittlich entwickelt hat. Fernsehgeräte hingegen haben im Kommunikationszeitalter stark an Bedeutung gewonnen. So sind durchschnittlich in jedem Haushalt 1,5 Fernseher vorhanden.

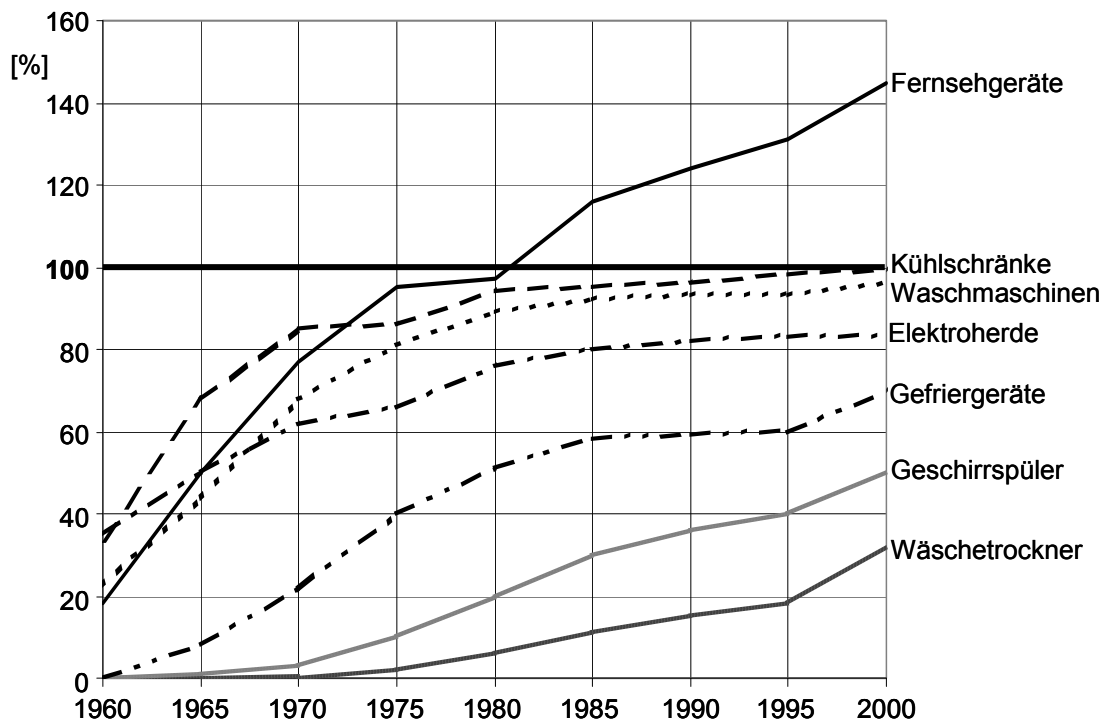


Bild 28: Sättigung der Haushalte mit Elektrogeräten [23]

Parallel zum Zuwachs an Elektrogeräten in Haushalten entwickelt sich der Stromverbrauch: Im Jahr 2001 betrug dieser im Mittel 2.800 kWh pro Haushalt und Jahr [115]. Rund 80% dessen werden von Geräten zum Kochen, Waschen, Spülen, Trocknen, Kühlen und Gefrieren, Fernsehen, Heizung und Warmwasser verbraucht. Weitere 12% entfallen auf Kleingeräte wie Mixer, Kaffeemaschinen, Staubsauger und Fön, obwohl diese meist nur kurzzeitig verwendet werden. Die verbleibenden 8% werden von Kleinstverbrauchern mit sehr geringen Leistungswerten von 1 bis 20 W benötigt, da diese meist im Stand-by-Modus betrieben werden.

4.2 Umsetzung Integrierter Produktpolitik an klassischen Massengebrauchsgütern

Ein Blick auf den Energieverbrauch der in Kapitel 4.1 genannten Massengebrauchsgüter zeigt, dass im Bereich der höchsten Verbrauchswerte im wesentlichen Geräte angesiedelt sind, die im Zusammenhang mit Wärme- und Kälteerzeugung stehen, wie Geschirrspüler, Waschmaschinen, Kühlschränke. Die Notwendigkeit, dem hohen Energieverbrauch entgegenzuwirken, wurde ebenfalls vom Gesetzgeber erkannt.

Mit dem ab 01.07.1997 in Deutschland geltenden Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz (EnVKG) [126], aktualisiert durch eine Neufassung am 30. Januar 2002, wurde die Grundlage für die Umsetzung der Richtlinie „Verordnung über die Kennzeichnung von Haushaltsgeräten mit Angaben über den Verbrauch an Energie und anderen wichtigen Ressourcen“ [146] und der Richtlinie 96/57/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 03.09.1996 über „Anforderungen im Hinblick auf die Energieeffizienz von elektrischen Haushaltskühl- und Gefriergeräten und entsprechenden Kombinationen“ [151] geschaffen. Inhalt des EnVKG ist die Kennzeichnung von Haushaltsgeräten mit Angaben über den Verbrauch von Energie und anderen Ressourcen in Form von Energielabels. Die Kriterien zur Klassifizierung der Geräte sind europaweit in genormten Verfahren festgelegt worden. Sie ermöglichen dem Kunden einen direkten Vergleich der Verbrauchskennzahlen, so dass neben ökonomischen auch ökologische Kriterien beim Kauf eines Produktes vergleichend herangezogen werden können.

EnVKG: Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz
 EnVKV: Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung
 1. VO EnVKV: Erste Verordnung zur EnVKV

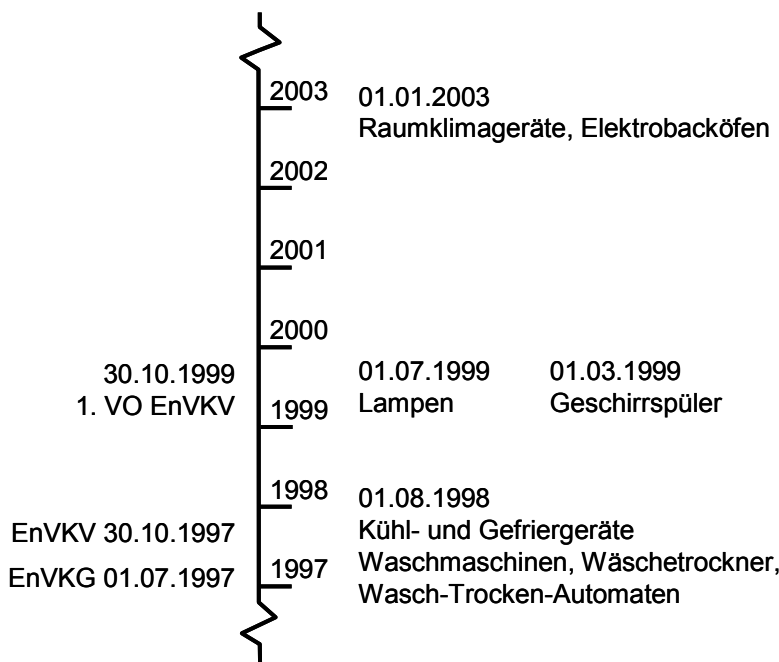


Bild 29: Entwicklung der Verbrauchskennzeichnung mit Ökolabels in Deutschland [13]

Die Regulierung des Marktes erfolgt somit durch den Kunden und nicht durch den Gesetzgeber. Dieser hat lediglich die Grundvoraussetzungen geschaffen, mittels einer vergleichbaren Klassifizierung eine Transparenz in den Markt zu bringen, welche dem Kunden ermöglicht, erweiterte Kriterien als Grundlage für die Kaufentscheidung heranzuziehen. Die Dynamik des Marktes führt dazu, dass der Hersteller auf die Öffnung der Verbrauchsdaten reagieren muss, um u. a. aus Konkurrenz- und Prestige Gründen Geräte in den seinem Image entsprechenden Klassen zu positionieren.

Ein weiter Bereich der Massenkonsumgüter – insbesondere der Haushaltsgeräte – ist von der Offenlegung der Verbrauchskennzahlen nicht betroffen. Somit beschränkt sich deren Optimierungspotenzial auf gängige technologische Entwicklungen, die jedoch die Möglichkeiten einer Integrierten Produktpolitik nicht ausschöpfen.

4.2.1 Der Produktlebenszyklus von Kleingeräten

Elektrische Kleingeräte sind in nahezu jedem Haushalt zu finden, so dass Ihre Gesamtzahl in den industriell entwickelten Ländern insgesamt sehr hoch anzusiedeln ist. Allerdings zeichnen sie sich dadurch aus, dass sie aufgrund des Kleingerätecharakters über ein geringes Volumen und gleichzeitig geringes Gewicht verfügen. Weiterhin weisen sie eine relativ hohe Lebensdauer auf, die je nach Art der Nutzung bei 10 Jahren und weit darüber hinaus angesiedelt sein kann. Die Gründe für die langen Verwendungsdauern liegen darin begründet, dass bei diesen Geräten die Funktionalität höher bewertet wird als innovative Designkriterien. Neue Modelle, die lediglich über eine veränderte Haptik oder höhere Energieeffizienz verfügen, stehen als Kaufkriterien meist nur dann zur Diskussion, wenn ein Gerät defekt ist und neu angeschafft werden muss. Anderenfalls finden sie so lange Verwendung, bis sie nicht mehr einwandfrei funktionieren. Alternativ werden diese Produkte im sekundären Nutzungsbereich gehandelt. Auch dies führt dazu, dass sie letztendlich bis zum Ende ihres Produktlebensweges genutzt werden, dann jedoch nicht durch ihren Erstbesitzer.

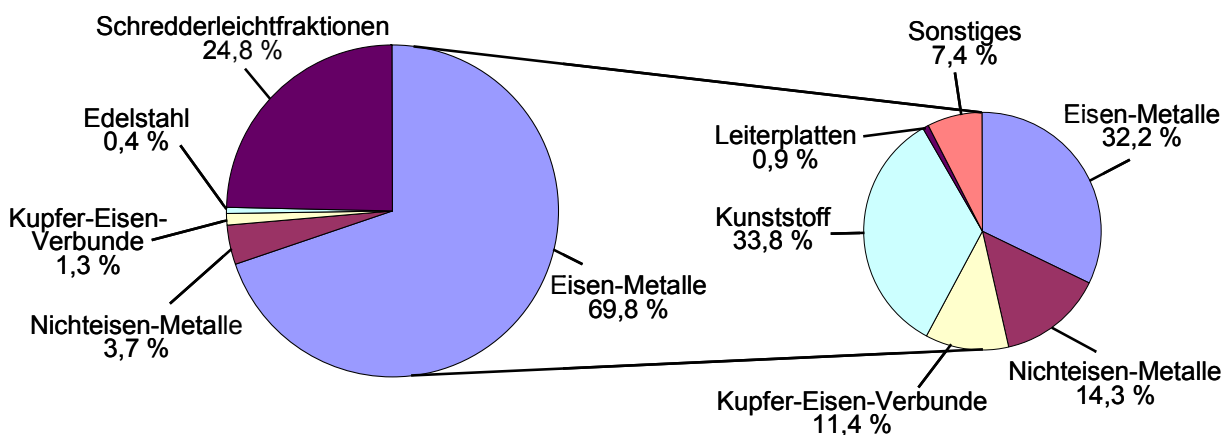


Bild 30: Zusammensetzung von Konsumgütern (links) und Elektro-Kleingeräten (rechts) [16]

Bild 30 zeigt im linken Diagramm die durchschnittliche Materialzusammensetzung von Konsumgütern [16]: Es dominieren primär Eisen-Metalle mit 69,8%, die gemeinsam mit den Kupfer-Eisen-Verbunden (1,3 %) und Nichteisen-Metallen (3,7%) über eine hohe Recyclierbarkeit verfügen. Schredderleichtfraktionen, die einen relativ hohen Anteil von 24,8% aufweisen, werden im Allgemeinen der thermischen Verwertung oder der Deponie zugeführt. Dem gegenüber sieht die prozentuale Verteilung bei Elektro-Kleingeräten anders aus: Den prozentual höchsten Anteil weisen nicht recycelbare Kunststoffe (33,8%) auf. Der Anteil von Eisen-Metallen sinkt im Vergleich zu den gesamten Konsumgütern von 69,8% auf lediglich 32,2%. Gemeinsam mit Nichteisen-Metallen (14,3%) und Kupfer-Eisen-Verbunden (11,4%) umfassen sie nahezu zweidrittel der Gesamtfractionen und tragen somit positiv zur Verwertungsquote bei.

Die Herstellung von Kleingeräten zeichnet sich durch Prozesse aus, die, aufbauend auf langjährigen Erfahrungen und des sich oftmals nur geringfügig ändernden Produktdesigns, bewährt und funktionell sind. Aufgrund der Massenproduktion sind somit die Herstell- und dadurch die Anschaffungskosten von Konsumgütern je nach Produktkategorie vergleichsweise gering einzustufen. Umweltrelevante Stoffströme treten insbesondere bei der Herstellung elektronischer Baugruppen auf, die hier jedoch keine hohe Komplexität aufweisen. Weitere Beiträge zur Ökobilanz sind abhängig vom betrachteten Gerätetyp zu ermitteln und bewerten.

Die Nutzungsphase wird maßgeblich dadurch gekennzeichnet, wie häufig und in welcher Art das Gerät genutzt wird. Nur selten fallen bei Kleingeräten der Massenproduktion Aufwände für Wartung und Instandhaltung an. Wesentliches Charakteristikum der Nutzungsphase hinsichtlich umweltrelevanter Stoffströme ist somit der Energieverbrauch. Dieser ist von großer Bedeutung, da er während der Nutzung der klassischen Kleingeräte aufgrund der vergleichbar hohen Langlebigkeit wesentlich höher ausfällt als für den Gesamtprozess der Herstellung. Während einige Geräte nur selten in Gebrauch sind oder relativ kurze Betriebszeiten haben, wie z. B. Toaster, Mixer, Staubsauger etc., sind es insbesondere die so genannten „stillen Verbraucher“, die nahezu unbemerkt eine Steigerung des Energieverbrauchs im Haushalt herbeiführen. Hierzu zählen beispielsweise elektrische Zahnbürsten und Telefonanlagen, die über eine relativ geringe Anschlussleistung verfügen, allerdings auch Videorekorder, Stereoanlagen etc.. Ein Anrufbeantworter, der im Mittel über eine elektrische Leistungsaufnahme von 4 W verfügt, erzeugt – ausgehend von 8.760 Betriebsstunden pro Jahr – einen jährlichen Stromverbrauch von 35.000 Wh. Dies entspricht einem Dauerbetrieb von 140 Stunden bzw. nahezu 6 Tagen eines über 250 W Anschlussleistung verfügenden Heimcomputers [1]. Für den einzelnen Haushalt fällt dies nicht ins Gewicht. Über den bundesweiten Durchschnitt betrachtet ist die Höhe des Energieverbrauchs, der durch Kleingeräte, insbesondere die stillen Verbraucher, verursacht wird, nicht zu vernachlässigen und stellt somit ein wesentliches Optimierungskriterium dar.

4.2.2 Forderungen der EU Richtlinien WEEE und RoHS bei Kleingeräten der Massenproduktion

Die Verwertung klassischer Kleingeräte verläuft standardmäßig über Schredderanlagen. Hierzu werden die Produkte zunächst vorsortiert, um den Prozess beeinträchtigende Materialien wie Holz etc. zu entfernen. Danach werden, nachdem sie maschinell grob aufgespreizt wurden, Schadstoffe wie bromhaltige Kondensatoren etc. manuell entfernt. In den sich anschließenden Prozessen werden die Geräte zerkleinert und in entsprechende Fraktionen separiert. Hierzu zählen in erster Linie Eisen-Metalle, Nicht-Eisen-Metalle, Kupfer-Eisen-Verbunde, Kunststoffe, Leiterplatten und Schredderleichtfraktionen. Recyclierbare Materialfraktionen werden getrennt und zur Verwertung z. B. an Kupferhütten weiter gegeben.

Durch Einführung der EU-Richtlinie WEEE entstehen konkrete Forderungen an die Verwertungsquoten von Kleingütern der Massenproduktion. Entsprechend der in Tabelle 1 dargestellten Übersicht zählen zu den Kleingeräten die Haushaltskleingeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik, elektrische und elektronische Werkzeuge und Spielzeug, Sport- sowie Freizeitgeräte (Gerätekatgorien 2, 4, 6 und 7), die alle über gleiche Anforderungen an die Verwertung verfügen.

Entsprechend der Richtlinie müssen Geräte der Kategorien 2, 6 und 7 eine Verwertungsquote von mindestens 70% und eine Wiederverwendungs- und Recyclingquote von mindestens 50% des durchschnittlichen Gewichts je Gerät erreichen. Für Geräte der Unterhaltungselektronik (Kategorie 4) liegt die zu erzielende Verwertungsquote bei mindestens 75% und die Wiederverwendungs- und Recyclingquote bei mindestens 65% des durchschnittlichen Gerätegewichts.

Material	Anteil [%]	Wiederverwendungs- und Recyclingquote [%]	Verwertungsquote [%]
Eisen-Metalle	69,8	69,8	69,8
Nichteisen-Metalle	3,7	3,7	3,7
Kupfer-Eisen-Verbund	1,3	1,3	1,3
Edelstahl	0,4	0,4	0,4
Schredderleichtfraktion	24,8	---	---
SUMME	100	75,2	75,2
Forderung WEEE	ø	50,0 – 65,0	70,0 – 75,0

Tabelle 4: Erfüllbarkeit der Recyclingquoten von Konsumgütern [16] nach WEEE

Unter Berücksichtigung der in Bild 30 genannten Zusammensetzung von Konsumgütern und insbesondere von Elektro-Kleingeräten lassen sich folgende Aussagen über das Erreichen der geforderten Verwertungsquoten treffen:

Derzeit technisch zur Verfügung stehende Verfahren ermöglichen bereits die Erfüllung der nach WEEE geforderten Quoten zur Verwertung von Konsumgütern. Tabelle 4 zeigt, dass trotz des hohen Anteils der Schredderleichtfraktion von fast 25% sowohl die Wiederverwendungs- und Recyclingquote als auch die Verwertungsquote für Konsumgüter erfüllt werden können. Die Schredderleichtfraktion stellt allerdings für die zukünftige Verwertung eine besondere Herausforderung dar, da mit steigenden Kosten für die Deponierung dieser Fraktionen zu rechnen ist. Nachdem die Hersteller durch Einführung der WEEE für die Kosten der Entsorgung verantwortlich sind, stellt dies einen Anreiz dar, um Lösungen zur Reduktion dieser Stoffgemische zu finden.

Material	Anteil [%]	Wiederverwendungs- und Recyclingquote [%]	Verwertungsquote [%]	
			Keine Verwertung der Kunststoffe	Thermische Verwertung der Kunststoffe
Eisen-Metalle	32,2	32,2	32,2	32,2
Nichteisen-Metalle	14,3	14,3	14,3	14,3
Kupfer-Eisen-Verbund	11,4	11,4	11,4	11,4
Kunststoff	33,8	---	---	17,0
Leiterplatten	0,9	0,9	0,9	0,9
Sonstiges	7,4	---	---	---
SUMME	100	58,8	58,8	75,8
Forderung WEEE		50,0	70,0	

Tabelle 5: *Erfüllbarkeit der Recyclingquoten nach WEEE von Elektrokleingeräten [16]*

Bei alleiniger Betrachtung der Elektrokleingeräte fällt auf, dass die Erfüllung der geforderten Quoten von 50% im Bereich Wiederverwendung und Recycling möglich ist, allerdings das Erreichen der gesamten Verwertungsquote von 70% nur unter Einbeziehung der thermischen Verwertung der Kunststofffraktion (17%) erzielt werden kann. Somit sind seitens der Hersteller Ansätze zu finden, um entweder die Kunststofffraktion zu substituieren oder sich - wo möglich - auf die Verwendung thermoplastischer Kunststoffe zu beschränken, so dass ein positiver Beitrag dieser Fraktion zum Recycling umgesetzt werden kann.

4.3 Anforderungen an Kleingeräte zur Umsetzung Integrierter Produktpolitik

Der Produktlebenszyklus von Kleingeräten aus dem Bereich der Massenproduktion ist, wie in Kapitel 4.2.1 dargestellt, ein industriell in der Herstellungs- und Entsorgungspha-

se gut beherrschter Prozess. Dies zeigt sich u. a. darin, dass die in der EU-Richtlinie WEEE vorgegebenen Behandlungsquoten in Teilbereichen bereits umgesetzt werden können (Kapitel 4.2.2). Ausgehend von der Annahme, dass die Quoten der WEEE in Zukunft strengeren Anforderungen unterliegen sowie die Entsorgungskosten steigen werden, sind sowohl die Recyclingprozesse zu optimieren als auch die Produktstruktur verwertungsgerechter zu gestalten. Darüber hinaus trägt der Kunde durch unterschiedliches Nutzerverhalten wesentlich zur Ökobilanz der Nutzungsphase bei.

Die effektive Umsetzung der Integrierten Produktpolitik in dieser Produktkategorie ist demnach dadurch zu erzielen, dass nicht ausschließlich in einer Lebensphase nach dem ökologisch sinnvollsten Angriffspunkt gesucht wird, um an dieser Stelle optimierend einzugreifen, sondern der gesamte Produktlebenszyklus kritisch hinterfragt werden muss. Hierzu gehört die Einbeziehung sowohl der Herstellung, als auch Aspekte der Nutzung und Verwertung der Geräte. Kritisch bedeutet, wie in Kapitel 3 dargestellt, altbewährte Standards zu verlassen, neue Methoden aufzuzeigen und innovative Wege zu beschreiten.

Eine Unterteilung der vermeintlich bekannten Produktstruktur in Funktionseinheiten trägt dazu bei, die Analyse IPP-gerecht durchzuführen. Die Funktionseinheiten beschreiben die wesentlichen technischen und charakteristischen Produkteigenschaften. Dabei muss es sich nicht zwangsläufig um materielle Komponenten handeln, sondern kann ebenso das Gesamtprodukt betreffende Spezifikationen beschreiben. Folgende lassen sich für nahezu jedes Gerät aus dem Bereich der Massenkonsumgüter festlegen:

Funktionseinheit: Gehäuse

Das Gehäuse stellt das tragende Gerüst jedes Gerätes dar. Es umfasst einerseits das gesamte Innenleben und muss somit diverse Anforderungen hinsichtlich Robustheit (z. B. mechanische Festigkeit, chemische Beständigkeit etc.) erfüllen. Andererseits sind Optik und Haptik von Bedeutung, da insbesondere bei Massenkonsumgütern das Design zusätzlich zu ökonomischen Kriterien eine wesentliche Rolle bei der Kaufentscheidung spielt.

Neben dem Außengehäuse verfügen viele Geräte über ein zusätzliches Innengehäuse. An ihm werden die in das Gerät zu integrierenden Komponenten befestigt. Weiterhin vermittelt es dem Gesamtgerät gleichzeitig eine zusätzliche Steifigkeit, so dass die Gesamtstabilität erhöht wird. Innengehäuse werden ebenfalls genutzt, um die Strömungsführung – falls erforderlich – geräteintern zu optimieren.

Funktionseinheit: Energieversorgung

Die Energieversorgung ist zwingend notwendig, um ein Elektrogerät in Betriebsbereitschaft zu versetzen. In den meisten Anwendungsfällen ist sie als konventioneller Netzanschluss mittels Kabel ausgelegt. Je nach Gerät erweist es sich jedoch als sinnvoll,

alternative Mechanismen der Energieversorgung zu etablieren, um beispielsweise die Mobilität des Gerätes und somit den Komfort für den Nutzer zu erhöhen.

Funktionseinheit: Elektronik

Standardmäßig verwendete Elektronikkomponenten basieren bisweilen auf Technologien, die sich über einen gewissen Zeitraum etabliert und als funktionell erwiesen haben. Ansätze zur Optimierung können somit in der Abstimmung der gewählten Elektronik auf neue Komponenten des Produktes bestehen oder alternativ in einer Substitution geläufiger Konzepte durch innovative Schaltungsträgertechnologien der Elektronikproduktion wie räumlich spritzgegossene Schaltungsträger auf Thermoplastbasis ergänzend oder alternativ zum Einsatz von Folientechnologie. Sie bieten im Allgemeinen Rationalisierungspotentiale hinsichtlich Bauraum und Umwelt, sind jedoch für den Kunden in erster Linie nicht augenscheinlich, da sie keinen direkten Einfluss auf den Betrieb des Gerätes haben.

Für eine vollständige Systemanalyse ist es notwendig, nicht nur die oben genannten Funktionseinheiten zu betrachten, sondern sämtliche produktspezifischen Charakteristika zu erfassen. Jede Funktionseinheit wird idealerweise, wie in Bild 31 dargestellt, durch ein oder – abhängig von der betrachteten Funktion – mehrere Expertenteams analysiert, die unterschiedliche Ziele verfolgen. Ebenfalls ist es möglich, dass eine Arbeitsgruppe eine übergreifende Funktion hat und somit alle Funktionseinheiten als Grundlage ihrer Arbeit betrachtet. Als Beispiel sei hier die Durchführung einer Ökobilanz genannt.

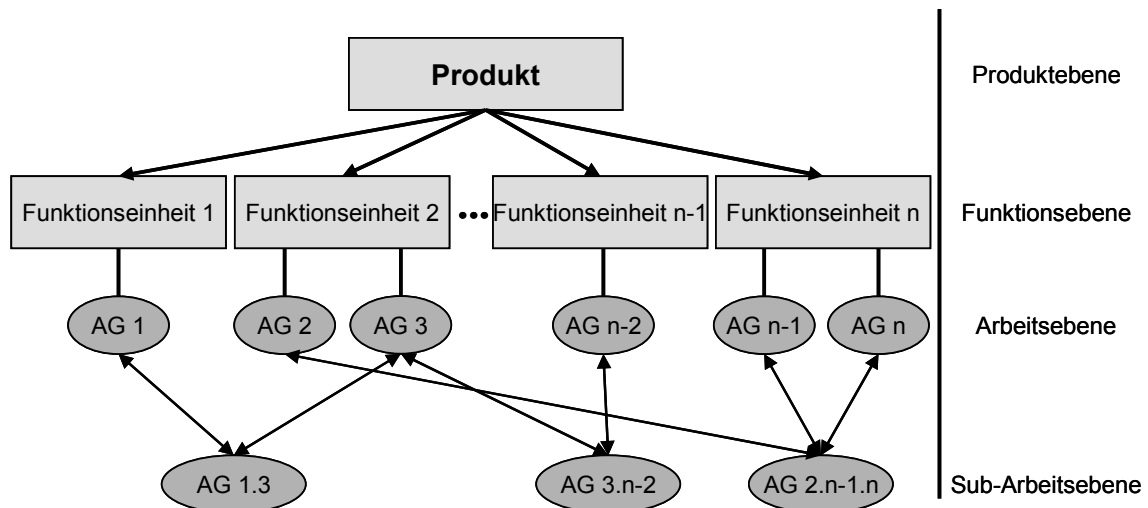


Bild 31: Etablierung von Arbeitsgruppen zur Analyse der Funktionseinheiten

Zur Erarbeitung der Potenziale einer Produktoptimierung im Sinne der Integrierten Produktpolitik durch mehrere Arbeitsgruppen ist die regelmäßige interne Kommunikation zwingend erforderlich. Sie dient der Ermittlung von Schnittstellen und Abhängigkeiten der einzelnen Funktionseinheiten, die zu übergreifenden Diskussionen und neuen Ansätzen bei der Problemerkennung führen. Auf festgestellte Defizite kann dadurch schnell und dynamisch reagiert werden, um bei Bedarf neue Arbeitsgruppen entsprechend entstehender Anforderungen einzusetzen.

Die Entwicklung und Umsetzung innovativer technologischer Ansätze macht ebenfalls eine enge Diskussion der beteiligten Gremien erforderlich, da interdisziplinäre Abhängigkeiten ggf. Maßnahmen nach sich ziehen, die sich auf weite Bereiche der Produktstruktur auswirken.

Zur Analyse einer Funktionseinheit ist es zunächst notwendig, sich deren spezifische Charakteristika bewusst zu machen. Dabei spielen neben der eigentlichen Funktion auch Faktoren wie deren Nutzen, auftretende Verluste, die Zweckmäßigkeit, das Design etc. eine wesentliche Rolle (Bild 32). Wichtig ist, diese in Bezug zu angrenzenden Funktionseinheiten zu setzen, um ein weitreichendes Verständnis der Gesamteinheit zu schaffen.

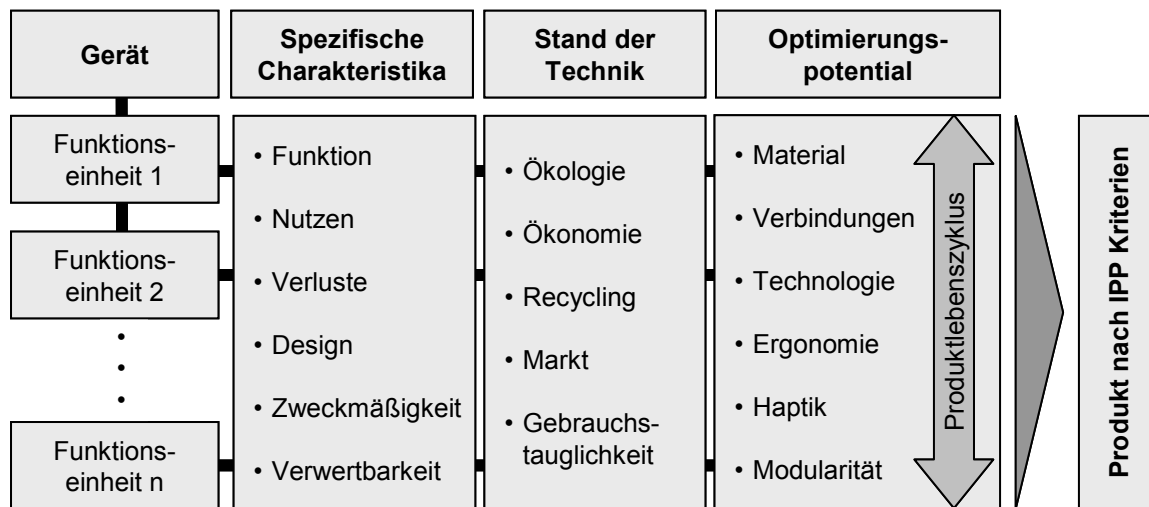


Bild 32: Geräteanalyse unter Berücksichtigung spezifischer Funktionseinheiten

Der folgende Schritt umfasst die Ermittlung des aktuellen Stands der Technik der betrachteten Funktionseinheit, um eine Arbeitsgrundlage für die Erarbeitung des Verbesserungspotenzials vorliegen zu haben. Ein Vergleich mit Produkten derselben Kategorie bietet sich gegebenenfalls an, um einen generellen Eindruck der Marktsituation zu gewinnen.

Abschließend ist das Optimierungspotenzial sowohl der einzelnen Einheit als auch - unter Berücksichtigung des Gesamtsystems - von jeder Arbeitsgruppe fachspezifisch zu erarbeiten. Der vollständige Produktlebenszyklus darf dabei nicht vernachlässigt werden, da eine Verschleppung ökologischer Auswirkungen von einer Produktlebensphase in die nächste der Idee der Integrierten Produktpolitik widerspricht.

Bei klassischen Kleingeräten der Massenproduktion fällt insbesondere auf, dass häufig eine große Anzahl unterschiedlicher Kunststoffarten verarbeitet und in das Produkt integriert werden. Nachdem Kunststoffe und insbesondere Kunststoffmischfraktionen schwer recycelbar sind, werden sie meist als Schredderleichtfraktion entsorgt. Die Entwicklung alternativer Konzepte könnte Ansatzpunkte bieten, Kunststoffe zu substituieren oder die Anzahl der verwendeten Kunststoffarten zu reduzieren, so dass Verwertungsprozesse vereinfacht und die Demontagefreundlichkeit der Produkte gesteigert werden.

Der Ansatz des europäischen Richtlinienvorschlags „Proposal for a directive of the European Parliament and of the council on establishing a framework for the setting of Eco-design requirements for Energy-Using Products and amending Council Directive 92/42/EEC“ (EUP) [149] (vgl. Kapitel 2.5.2) für energiebetriebene Produkte greift insbesondere für Massenprodukte des Konsumgüterbereichs, da diese ein hohes Potenzial im Entwicklungs- und Fertigungsprozess aufweisen.

Im Weiteren wird anhand eines „Bodenstaubsaugers“ das Entwicklungspotenzial eines klassischen Massengebrauchsgutes dargestellt, der, den Prinzipien der Integrierten Produktpolitik folgend, überarbeitet und neu entwickelt wurde.

4.4 IPP am Beispielprodukt Bodenstaubsauger

Im Rahmen des „Bayerischen Entwicklungsnetzes für innovative Technologien“ (BenefiT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurde das Potenzial zur Umsetzung der Prinzipien der Integrierten Produktpolitik an einem klassischen Massengebrauchsgut erkannt [49], [89]. Hierbei stand ein „Bodenstaubsauger“ als Kleinprodukt des Haushaltsbereiches im Vordergrund. Da diese Geräte in die Kategorie der Verbraucher gehören, die lediglich 12% des durchschnittlichen Energieverbrauchs eines Haushaltes aufweisen, stellt sich die Frage, in wie weit eine Optimierung des Produktes unter Gesichtspunkten der Integrierten Produktpolitik sinnvoll erscheint. Daher wird im Weiteren aufgezeigt, welches Potenzial in der nachhaltigen Entwicklung dieses traditionellen Produktes liegt.

Staubsauger haben als Haushaltsgeräte eine lange Tradition. Bereits am 30.08.1901 wurde der erste Staubsauger von Charles Booth, einem englischen Ingenieur, zum Patent angemeldet [29]. Jedoch erst die Massenproduktion kleiner Elektromotoren hat zu einer starken Entwicklung der Staubsauger geführt, die nunmehr für nahezu jeden Haushalt finanzierbar wurden.

Seitdem haben die Geräte in vielerlei Hinsicht einen Wandel durchlaufen: Neben der Entwicklung für unterschiedliche Anwendungsbereiche wie Boden- und Handgerät im Haushalt oder Industriesauger mit entsprechendem Leistungsvermögen werden unterschiedliche Funktionsprinzipien wie Zyklontechnologie oder Staubabscheidung in Wasser technisch umgesetzt.

Im Folgenden werden nach der allgemeinen Herangehensweise an die Umsetzung der Integrierten Produktpolitik bei einem Massenprodukt des Haushaltsbereiches die Kriterien zur Implementierung neuer Energie- sowie Gehäusekonzepte beschrieben, weiterhin wird eine Ökobilanz zur Entscheidungsfindung der im Rahmen des Projektes eingesetzten Materialien verwendet sowie der erzielte Erfolg dargestellt.

4.4.1 Herangehensweise an das Projekt im Rahmen von BenefiT

Ziel des Projektes BenefiT war, ein als ausgereift geltendes Haushaltsprodukt unter Gesichtspunkten der Integrierten Produktpolitik zu analysieren und dessen Optimie-

rungspotenzial zu erarbeiten. Um ein methodisches, systemorientiertes Arbeiten zu gewährleisten, wurde ein Projektteam gebildet, das aus 6 wissenschaftlichen Instituten der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und einem Industriepartner bestand¹. Die Mitglieder wurden entsprechend der Notwendigkeiten bestimmt, die sich anhand der Funktionseinheiten des Staubsaugers ergaben (Bild 33). Daraus entwickelt sich das Anforderungsprofil zur Analyse des Produktes nach IPP-Kriterien.

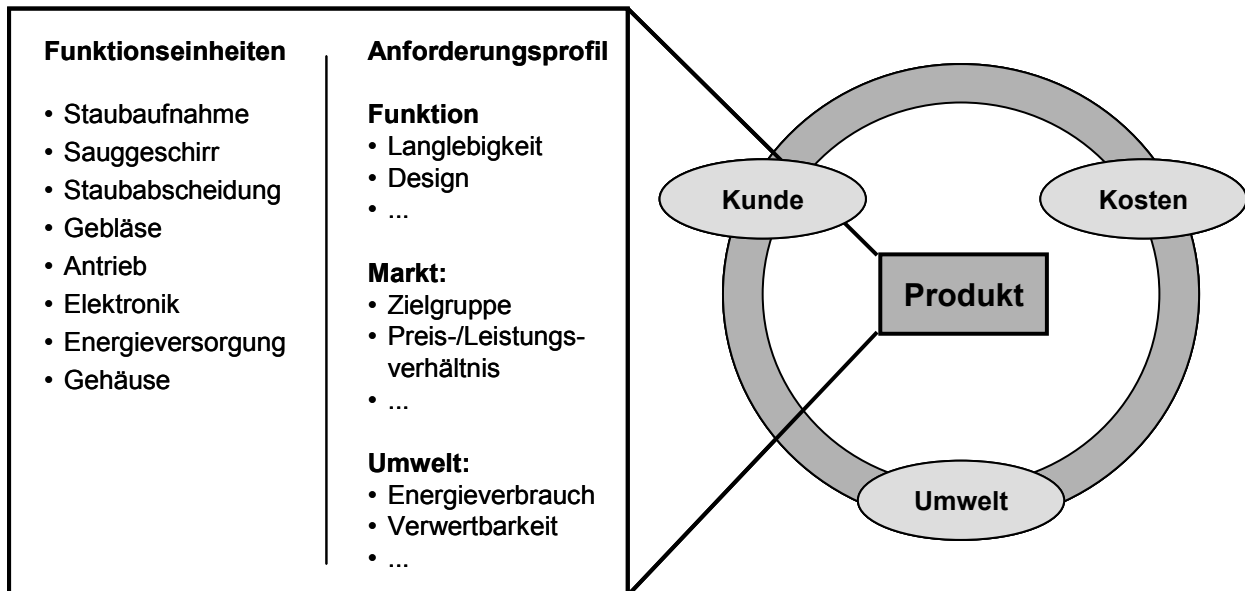


Bild 33: Funktionseinheiten und Auszüge des Anforderungsprofils zur Analyse eines Staubsaugers nach IPP-Kriterien

Das Produkt steht als zentrale Ursache der zu minimierenden Umweltbelastungen im Fokus der Betrachtung. Nachdem sich die Nachfrage stark am Kaufinteresse der Kunden orientiert, stellen deren Bedürfnisse ein wesentliches Kriterium bei der Umsetzung der Integrierten Produktpolitik dar. Weiterhin werden sowohl die Kosten als auch die Umwelt als gleichwertig zu berücksichtigende Faktoren etabliert, um ein Gerät auf dem Markt der Massenprodukte verkaufsfähig zu platzieren und von Konkurrenzprodukten hervorzuheben.

Wie in Bild 33 dargestellt, wurden bei dem zu betrachtenden Bodenstaubsauger acht Funktionseinheiten ermittelt, für die individuelle Anforderungsprofile zu entwickeln waren. Darüber hinaus wurde eine Ökobilanz erstellt, um die im Rahmen der Projektarbeit erzielten Maßnahmen in einem neutralen Vergleich dem zugrunde liegenden Referenzprodukt gegenüberstellen und bewerten zu können.

¹ Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Lehrstuhl für anorganische und analytische Chemie, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Lehrstuhl für Antriebe und Steuerungen, Dr. Kern GmbH.

4.4.2 Entwicklung alternativer Energieversorgungskonzepte

Die standardmäßige Energieversorgung elektrischer Massenkonsumgüter basiert in den meisten Fällen auf konventionellen Stromanschlüssen mittels Kabel. Zur Steigerung der Mobilität kann es ebenfalls sinnvoll bzw. notwendig sein, von dieser Variante abzuweichen und alternativ Akkumulatorsysteme zu verwenden. Als Beispiel seien hier Akkuschrauber oder Rasenmäher genannt.

Bei Staubsaugern hat sich bislang lediglich im Bereich der Handgeräte eine Energieversorgung mittels Akkumulatoren etabliert. Grund hierfür sind die geringen Leistungswerte im Bereich von lediglich 50 W bis 80 W und die kurze Nutzungsdauer von einigen Minuten, die mühelos durch Akkumulatoren realisiert werden können.

Die Voraussetzung zur Analyse der Energieversorgung des Bodenstaubsaugers war die Beibehaltung der Saugleistung des Gerätes. Die Zusammenarbeit der Projektgruppen zum Thema Staubaufnahme, Sauggeschirr, Staubabscheidung, Gebläse, Antrieb und Elektronik haben dazu geführt, dass eine Reduktion der Anschlussleistung auf 800 W bei gleicher Saugleistung wie die des Referenzgerätes realisiert werden konnte. Dies zeigt gleichzeitig, dass Arbeiten der Arbeitsgruppe Energieversorgung erst dann möglich waren, als die Rahmenbedingungen für die Anschlusswerte durch die übrigen Projektpartner definiert waren. Weitere zu berücksichtigende Aspekte entstehen aus den Anforderungen durch Kunde, Kosten und Umwelt, wie sie in Tabelle 6 definiert werden.

Kunde	Kosten	Umwelt
<ul style="list-style-type: none"> • Betriebszeit: 1,5-2 Stunden • Lebensdauer: 650-1.000 Stunden • Geringes Gewicht • Baugröße/Volumen: ähnlich Kabeltrommel • Ladezeit: max. 8 Stunden 	<ul style="list-style-type: none"> • Herstellkosten: 3,50 € (in Anlehnung an die Kosten der Kabeltrommel) • Verbrauchskosten gering • Entsorgungskosten gering 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimale Schadstoffe • Verwertungsfreundlichkeit • Hoher Wirkungsgrad

Tabelle 6: Anforderungen an die Energieversorgung des Bodenstaubsaugers

Kundenanforderungen:

Eine Analyse des Kundenverhaltens zeigt, dass Bodenstaubsauger im wesentlichen einmal pro Woche mit einer Betriebszeit von ca. 1,5 bis 2 Stunden genutzt werden. Nachdem das Gerät dabei durch den gesamten Wohnbereich transportiert wird, ist ein möglichst geringes Gesamtgewicht, insbesondere zum Reinigen von Treppenstufen, ein wesentliches Kaufkriterium. Die Baugröße einer alternativen Energieversorgung sollte die der Kabeltrommel somit nicht wesentlich überschreiten, um die Gesamtgröße des Gerätes gering zu halten. Weiterhin wird erwartet, dass die Geräte über eine Lebenserwartung von 8 bis 10 Jahren verfügen. Dies setzt die Langlebigkeit einer alternativen

Energieversorgung voraus. Im Falle einer Realisierung mittels Akkumulatoren sollte das Gerät über Nacht wieder einsatzbereit sein, so dass eine Ladezeit von 8 Stunden akzeptabel ist, bis die maximale Leistung des Gerätes wieder zur Verfügung steht.

Kostenanforderungen:

Die Herstellkosten der Energieversorgung mittels Kabel belaufen sich im Mittel auf ca. 3,50 Euro. Diesem geringen Wert steht die Steigerung der Mobilität gegenüber, die durch eine kabellose Leistungsbereitstellung gewährt wird, allerdings wesentlich höhere Investitionen hervorruft. Weiterhin sind ggf. auftretende Kosten der Nutzungszeit sowie für die Verwertung alternativer Methoden der Energiebereitstellung zu berücksichtigen und in die Gesamtbilanz einzubeziehen.

Umweltanforderungen:

Durch Einführung einer alternativen Energiebereitstellung darf sich – den Prinzipien der Integrierten Produktpolitik folgend – die Umweltbilanz des Produktes über den gesamten Produktlebenszyklus nicht verschlechtern. Das für die Kabelummantelung verwendete Weich-PVC im Niederspannungsbereich bis 1.000 V zeichnet sich neben seinen guten dielektrischen Eigenschaften durch eine hohe Witterungs- und Chemikalienbeständigkeit und leichte und kostengünstige Verarbeitbarkeit aus [1]. Aufgrund des hohen Kupferanteils verfügt das Kabel über eine gute Rezyklierbarkeit. Eine alternative Energieversorgung muss sich somit durch eine hohe Schadstofffreiheit sowie durch gute Verwertungsstrategien auszeichnen. Weiterhin ist ein hoher Wirkungsgrad zu erzielen, um vergleichbar zur Kabeltrommel respektive Netzbetrieb zu sein.

Unter der Voraussetzung, dass der Betrieb des Staubsaugers mit einem Gleichstrommotor realisiert werden kann, kommen als alternative Energieversorgungskonzepte Akkumulatoren und Brennstoffzellen in Betracht. Beide Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie über eine oder mehrere galvanische Zellen verfügen, die aufgrund der stattfindenden chemischen Reaktion Energie freisetzen. Im Folgenden werden deren Eigenschaften dargestellt, die zur Entscheidungsfindung der Energieversorgung für den Bodenstaubsauger geführt haben.

Der Akkumulatorenmarkt wird im Wesentlichen durch vier unterschiedliche Systeme charakterisiert [110]: Hierzu gehören Blei-Akkumulatoren, die primär als Kfz-Starterbatterien genutzt werden sowie in der Versorgung von Elektrofahrzeugen Anwendung finden. Weiterhin sind Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (Ni-Cd) im Bereich der Telekommunikationsgeräte weit verbreitet. Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (Ni-MH) werden für Anwendungsfelder wie Computer, Notebooks, tragbare Telekommunikationsgeräte, Audio-/Videogeräte, Spielwaren, Messinstrumente, Blitzgeräte etc. häufig genutzt, werden aber in zunehmendem Maße von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ion) abgelöst, die vor allem den Bereich der Telekommunikationsgeräte (Mobiltelefone), so-

wie Computer (Notebooks, Palmtops, Personal Digital Assistents (PDAs)) und weiterer Verbraucherprodukte (Camcorder) abdecken.

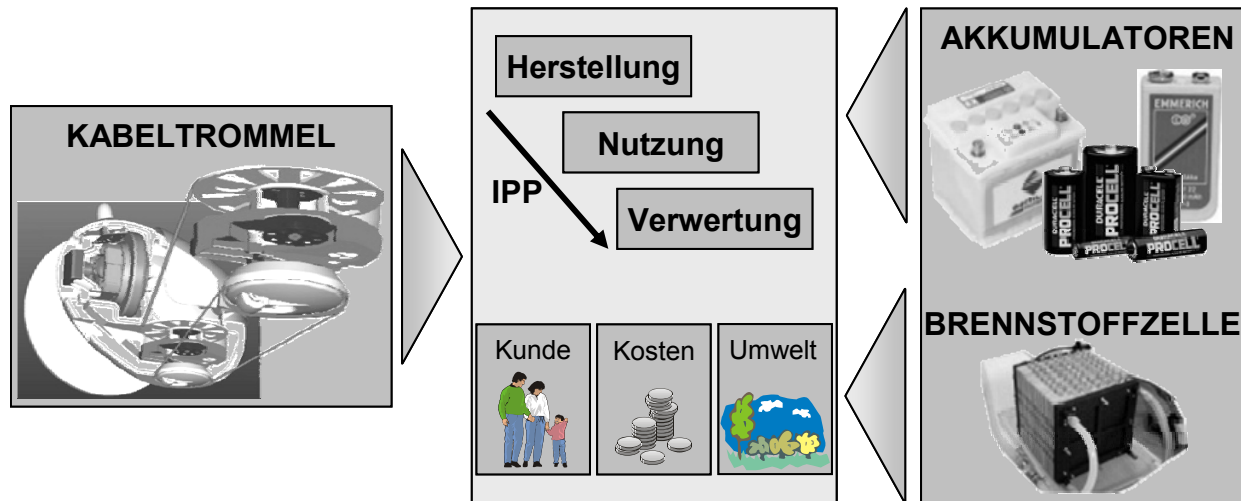


Bild 34: Gegenüberstellung der Kabeltrommel mit Akkumulatoren und Brennstoffzellen nach IPP- Kriterien hinsichtlich Kunden-, Kosten- und Umweltaspekten

Brennstoffzellen werden nach Art des verwendeten Elektrolyten unterschieden. Durch eine dauerhafte Versorgung mit Reaktionsprodukten, die zusätzliche Speichersysteme erforderlich machen, entladen sie sich nicht und sind keinen zeitlichen Einsatzbeschränkungen unterworfen. Durch die Arbeitstemperatur und die Edukt-Charakteristik kommen lediglich alkalische Brennstoffzellen und Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen als alternative Energieversorgung in Betracht. Sie finden u. a. Anwendung im Fahrzeugbau und kleinen Blockheizkraftwerken [10].

	Einheit	Blei	Nickel-Cadmium	Nickel-Metallhydrid	Litium-Ionen
Spezifische Energie	[Wh/kg]	25 – 35	55	64	150
Energiedichte	[Wh/dm ³]	k. A.	88 – 95	135	250
Spezifische Leistung	[W/kg]	50 – 100	122	150	300

Tabelle 7: Energetische Kennzahlen betrachteter Akkumulatoren [92], [110]

Zu den spezifischen Charakteristika von Akkumulatoren gehört die Energiedichte. Sie beschreibt die in einer Zelle oder Batterie gespeicherte Energie und wird als gravimetrische Energie [Wh/kg] bzw. volumetrische Energiedichte [Wh/m³] ausgedrückt. Tabelle 7 stellt diese für die in Frage kommenden Akkutypen gegenüber. Der Litium-Ionen Akkumulator der sich durch die höchste Energiedichte mit 300 W/kg auszeichnet, stellt jedoch auch die teuerste Systemlösung dar. Aufgrund der Verwendung von Cobalt in der positiven Elektrode sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren rund viermal so teuer wie Energiespeicher aus Nickel-Cadmium [28].

Nachdem bei Brennstoffzellen die Reagenzien außerhalb des Brennraumes gespeichert werden, ist für einen effektiven Vergleich die Energiedichte der Speicher gegenüber zu stellen. Diese hängt allerdings vom Kompressionsgrad der Speichergase ab, der stark variieren kann. Ausführliche Untersuchungen zu diesem Thema würden an dieser Stelle zu weit führen, so dass auf einschlägige Fachliteratur verwiesen wird.

Die Zyklenlebensdauer von Akkumulatoren und Brennstoffzellen ist stark vom Nutzerverhalten abhängig. Insbesondere bei Akkumulatoren muss für exakte Aussagen neben dem Entlade- auch das Aufladeverhalten berücksichtigt werden. Um dennoch Aussagen treffen zu können, erfolgen Untersuchungen unter Normbedingungen. Diese zeichnen sich durch wohl definierte Entladevorgänge aus, die unter fest definierten Rahmenbedingungen wie Entladestrom und -spannung, konstanter Temperatur etc. durchgeführt werden. Hierbei erzielen Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren bis zu 1.000 Normentladungen, Lithium-Ionen-Akkumulatoren weisen bis zu 1.500 Zyklen auf. Bleiakkumulatoren variieren je nach Typ zwischen 200 und 2.000 Entladevorgängen. Der Einfluss der Betriebstemperatur wirkt sich ebenfalls auf die Zyklenlebensdauer von Akkumulatoren aus. Sie sind technologisch allerdings dahingehend ausgelegt, dass die Lade- und Entladekurve im Bereich der Raumtemperatur (20 °C) ihre ideale Funktion aufweisen [92].

System	Inhaltsstoffe
Blei-Akkumulatoren	Blei, PbSO ₄ , PbO ₂ , Schwefelsäure
Ni-Cd-Akkumulatoren	Cadmium, Nickel, Eisen, KOH
Ni-MH-Akkumulatoren	Nickel, Eisen, Kobalt, Lanthan, Cer, Neodym, Praseodym, H ₂ , O ₂ , Graphit, KOH
Li-Ion-Akkumulatoren	Vielfältige chemische Variationen, nicht jeder Typ beinhaltet alle genannten Stoffe: Li, C, Acetonitril, Schwefeldioxid, LiBr, Thionylchlorid, LiCl, AlCl ₃ , Sulfurylchlorid, MnO ₂ , 1,2-Dimethoxyethan, Vanadiumpentoxid, Methylformiat, THF, Chromoxid, Silberchromat, Lithiumperchlorat, CuO, Fe, Ni, 1,3-Dioxolan, CuS, Kupferoxiphosphat
Alkalische Brennstoffzellen	Elektrolyt: Kalilauge, Reagenzien: Wasserstoff und Sauerstoff, Schwermetallbeschichtungen der Elektroden (z. B. Platin, Ruthetium) als Katalysatoren
Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle	Elektrolyt: Polymer, Reagenzien: Wasserstoff und Sauerstoff, Schwermetallbeschichtungen der Elektroden (z. B. Platin, Ruthetium) als Katalysatoren

Tabelle 8: Inhaltsstoffe betrachteter Energiespeichersysteme

Die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle hat bei Wechselbetrieb eine geschätzte Nutzungsdauer von 4.000 Stunden, im kontinuierlichen Betrieb wären bis zu 40.000 Stunden möglich. Dies ist auf das durch das Starten und Stoppen und das einhergehende Fluten und Trocknen zurück zu führen, was die Membran beeinträchtigt. Die alkalische Brennstoffzelle ist robuster, so dass eine höhere Betriebsdauer ermöglicht werden kann [10]. Bei Brennstoffzellen ist die erhöhte Betriebstemperatur zu beachten:

Temperaturspannen von 60°C bis 120°C machen ein äußeres Kühlsystem notwendig, so dass ein zusätzlicher Aufwand zum Betrieb erforderlich ist. Weiterhin sind für die Brennstoffzelle Temperaturregelmechanismen zu implementieren, da eine zu geringe Kerntemperatur starke Leistungseinbußen mit sich bringt. Zu hohe Temperaturen wirken sich wiederum auf das System negativ aus, da eine längere Vorwärmzeit zu einem Verlust an Nutzenergie führt [10].

Die in Akkumulatoren und Brennstoffzellen enthaltenen Wertstoffe sind z. T. aus toxikologischen Gründen in die Gruppe der Schadstoffe einzuordnen (Tabelle 8). Sofern sich diese Stoffe in einem geschlossenen Stoffkreislauf bewegen, geht von ihnen keine Gefährdung aus. Nachdem dies trotz moderner Recyclingverfahren kaum möglich ist, besteht in allen Lebensphasen dieser Energieversorgungssysteme die potenzielle Gefahr einer Kontamination.

Einen Überblick über die Wirkung einiger der in den diskutierten Akkumulatoren und Brennstoffzellen enthaltenen Substanzen auf Mensch und Umwelt ist in Tabelle 9 dargestellt (MAK = Maximale Arbeitsplatzkonzentration). Die potenzielle Gefährdung während der Nutzung der Energiespeichersysteme ist im Allgemeinen als gering einzustufen. Im Rahmen einer vollständigen Analyse hinsichtlich Integrierter Produktpolitik ist die Wirkung jedoch nicht vernachlässigbar, da sie sich wesentlich auf die Fertigungs- und Verwertungsprozesse auswirkt, die dadurch komplexer ausfallen als ein Standardnetzbetrieb.

Während der Lebensdauer der betrachteten Energiespeicher treten neben Aufwendungen für die Beschaffung ebenfalls Kosten während der Nutzungsphase auf. Bei Akkumulatoren ist dies auf den ersten Blick nicht ersichtlich. Allerdings muss zur vollständigen Betrachtung der Betriebskosten neben der Bereitstellung eines Ladegerätes ebenfalls die Energie berücksichtigt werden, die zur Wiederaufladung der Akkumulatoren notwendig ist. Der entstehende Aufwand ist wiederum stark von der Auslegung und Wahl des Ladegerätes abhängig sowie vom Nutzerverhalten. Bereits in Kapitel 4.2.1 wurde dargestellt, dass Ladegeräte oftmals stille Verbraucher darstellen, da sie vom Anwender an die Stromversorgung angeschlossen, aber nach Beendigung des Ladevorgangs nicht wieder vom Netz genommen werden. Aufgrund der auftretenden Verlustleistung im Stand-by Betrieb wird eine beständige Energieentnahme vom Netz verursacht, die in die Gesamtkosten- und -umweltbilanz zu integrieren ist, allerdings aufgrund der Verursacherwirkung eine sehr variable Größe darstellt.

Die Kostenentstehung von Brennstoffzellen während der Nutzungsphase ist dem hingegen offensichtlich: Die zum Betrieb notwendigen Reagenzien müssen fortwährend über Speichervorrichtungen nachgeliefert werden. Nachdem nach der chemischen Reaktion das Edukt abgeführt wird, ist der Vorgang irreversibel, so dass die zum Betrieb notwendigen Reagenzien abhängig vom Grad der Nutzung regelmäßig bereit gestellt werden müssen. Im Fall von Wasserstoff und Sauerstoff kann der Wasserstoff einerseits als Chemikalie erworben werden, andererseits aus fossilen Brennstoffen oder regenerativ erzeugt werden. Die Art der Bereitstellung wirkt sich somit wesentlich auf die Ökobilanz aus.

Substanz	Wirkung
Acetonitril	Giftig bei Inhalation, oraler Aufnahme und Hautkontakt. MAK-Wert: 20 ml/m ³ .
Blei	Giftig, kann sowohl oral, dermal als auch inhalativ aufgenommen und akkumuliert werden, chronische und akute Vergiftungen möglich, anthropogene Umweltbelastungen primär im Bereich des Erzbergbaus und der Verhüttung von Pb-haltigen Erzen. Schutzmaßnahmen im Umgang mit Blei sind in der TRGS 505 festgelegt. MAK-Wert: 0,1 mg/m ³ .
Brom	Sehr giftig beim Einatmen, verursacht schwere Verätzungen bis hin zu Kehlkopf- und Lungenödemen. LD (oral Mensch): 14 mg/kg
Cadmium	Hochgiftig und krebserzeugend (Krebserzeugend Kategorie I, Keimzellenmutagen 3A), Akkumulation vor allem in der Leber und den Nieren, akut toxische Dosis von löslichen Cadmiumsalzen: 30 mg. Tägliche Aufnahme von ca. 200 µg Cd verursacht signifikante Nierenfunktionsstörungen. Cd-Eintrag in die Umwelt erfolgt hauptsächlich bei der Metallverhüttung, Müllverbrennung und -deponierung
Cobalt	Karzinogener Stoff, LD 50 (oral, Ratte): 6170 mg/kg, Keimzellenmutagen 3A
CrO ₃ und Silberchromat	Chrom (VI) Verbindungen: hochgradig krebserregend, CrO ₃ verursacht starke Verätzungen, eingeatmeter Chromstaub ruft Geschwüre in der Nasenschleimhaut, Katarrhe der tieferen Atemwege und Lungengeschwüre hervor, 1 bis 2 g vom Magen aufgenommenes Chrom(VI)oxid wirkt tödlich
Kaliumhydroxid	Bei Kontakt mit der Haut stark ätzende und gewebezerstörende Wirkung
Lithium	An Luft selbstentzündlich, reagiert heftig bei Kontakt mit Wasser unter Bildung leichtentzündlicher Gase
Natrium	Reagiert heftigst mit Wasser unter Bildung leicht entzündlicher Gase, selbstentzündlich an Luft
Nickel, Nickelverbindungen	Toxisches, allergenes und mutagenes Potenzial, TRK-Wert: 0,5 mg/m ³ .
Schwefeldioxid	SO ₂ reagiert mit Wasser zu schwefliger Säure, die gesundheitsschädlich und ätzend wirkt, MAK-Wert: 1 ml/m ³ .
Schwefelsäure	Starke Acidität. Bei Kontakt mit der Haut besteht die akute Gefahr von starken Verätzungen, MAK-Wert: 0,2 mg/m ³
Sulfurylchlorid und Thionylchlorid	Heftige Reaktion mit Wasser unter Bildung stark ätzender HCl-Gase.
Vanadiumpentoxid	In hohen Konzentrationen toxisch. Oral aufgenommen wird es in nur sehr kleinen Mengen resorbiert, MAK-Wert: 0,05 mg/m ³


Tabelle 9: Toxische Wirkung einiger Inhaltsstoffe von Energiespeichersystemen

Die Verwertung von Akkumulatoren wird seit der im Oktober 1998 in Kraft getretenen Batterieverordnung [150] über die Verpflichtung der Hersteller und Importeure geregelt, welche Altbatterien zurücknehmen, sortieren und verwertungsgerecht entsorgen müssen. Dies wird durch ein gemeinsames Rücknahmesystem sichergestellt, welches durch den Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) und nam-

hafte Hersteller als „Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ (GRS-Batterien) gegründet wurde. Entstehende Kosten für Sammellogistik und Verwertung werden über einen Aufschlag bzw. Pfand auf den Kaufpreis der Akkumulatoren finanziert.

Nachdem Brennstoffzellen bislang nicht die Verbreitung wie Batterien aufweisen, fehlen entsprechende Verordnung für diese Systeme. Ebenso existieren keine etablierten Recyclingverfahren, so dass eine ökologisch verträgliche Verwertungsmethode dieser Energieversorgungsvariante nach derzeit aktuellem Wissensstand nicht existiert.

Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass der Markt mittlerweile vereinzelt Staubsauger anbietet, die auf Basis von Akkumulatoren autonom navigierend durch die Wohnung fahren und Staub aufnehmen [67], [68]. Diese Geräte koppeln sich mit einer Ladestation, um einerseits die Akkumulatoren nachzuladen, andererseits die aufgenommenen Staubpartikel in den Hauptfilter der Basisstation zu entleeren.



Kriterium	Reinigungsroboter	Bodenstaubsauger
Mobilität	Uneingeschränkt	Eingeschränkt
Flexibilität	Eingeschränkt	Uneingeschränkt
Kosten	Hoch	Gering – Mittel
Umweltwirkung	Mittel	Gering
Bereitstellungszeit	Ca. 20 Minuten	Uneingeschränkt

Bild 35: Gegenüberstellung der Charakteristika von Reinigungsrobotern [67] mit konventionellen Bodenstaubsaugern

Im Vergleich zu konventionellen Bodenstaubsaugern bieten diese Geräte einige entscheidende Nachteile: Die Flexibilität ist gegenüber konventionellen Bodenstaubsaugern eingeschränkt, da diese abhängig vom Ladezustand und im Raum befindlichen Gegenständen nur einen begrenzten Aktionsradius aufweisen. Weiterhin liegen anfallende Kosten für die Beschaffung der Geräte um den Faktor 10 bis 20 höher. Darüber hinaus stellt die Basisstation einen stillen Verbraucher dar, da kontinuierliches Wiederaufladen der Akkumulatoren an der Basisstation erforderlich ist. Neben Energiekosten wird somit ein ständiger Umwelteintrag verursacht. Die Herstellung erfordert neben einem zusätzlichen Aufwand für die Bereitstellung der Akkumulatoren, die meist als Ni-MH-Akkumulatoren ausgeführt werden, eine hochwertige Sensorik und Steuerungstechnik, welche die Navigation des Gerätes im Raum möglich macht, ohne dass es an Gegenständen hängen bleibt oder Treppen hinunter fällt.

Für den Hausgebrauch erscheinen Reinigungsroboter ungeeignet, da sie vor allem aufgrund der Kostensituation den allgemeinen Anforderungen widersprechen. Darüber hinaus macht die eingeschränkte Flexibilität eine zusätzliche Reinigung der Wohnbereiche notwendig, die das Gerät nicht erreicht. Die Kosten-/Nutzenrelation fällt somit ver-

gleichsweise schlecht aus, so dass damit zu rechnen ist, dass die Verbreitung dieser Produkte lediglich im begrenzten Rahmen ausfällt.

4.4.3 Nutzung der ökologischen Bewertung zur Entscheidungsfindung

Der Aufbau einer ökologischen Produktbewertung und die dazu gehörige Methodik wurden bereits in Kapitel 3.3.1 vorgestellt. Die im Rahmen des BENeFIT-Projektes zugrunde liegende Motivation zur Durchführung der ökologischen Bewertung bestand darin, sowohl horizontale wie auch vertikale Vergleichsparameter zu erarbeiten, die den ökologischen Fortschritt des entwickelten Prototypen dokumentieren. Horizontale Analysen ermöglichen dabei einen quantitativen und qualitativen Vergleich mehrerer Geräte der gleichen Produktkategorie über den Lebenszyklus, wohingegen die vertikale Analyse unterschiedliche Fertigungsvarianten einer Komponente in einer Lebensphase kritisch gegenüberstellt und bewertet.

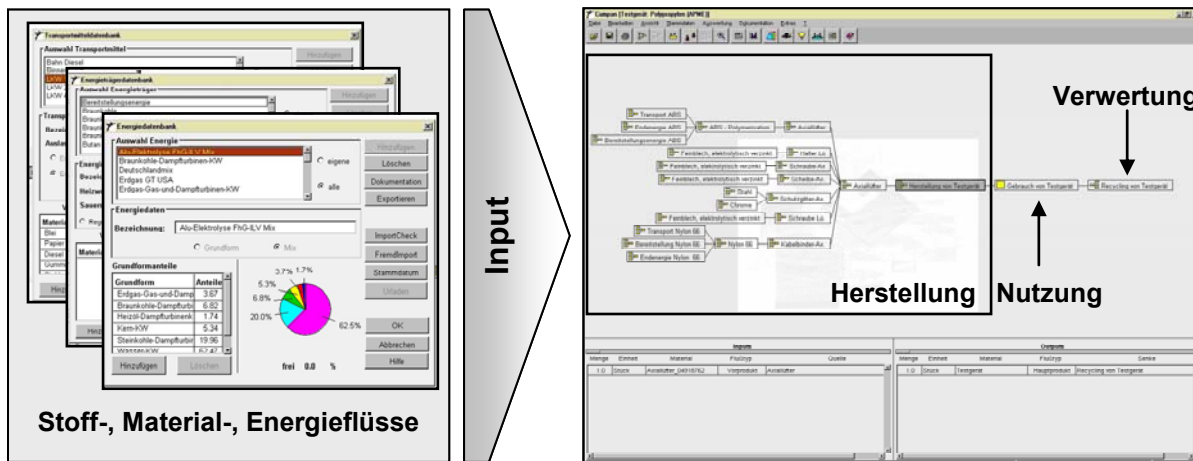


Bild 36: Modellierungsgrundlagen in CUMPAN

Für die Modellierung der im BENeFIT-Projekt betrachteten Staubsauger wurde als Analysetool die Software „CUMPAN“ [12] in der Version 1.44 der Firma T-Systems verwendet. Sie bietet die Möglichkeit, Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase von Produkten unter Verwendung einer Oracle-Datenbank abzubilden. Dieser liegen Informationen über Material-, Stoff- und Energieflüsse als Datenbasis zugrunde (Bild 36). In der Datenbank fehlende, jedoch zur Abbildung notwendige Module konnten weitestgehend aus entsprechender Literatur [25] oder Internetdaten [38] ergänzend generiert werden.

Ziel der Analyse in BENeFIT war ein Vergleich des Referenzgerätes „Ökovampyrino“ der Firma AEG mit dem während des Projektes entstandenen Prototypen. Der direkte Vergleich der Daten des Referenzmodells, das den gängigen Anforderungen hinsichtlich Design, Leistung und Handhabung an einen modernen Bodenstaubsauger entspricht, ermöglicht die unmittelbare Visualisierung des ökologischen Potenzials.

Die Herstellungsphase wurde unter Berücksichtigung der für die Komponenten verwendeten Materialien modelliert. Dabei blieb eine etwaige Montagerihenfolge unberücksichtigt, da die Bereitstellung der Komponenten unabhängig davon zu erfolgen hat.

Grundlage der Nutzungsphase ist die Definition einer Dienstleistungseinheit, auf die sämtliche, während dieses Lebenszyklus auftretenden Stoffflüsse bezogen werden. Für die Modellierung der Entsorgungsphase wurde die zuvor mit dem Programm „Display/ReGrEd“ ermittelte optimale Demontagereihenfolge und -tiefe zugrunde gelegt.

Herstellungsphase

Zunächst stand die Modellierung des Referenzproduktes „Ökovampyrino“ im Vordergrund. Dieses Gerät besteht aus insgesamt 83 Komponenten, die wiederum eine Materialvielfalt von 26 unterschiedlichen Stoffen aufweisen. Die als Datenbasis zugrunde liegenden Werte der Komponenten und Materialien wurden sowohl für die Ermittlung der Demontageanalyse mittels des Demontageanalysetools Display/ReGrEd, als auch für die Modellierung in CUMPAN verwendet. Ausführliche Informationen über die Demontageanalyse können in [109] gefunden werden.

Stoffgruppe	Gewicht [kg]	Anteil [%]
Sonstige unproblematisch	0,0019	0,03
Flammschutz	0,001466	0,03
Elektrische Bauelemente	0,01012	0,18
Chrom	0,01728	0,31
PBT (persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe)	0,0125	0,23
Glasfaser	0,0125	0,23
Weichmacher	0,00511	0,09
POM	0,0839	1,52
SBR	0,129	2,34
Mischstoffe	0,0431889	0,78
SUMME	0,3169649	5,98

Tabelle 10: Fehlende Daten zur Modellierung des Referenzgerätes in CUMPAN

Für die Abbildung des Referenzgerätes in CUMPAN standen nicht alle benötigten Bilanzierungsmodule mit den notwendigen Stoff- und Energieströmen zur Verfügung. Daher konnte die Darstellung nicht ohne Abstriche erfolgen. Tabelle 10 gibt einen Überblick über fehlende Stoffgruppen und deren Anteil am Gesamtprodukt. Bei den fehlenden Modulen handelt es sich um Komponenten mit einem Gewicht von ca. 317,0 g. Dies entspricht einem Anteil von ca. 6% der Gesamtmasse von 5.508,4 g des Staubsaugers. Nachdem das ökologische Gefährdungspotenzial dieser Stoffe als gering ein-

gestuft wurde, wurde der bei der Modellierung auftretende Fehler als tolerierbar eingeschätzt.

Nach Fertigstellung der Modellierung des Referenzgerätes sowohl in Display/ReGrEd als auch in CUMPAN, wurden nach einer ersten Analyse einerseits die hohe Materialvielfalt andererseits die Materialwahl als wesentliche Kriterien sowohl für einen erheblichen Demontageaufwand als auch für einen starken, ökologischen Impact eingestuft. Daher bestand eine Herausforderung der Projektpartner darin, die vorhandene Materialvielfalt zu reduzieren. Nachdem die Motor-/Gebläseeinheit wenig Spielraum bei der Materialwahl lässt, wurden insbesondere die für das äußere und innere Gehäuse, als auch die für das Sauggeschirr verwendeten Materialien betrachtet. Dabei handelt es sich primär um unterschiedliche Kunststofffraktionen.

Für die Verwendung im Prototypen wurden drei in Frage kommende Kunststoffe identifiziert. Dabei handelt es sich um die Thermoplaste Polyamid, Polyethylen und Polypropylen, die gängige Materialien im Haushaltsgerätebereich darstellen und sich durch ihre Recyclingfähigkeit auszeichnen.

Neben Umweltwirkungen stellen physikalische und monetäre Hintergründe wesentliche Kriterien für die richtige Materialauswahl dar. Tabelle 11 stellt die charakteristischen Kenngrößen für die genannten Stoffe gegenüber. Dabei zeigt sich, dass Polyamid das beste Zug-E-Modul und die höchste Streckspannung aufweist, allerdings recherchierte Kosten in Höhe von € 2,00 bis 2,50 je Kilogramm dieses Material indiskutabel werden lassen, da zu hohe Fertigungskosten die auftretenden Vorteile nicht rechtfertigen. Somit verbleiben Polyethylen und Polypropylen, die beide gleiche Kosten aufweisen.

Material	Zug-E-Modul [MPa]	Streckspannung [MPa]	Streckdehnung [%]	Dichte [kg/m³]	Preis [€/kg]
PE-LD	200	9	15,5	919	0,30-,040
PP	1500	34	9,0	910	0,30-0,40
PA	3000	85	4,5	1130	2,00-2,50

Tabelle 11: Technischer und Kostenvergleich möglicher Materialalternativen [91]

Die Durchführung einer ökologischen Bewertung der drei in Frage kommenden Kunststoffarten mittels CUMPAN stellt diese hinsichtlich der von ihnen ausgehenden Wirkungen in der Herstellungsphase gegenüber (Bild 37). Polyamid (PA) stellt sich als wirkungsstärkste Substanz insbesondere bei folgenden Wirkungskategorien dar: Energieträger nicht erneuerbar, Eutrophierung (PO₄), Menge Sondermüll, Rohstoffe, Schwermetalle in Luft, Schwermetalle in Wasser, Treibhauseffekt und Versauerung. Die Fertigung von Polyethylen (PE) hingegen wirkt am stärksten auf die Kategorien Energieträger erneuerbar, Menge Hausmüll, Sauerstoff und Sommersmog (C₂H₄) aus. Polypropylen (PP) hingegen zeichnet sich durch seinen vergleichsweise geringen Umwelteintrag aus.

In technologischer Hinsicht weist Polyethylen ein Zug-E-Modul von 200 MPa und eine Streckspannung von 9 MPa auf. Dem gegenüber verfügt Polypropylen über ein Zug-E-Modul von 1.500 MPa bzw. eine Streckspannung von 34 MPa (Tabelle 11). Dementsprechend wird aus ökonomischer und technologischer Hinsicht Polypropylen als das Material ausgewählt, das Hauptbestandteil des zu entwickelnden Prototypen werden soll.

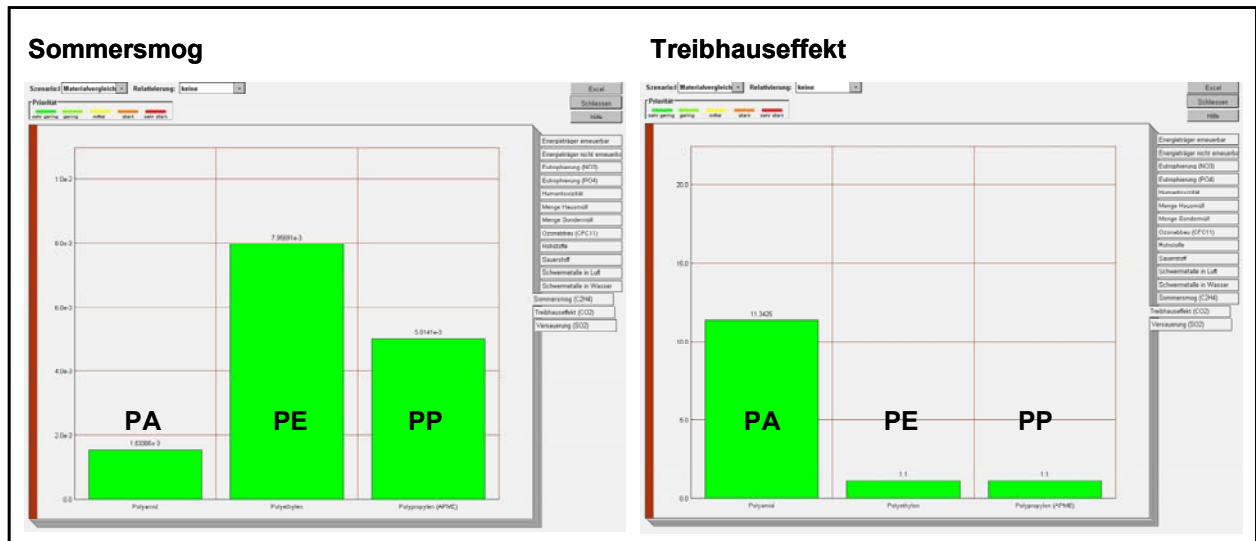


Bild 37: Beispielhafte Ergebnisse der Wirkungsbilanz für den Fertigungsprozess möglicher Materialvarianten

Auch bei der Neuentwicklung des Saugschlauches zeigt die ökologische Bewertung, dass sich das neu entwickelte Konzept positiv auf die Bilanz auswirkt. Bild 38 stellt die prozentuale Veränderung der Input- und Outputströme des Prototypensauggeschirrs in Bezug zu dem des Referenzgerätes dar.

Dabei fällt auf, dass mit Ausnahme der „stofflich genutzten Rohstoffe mit Heizwert“, die „Umweltbelastung des Wassers“ und die „hausmüllähnlichen Abfälle“ alle übrigen Stoffströme abnehmen. Insbesondere die „Warenförmigen Kuppelprodukte“ (WKP)² und die „Umweltbelastung des Bodens“ reduzieren sich um 100%, d.h. vollständig. Der Anstieg des Inputs bei den „stofflich genutzten Rohstoffen mit Heizwert“ liegt darin begründet, dass das gesamte Sauggeschirr des Prototypen aus Polypropylen gefertigt wird. Die Steigerung der Outputflüsse der „Umweltbelastung durch Wasser“ und durch „hausmüllähnliche Abfälle“ scheint zunächst mit knapp 45% bzw. 210% sehr hoch zu sein. Absolut gesehen handelt es sich allerdings lediglich um eine Erhöhung von 0,005 kg und 0,00245 kg, die bezogen auf die Gesamtbilanz vernachlässigbar klein ist.

² Warenförmige Kuppelprodukte sind Stoffe, die bei der Produktion, der Nutzung oder der Entsorgung anfallen und in anderen Prozessen weiter verwendet werden können.

Nutzungsphase

Die Nutzungsphase stellt einen Zeitraum dar, der im Wesentlichen groben Abschätzungen unterliegt, da während dieser Periode das Verhalten des Verbrauchers die zu erwartenden Daten maßgeblich bestimmt. Dahingehend wurde für beide Staubsauger von einer zu erwartenden Lebensdauer von durchschnittlich 8 Jahren bzw. 650 Nutzungsstunden ausgegangen. Während dieses Zeitraumes kann damit gerechnet werden, dass der verwendete Staubsack, der ein Volumen von 2 Litern aufweist, alle 2 Monate gewechselt werden muss. Dies führt zu einer Anzahl von insgesamt 48 Staubsäcken, die als Inputstrom in die Nutzungsphase einfließen. Einem vollen Staubsack wird ein Gewicht von ca. 0,2 bis 0,25 kg zugrunde gelegt. Das Leergewicht des Sacks beträgt 0,028 kg, so dass während einer Lebensdauer von 8 Jahren ca. 12 kg Staub aufgenommen werden und gemeinsam mit dem Sack entsorgt werden müssen. Diese Annahmen treffen auf das Referenzgerät und den Prototypen gleichermaßen zu, da sowohl die Lebensdauer als auch die Größe und Anzahl des Staubsacks für beide identisch sind, so dass in der Bilanz diesbezüglich kein Unterschied auftritt.

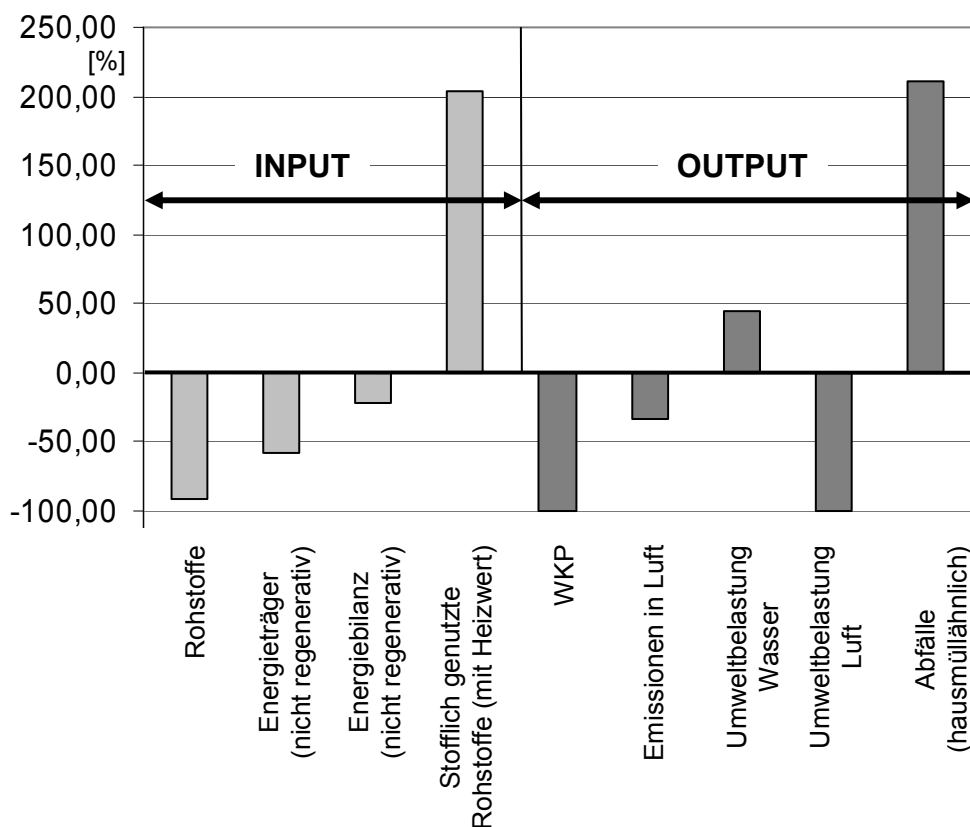


Bild 38: Prozentuale Verteilung der In- und Outputströme des Prototypensauggeschirrs bezogen auf das Referenzgerät

Das Potenzial der Neuentwicklung zeigt sich insbesondere im Energieverbrauch. Durchschnittliche Bodenstaubsauger weisen eine Anschlussleistung von ca. 1.000 W auf. Davon werden ca. 790 W als Verlustleistung in Form von Wärme abgeführt [52]. Die Verluste treten mit ca. 600 W größtenteils an der Motor- und Gebläseeinheit und mit

120 W am Gehäuse auf. Die verbleibenden Verluste verteilen sich auf die Elektronik, Nebenluft, die Filter, das Dämmmaterial und Zubehör, wo auch der Saugschlauch zuzurechnen ist, so dass eine effektive Saugleistung von lediglich ca. 210 W verbleibt (Bild 39). Die gesamten Verluste betragen somit nahezu 80% der gesamten Anschlussleistung des Gerätes. Dies war ein für die Entwicklung des Prototypen unakzeptabler Wert, der in vielerlei Hinsicht die Basis für eine nachhaltige Optimierung dargestellt hat.

Daher wurde bei der Entwicklung des Prototypen darauf geachtet, die Verluste zu minimieren, so dass trotz einer verringerten Anschlussleistung von 750 W eine erhöhte Saugleistung zu erwarten ist. Die Steigerung des Wirkungsgrades des Motors auf 95%, Einsparungen der Verluste beim Gebläse von 10% und beim Sauggeschirr von 30% reduzieren die Gesamtverluste auf ca. 300 W, bzw. 40% der Gesamtleistung.

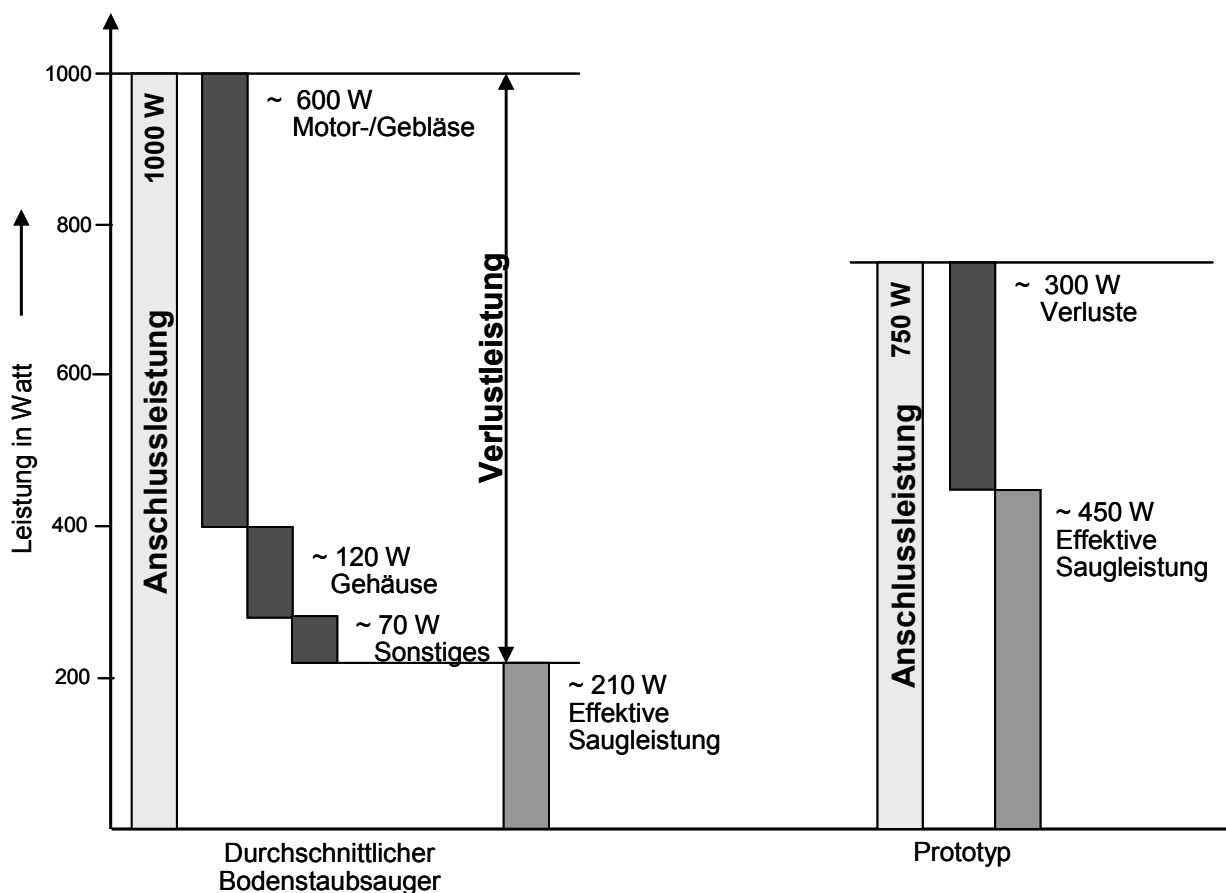


Bild 39: Gegenüberstellung der Leistungsverhältnisse eines durchschnittlichen Bodenstaubsaugers [52] mit Werten des Prototyps

Unter Zugrundelegung dieser Werte lässt sich der Energieverbrauch der Geräte während der geschätzten Nutzungsdauer von 650 Betriebsstunden ermitteln. Der Vergleich zeigt, dass der Energieverbrauch von ca. 650 kWh um ca. 25% auf ca. 490 kWh reduziert werden konnte. In CO₂-Äquivalenten ausgedrückt bedeutet dies eine Einsparung von 136 kg CO₂, ausgehend von der Annahme, dass 1 kWh Strom aus dem deutschen Energiemix ca. 850 g CO₂ emittiert [54].

Entsorgungsphase

Der Modellierung der Entsorgungsphase werden die Daten der optimalen Demontage aus Display/ReGrEd zugrunde gelegt. Dadurch kann neben den Entsorgungsprozessen ebenfalls die Reihenfolge der Demontage mit den zu öffnenden Verbindungen dargestellt werden. Während für das Referenzgerät noch 37 Verbindungen zu öffnen sind, um die optimale Demontagetiefe zu erreichen, reduziert sich deren Anzahl für den Prototypen auf lediglich 3 Verbindungen. Dies führt zu einer stark verkürzten Demontagezeit, die sich sowohl monetär, als auch ökologisch durch einen verringerten Energieeinsatz und andere Verwertungsstrategien positiv auswirkt.

Nachdem keine referenzierbaren Ökobilanzdaten der Entsorgungsprozesse zugrunde gelegt werden konnten, war die Durchführung eines ökologischen Vergleichs der Verwertung nicht möglich. Die Reduktion der Materialvielfalt von 26 Stoffen auf lediglich 13 Stoffe, die im Vergleich zum Prototypen keine zusätzlichen, ökologisch kritischen Substanzen enthalten, und der verringerten Anzahl der Komponenten von 83 auf 56 Teile erlauben den Rückschluss, dass die Entsorgung des Prototypen wesentlich vereinfacht wird und nahezu unproblematisch erfolgen kann. Weiterhin trägt die Wahl des recycelbaren Thermoplasten Polypropylen als favorisiertes Material sowohl der Komponentenauslegung von Gehäuse und Sauggeschirr dazu bei, dass die Recyclingprozesse erheblich vereinfacht werden. Die Recyclingquoten des Referenzgerätes und des Prototypen, die aus den Demontageanalysedaten von Display/ReGrEd ermittelt werden, liegen mit 97% bzw. 100% sehr eng beieinander, allerdings wird der Aufwand zur Entsorgung des Prototypen durch Umsetzung alternativer Verbindungstechnologien und innovativer Gehäusekonzepte [109] erheblich reduziert.

4.4.4 Innovative Gehäusekonzepte zur Strukturoptimierung

Die Betrachtung des Gehäuses als eigene Funktionseinheit des Staubsaugers hat die Entwicklung des Prototypen wesentlich beeinflusst. Zunächst hat das Gehäuse die Funktion, die Bestandteile des Gerätes in sich zu vereinen, diese, durch Hinzufügen zusätzlicher Innengehäuse, intern zu fixieren und dem Gerät dadurch eine gewisse Stabilität zu verleihen. Zu den in den Staubsauger zu integrierenden Komponenten gehören neben der Elektronik, die Motor-/Gebläseeinheit, die Kabelrolle sowie ein Bereich für die Staubabscheidung. Zusätzlich sind Räder am Gehäuse zu befestigen sowie eine Verbindung der Bedienelemente zur Elektronik herzustellen. Gegebenenfalls ist ein Bereich für Zubehör im Gehäuse vorzusehen, worauf im Projekt BEnefiT bewusst verzichtet wurde. Zwei weitere, zusätzliche Anforderungen bestehen an die Haptik sowie an die Geräteoptik, da bei Kleingeräten des Massenkonsums das Aussehen neben dem Nutzen eines der wesentlichen Kaufkriterien darstellt.

Designkriterien standen bei der Entwicklung des neuen Gerätekonzeptes zunächst im Hintergrund. Ziel war, die Anordnung der Komponenten derart zu gestalten, dass der in Anspruch genommene Bauraum kleinstmögliches Volumen aufweist. Dadurch entwi-

ckelte sich das Gehäuse entsprechend notwendiger Kriterien und bekommt ein nahezu kugelförmiges Aussehen.

Hinsichtlich der Materialwahl wurde auf Basis der in Kapitel 4.4.3 gewonnenen Ergebnisse der Ökobilanz Polypropylen als technologisch und ökologisch sinnvollstes Material ausgewählt. Statt wie im Referenzprodukt ein Innengehäuse zu gestalten, das zur Befestigung der Komponenten dient, wurde ein viel versprechender Ansatz der Firma DMT umgesetzt. Wie bereits erfolgreich in vielfältigen medizinischen, messtechnischen und kommunikationstechnischen Anwendungen gezeigt [99], verwendet DMT expandiertes Polypropylen (EPP) nach einem patentierten „Electronic Packaging and Assembly Concept“ (E-PAC), um Gerätekompnenten formschlüssig darin einzubetten. Dies hat den Vorteil, dass keine zusätzliche Fixierung der Komponenten notwendig ist und gleichzeitig eine gewisse Stosssicherheit gewährleistet wird. Darüber hinaus kann das EPP so gestaltet werden, dass die Strömungsführung zur Ableitung von Wärme in das Material integriert wird, so dass trotz der formschlüssigen Fixierung kein Wärmestau entsteht.

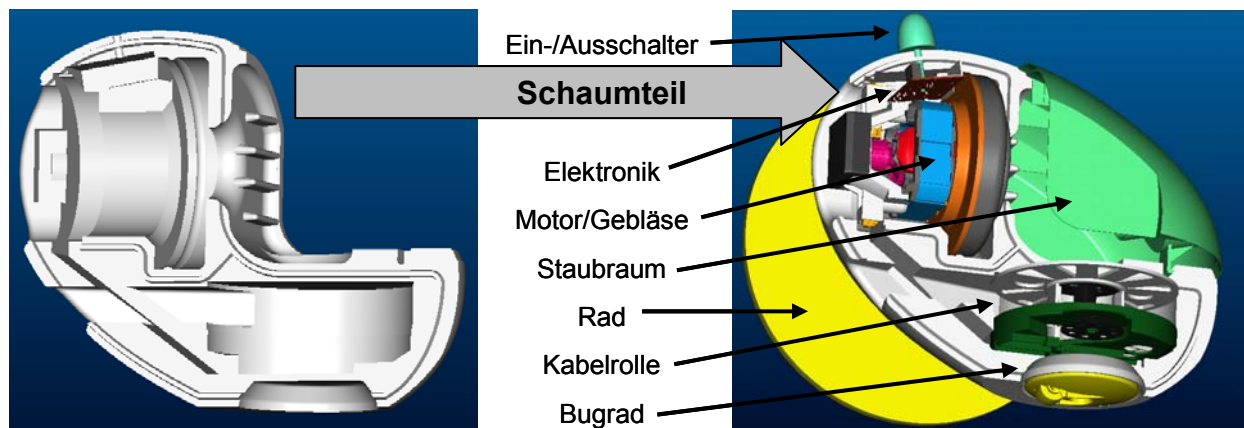


Bild 40: Integration der Komponenten in das Gehäuse aus expandiertem Polypropylen-schaum (EPP) beim Prototypen

Bild 40 stellt die Integration der Komponenten des Staubsaugers in expandiertem Polypropylenschaum dar. Dabei sind im linken Bild deutlich Rippen zur Strömungsführung am Auslass der Motor-/Gebläseeinheit (eingesetzt im rechten Bild) erkennbar. Nachdem EPP für Gebrauchstemperaturen bis zu 90 °C geeignet ist, lassen die entstehenden Temperaturen der Motor-/Gebläseeinheit mit max. 54 °C keine potenzielle thermische Überlastung erwarten.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung des expandierten Polypropylens zeigt sich in der Reduktion der Verbindungselemente. Dies wirkt sich in erheblichem Maße auf die Verringerung der Montage- und Demontagezeiten aus und trägt stark zur Kostenreduktion bei.

Innovativ ist der Ansatz, die Hauptverbindungsachse des Gerätes vertikal verlaufen zu lassen. Aufgrund dessen können zunächst das EPAC-Formteil in eine Gehäusehälfte eingelegt und daraufhin die Komponenten in den EPP-Schaum formschlüssig eingefügt werden. Das Verschließen der Gehäusehälften erfolgt somit lediglich über zwei Schrau-

ben, die in den Griff integriert sind. Dies vereinfacht ebenfalls die Gerätedemontage: Mit einem gezielten Schlag auf den Griff des Staubsaugers zerfällt das Gerät in zwei Hälften, die im einfachsten Sinne „ausgeschüttelt“ werden können, um die Fraktionen für eine materialspezifische Trennung vereinzelt vorliegen zu haben.

Insgesamt trägt das innovative Gehäusekonzept wesentlich zur ökologischen und ökonomischen Optimierung des Gesamtproduktes bei. Eine ausführlichere Darstellung zu dessen Entwicklung kann in [109] nachgelesen werden.

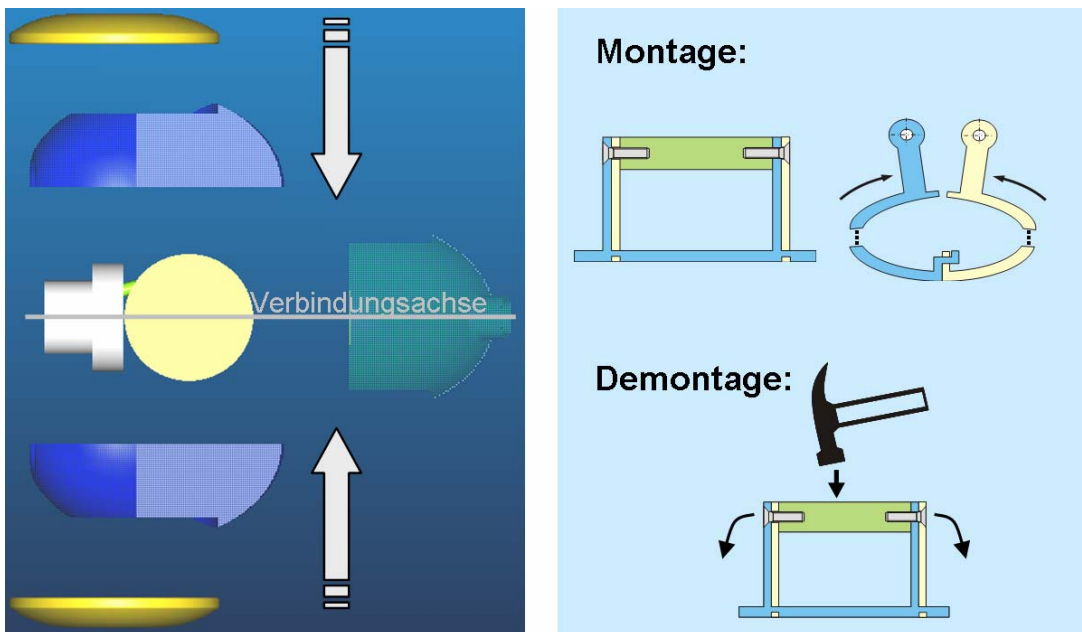


Bild 41: Darstellung der Mechanismen zur Montage und Demontage mit vertikaler Verbindungsachse

4.4.5 Zusammenfassende Bewertung der Umsetzung Integrierter Produktpolitik am klassischen Massengebrauchsgut Bodenstaubsauger

Die Umsetzung der Prinzipien der Integrierten Produktpolitik am klassischen Massengebrauchsgut Bodenstaubsauger im Rahmen des Verbundprojektes BEnefit hat weitreichende Optimierungspotenziale in ökologischer und ökonomischer Hinsicht aufgezeigt.

Die durchgeführten Untersuchungen im Bereich Energieversorgung, insbesondere die Gegenüberstellung mit autonomen Reinigungsrobotern, zeigen, dass die Verwendung alternativer Energiebereitstellungssysteme im Hinblick auf die zugrunde gelegten Anforderungen nicht zielführend ist. Die eingeschränkte Mobilität des Staubsaugers mit einem durchschnittlichen Aktionsradius von 6 Metern stellt im Vergleich zu den aufgezeigten, ganzheitlich bewerteten Alternativen eine minimale Einschränkung dar, die dem Kunden zugemutet werden kann. Kritikpunkte hinsichtlich der möglichen Verwendung PVC-haltiger Kunststoffe für Kabelummantelungen wird bereits seitens der Europäischen Union mittels eines PVC-Grünbuchs [60] Rechnung getragen. Dadurch stellt

sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht der Netzbetrieb nach wie vor das zu favorisierende Energiebereitstellungsmedium für Bodenstaubsauger dar.

Aktuelle Entwicklungstrends von Bodenstaubsaugern zeigen, dass die eingeschränkte Mobilität aufgrund des Kabels dadurch kompensiert wird, dass Staubsauger im hochpreisigen Segment über Kabellängen von bis zu 10 m verfügen. Dies stellt für den Kunden einerseits einen Vorteil hinsichtlich Mobilität dar. Andererseits bedingt es gleichzeitig ein gesteigertes Gerätegewicht, das die Handhabung der Geräte insbesondere auf Treppenstufen unkomfortabel werden lässt.

Weiterhin wird der Steigerung der Saugleistung handelsüblicher Geräte nicht durch Schwachstellenanalysen verwendeter Technologien entgegengewirkt, so wie es im Rahmen von BEnefiT erfolgt ist, sondern durch eine generelle Leistungssteigerung. Gängige Bodenstaubsauger verfügen heutzutage über durchschnittliche Anschlussleistungen von 1.800 W. Ausgehend von der Annahme, dass wie in Bild 39 dargestellt, rund 80% Verluste innerhalb des Gerätes (Bild 39) auftreten, führen somit zu einer effektiven Saugleistung von 360 W. Damit liegen diese Geräte immer noch hinter der in BEnefiT erzielten, effektiven Saugleistung von 450 W. Gleichzeitig ist die Anschlussleistung um den Faktor 1,4 höher als beim Prototypen von BEnefiT, so dass der Energieverbrauch während der Nutzungsphase ebenfalls 140% über der des Prototypen liegt und damit neben höheren Kosten ebenfalls ein höherer Umwelteintrag verursacht wird.

Das in BEnefiT umgesetzte Gehäusedesign und die daraus resultierenden Optimierungen in fertigungs- und entsorgungstechnischer Hinsicht stellen nach wie vor eine Innovation auf dem Markt aktueller Bodenstaubsauger dar, so dass deren ökologisches und ökonomisches Potenzial einzigartig ist. Heutige Trends des Gehäusedesigns tendieren zum Verzicht auf die Verwendung von Staubbeuteln. Der Einsatz eines alternativen Staubbehälters, der regelmäßig vom Nutzer geleert werden muss, reduziert zwar einerseits die Verwendung von Material und Energie zur Bereitstellung von Filtertüten, andererseits muss bei einer ganzheitlichen Betrachtung berücksichtigt werden, dass die Entleerung der Geräte sowohl Wasser als auch Reinigungsmittel erfordert. Da das Reinigungsverhalten wiederum sehr nutzerabhängig ist, kann kein direkter Vergleich der beiden Verfahren erfolgen. Unter Hinzunahme hygienischer Aspekte erscheint der Verzicht auf Staubbeutel jedoch fragwürdig, so dass bereits bei der Durchführung des Projektes BEnefiT die Verwendung von Staubbeuteln favorisiert wurde.

Bild 42 stellt zusammenfassend einige der im Rahmen von BEnefiT erzielten Optimierungspotenziale im Vergleich zum Referenzgerät dar. Wesentlich ist die Reduktion des Energieverbrauchs um 40% bezogen auf eine identische Saugleistung an der Düse wie die des Referenzgerätes, da sich dies – bezogen auf die lange Nutzungsdauer von durchschnittlich 8 Jahren – ökologisch und ökonomisch auswirkt. Die Gewichtseinsparung von 20% stellt in Bezug auf das Gerätehandling eine Verbesserung dar, die sich insbesondere bei der Reinigung von Treppenstufen oder Dingen, die sich oberhalb der Reichweite des Saugschlauchs befinden, durch die Einsparung von 1 kg Gewicht für den Nutzer vorteilhaft auswirkt.

Für den Hersteller wirkt sich die drastische Reduktion der Gehäusematerialien um 80% sowohl bei der Herstellung als auch bei der Entsorgung aus, wie aufgrund der Einsparung der Entsorgungskosten klar erkennbar ist. Nachdem die EU-Richtlinie WEEE die Herstellerverantwortung für die Entsorgung der Produkte fordert, sind ebenfalls das Interesse des Herstellers am Entsorgungsprozess gewährleistet und ein wesentlicher Schritt hinsichtlich ganzheitlicher Produkt- und Prozessanalyse umgesetzt.

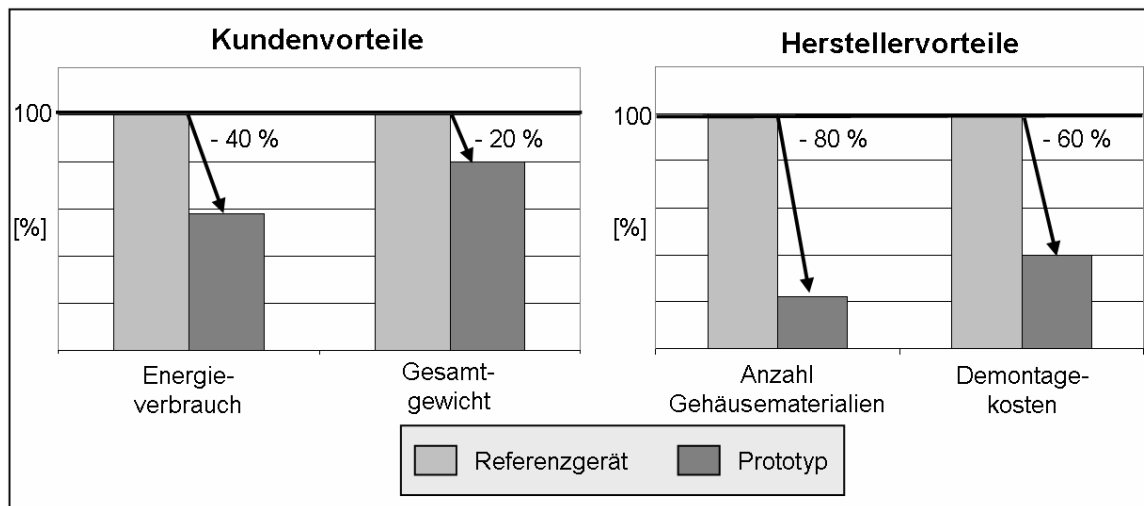


Bild 42: Gegenüberstellung von Kunden- und Herstellervorteilen erzielt durch die Geräteoptimierung mittels IPP

Die Erfüllung der durch die WEEE geforderten Quoten an Haushaltskleingeräte für Wiederverwendung und Recycling (50%) und Gesamt-Verwertung (70%) ist, wie Tabelle 5 zeigt, insbesondere durch den hohen Anteil an Kunststoffen nicht ohne weiteres erreichbar. Dabei spielen im Wesentlichen Kunststoffmischfraktionen, die nicht recyclebar sind, eine wesentliche Rolle. Im Bereich der Elektrokleingeräte nehmen Kunststoffe, wie in Bild 30 dargestellt, einen Anteil von ca. einem Drittel des Gesamtmaterials in Anspruch. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an deren Recyclingfähigkeit. Durch Wahl des recycelbaren Thermoplasten Polypropylen als Hauptmaterial und durch Modifikationen der Motor-/Gebläseeinheit konnte die Recyclingfähigkeit des Prototypen in BEnefiT auf 100% gesteigert werden. Gemeinsam mit der optimierten Demontagestrategie weist das Gerät ein extrem entsorgungsfreundliches Design auf.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die im Rahmen von BEnefiT durchgeführten Maßnahmen zur Umsetzung der Prinzipien der Integrierten Produktpolitik am klassischen Massengebrauchsgut Bodenstaubsauger innovative und langfristige Erfolge in der Entwicklung hervorgebracht haben. Dies lässt sich – entsprechend dem Ansatz von Bild 43 folgend – darauf zurück führen, dass nicht nur eine Optimierung einzelner Technologien oder ein Redesign durchgeführt wurde, sondern das Gerät als Gesamtsystem betrachtet und analysiert wurde. Der Aufwand zur Entwicklung eines prozess-innovativen Produktes ist zwar zunächst höher, als für Redesign und einzelne Technologieoptimierungen, zeichnet sich aber längerfristig betrachtet als die strategisch sinnvollste Methode

für nachhaltige Produktentwicklung aus und beinhaltet gleichzeitig ein hohes ökologisches und ökonomisches Potenzial.

Wesentlichen Einfluss auf den Erfolg hatte auch die enge und kontinuierliche Kommunikation der Projektpartner, die dazu geführt hat, dass die Entwicklung des Gerätes kein isoliertes Arbeiten einzelner Arbeitsgruppen war, sondern Synergien genutzt und Schnittstellen optimiert wurden. Weiterführend wäre die Kommunikation zum Kunden in Form von Werbung und Aufklärung auszubauen, so dass neben dem ansprechenden Design (Bild 44) auch das ökologische Potenzial des Gerätes den Kunden von dessen Potenzial und Qualität überzeugt und zum Kauf animiert.

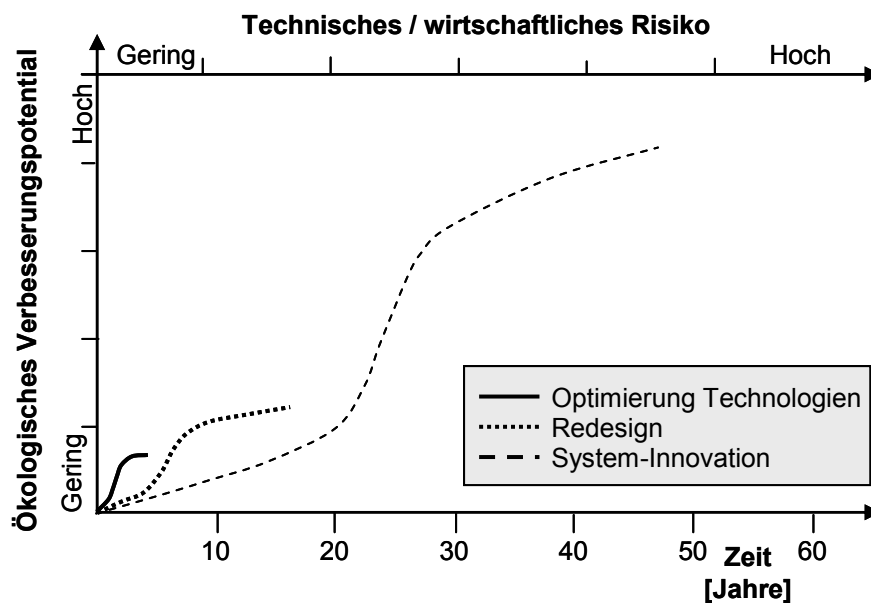


Bild 43: Entwicklung des ökologischen Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des technisch/wirtschaftlichen Risikos bei Umsetzung unterschiedlicher umweltgerechter Produktentwicklungsstrategien

Die im Rahmen von BEnefiT verfolgte Strategie zeigt, dass trotz der vermeintlichen, technologischen Reife eines bereits hundertjährigen Produktes nach wie vor ein wesentliches Potenzial existiert, um mit der Verfolgung eines ganzheitlichen Ansatzes im Sinne der Integrierten Produktpolitik dieses sowohl ökologisch als auch ökonomisch auszuschöpfen und umzusetzen.

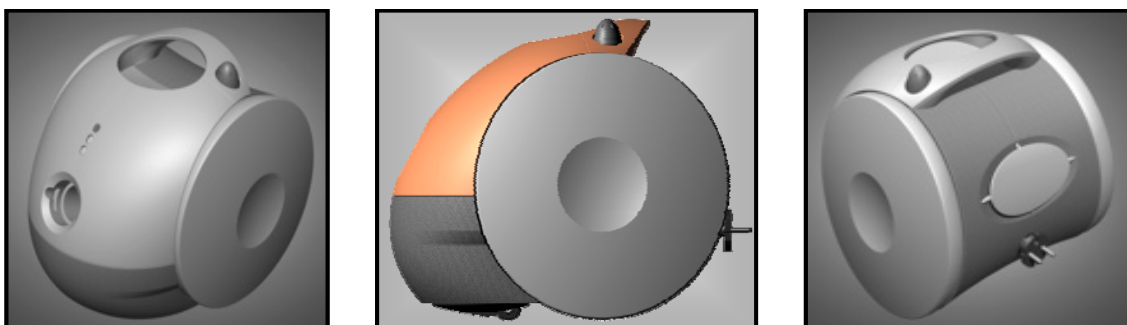


Bild 44: Umgesetztes Design des Prototypen im Projekt BEnefiT

5 Refurbishing als Strategie zur Optimierung von Investitionsgütern

Investitionsgüter sind Produkte, die vornehmlich im Business to Business Bereich (B2B), d.h. von Unternehmen zu Unternehmen, gehandelt und verkauft werden – genannt seien hier z. B. Werkzeugmaschinen, Energieanlagen, Roboter oder Medizingeräte. Verbunden mit der Fertigung dieser komplexen, investitionsintensiven Geräte ist ein hoher Einsatz an Ressourcen, sowohl hinsichtlich der Verwendung hochwertiger Materialien als auch natürlicher Ressourcen und elektrischer Energie. Der Erhalt dieser in die Herstellung der Anlagen investierten Grundgüter sollte dabei beständig sein, wobei eine konstante Qualität im Maschinenprozess gewährleistet sein muss.

Die Wiederaufarbeitung bzw. das Refurbishing stellt für diese Anlagen aufgrund der Modularität und des hohen Invests eine im Sinne der Integrierten Produktpolitik nachhaltige Methode dar, um sowohl ökologisch als auch ökonomisch den Wert der Komponenten lang anhaltend zu bewahren.

In diesem Kapitel wird anhand medizinischer Anlagen die Umsetzung der Integrierten Produktpolitik mittels Refurbishing dargestellt. Dabei sind insbesondere die für medizinische Anlagen aufgrund der Verwendung am Menschen existierenden sehr hohen Anforderungen zu beachten, die in den Gesamtprozess zu integrieren sind.

Bei den im Weiteren dargestellten Forschungsergebnissen handelt es sich um ein seitens des Bayerischen Ministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen gefördertes Projekt, welches in Zusammenarbeit mit Siemens Medical Solutions, T-Systems ITS GmbH und MIREC durchgeführt wurde.

5.1 Refurbishing und dessen Umsetzung

Refurbishing bzw. die praktische Umsetzung des Produktrecyclings stellt die Aufarbeitung kompletter Systeme sowie einzelner Komponenten dar. Die Anforderungen an das Refurbishing beginnen dabei mit der Kommunikation und Abwicklung aller notwendigen Aufgaben mit dem Kunden, beginnend bei einer Rücknahmeanfrage, über die eigentliche Instandsetzung bis hin zum erneuten Verkauf oder der stofflichen Verwertung. Das heißt, Refurbishing ist eine Strategie vom Kunden zum Kunden.

Insgesamt existieren die in Bild 45 dargestellten vier Kategorien des Refurbishing, deren Umsetzung individuell unter Berücksichtigung der jeweiligen ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkte von Anlage zu Anlage abgewogen und umgesetzt werden müssen [21].

Die Systemverwendung stellt die hochwertigste Strategie dar, da sie eine vollständige Überarbeitung einer kompletten Anlage beinhaltet. Das heißt, eine Anlage wird im Ganzen mit allen erforderlichen Maßnahmen aufgearbeitet und wieder in den Verkehr gebracht.

Ist der Wiedereinsatz der gesamten Anlage nicht zielführend, stellt die Komponentenverwendung den zweithöchsten erzielbaren Ertrag dar. Hier werden einzelne Komponenten, die in technisch einwandfreiem Zustand sind, zu einer neuen Gesamtanlage zusammengefügt. Zerlegt und der Verwertung überführt werden lediglich die Bestandteile, die nicht weiter verkauft werden können. Als dritte Strategie existiert die Ersatzteilerzeugung. Funktionsfähige Komponenten und Teile, die als Austauschteile in anderen, aktuellen Anlagen Verwendung finden können, werden der Anlage entnommen. Die übrigen Bestandteile der zurückgenommenen Anlage werden als Zerlegeanteil wiederum der Verwertung zugeführt. Die Bereitstellung gebrauchter Ersatzteile schafft Potenziale bei unzureichend kalkulierter Ersatzteillieferpflicht des Herstellers, die aufgrund des hohen Anteils an Zukaufteilen und dem dadurch entstehenden Lieferrisiko entstehen können. Die ökologisch und ökonomisch in höchstem Maße aufwendige Bereitstellung von Ersatzteilen in Einzelanfertigung kann somit reduziert werden. Schließlich sind die Verwertung und das Recycling einer Anlage die Methode, die verbleibt, wenn sich eine Anlage nicht mehr für die Wiederaufarbeitung oder Ersatzteilerzeugung eignet.

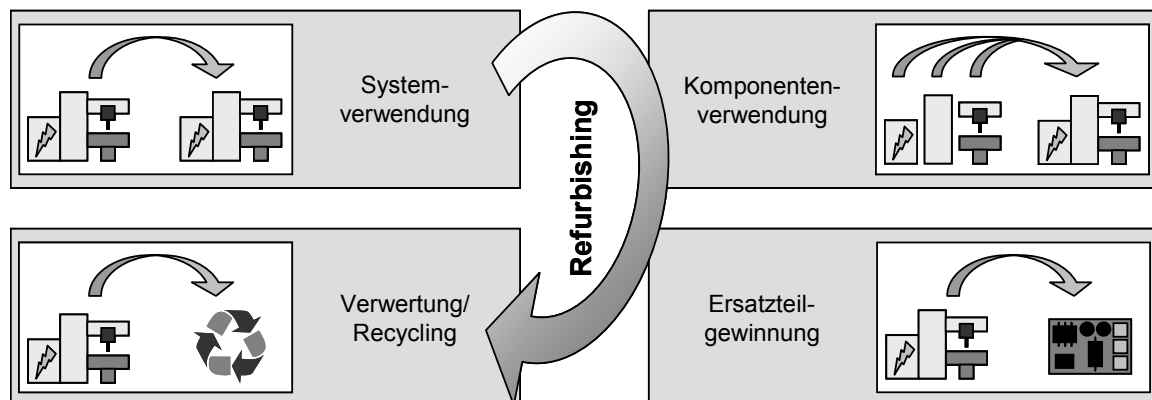


Bild 45: Strategien des Refurbishings

Das ökonomische Potenzial, das die Wiederaufarbeitung bietet, wurde bereits in diversen Fertigungsbereichen festgestellt und erfolgreich umgesetzt: Motiviert durch die steigenden Stahlpreise führt die Firma EMAG das so genannte „Retrofit“ von Werkzeugmaschinen bereits seit 2002 erfolgreich durch. Aufgrund der hohen Nachfrage nach aufgearbeiteten Anlagen, die rund 30% günstiger angeboten werden können als Neugeräte, konnte eine Abteilung mit 40 Mitarbeitern im Jahr 2003 bereits einen Umsatz von 14,5 Millionen Euro erwirtschaften, wobei insgesamt 27 Maschinen und 193 Baugruppen aufgearbeitet wurden [32]. Weltweit beschäftigt sich die Firma ABB mit der Aufarbeitung einer breit gefächerten Palette an Investitionsgütern aus dem Energie- und Automatisierungsbereich wie Schaltanlagen, Transformatoren, Wasserstrahlschneidanlagen etc. [85]. Die Wilo AG hat im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit der Universität Dortmund die Wiederaufarbeitung von Pumpen analysiert [43]. Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten waren einerseits die Produktgestaltung und Konstruktion, darüber hinaus die Organisation und Information zur Verbesserung der Kunden/Herstellerbeziehung und schließlich die Optimierung der internen und externen Lo-

gistik, um den Rückfluss aufzuarbeitender Pumpen, die sowohl in privaten Haushalten als auch im industriellen Bereich eingesetzt werden, zu verbessern.

Die Umsetzung des Refurbishing als Methode der Integrierten Produktpolitik bei medizinischen Anlagen wird im Folgenden dargestellt. Dabei stellen Medizingeräte im Vergleich zu oben genannten Produkten besondere Anforderungen an die Wiederaufarbeitung, da sie aufgrund der Verwendung am Menschen besonderen Sicherheits- und Qualitätsanforderungen genügen müssen.

5.2 Beschreibung des mechatronischen Systems „Medizingerät“

Bei den betrachteten Medizingeräten handelt sich um Anlagen der Röntgendiagnostik, die von einfachen Aufnahmeplätzen bis hin zu komplexen Angiographiesystemen analysiert wurden. Diese bieten die Möglichkeit, Blut- oder Lymphgefäße mit Kontrastmittel unter Verwendung von Röntgenstrahlen sichtbar zu machen.

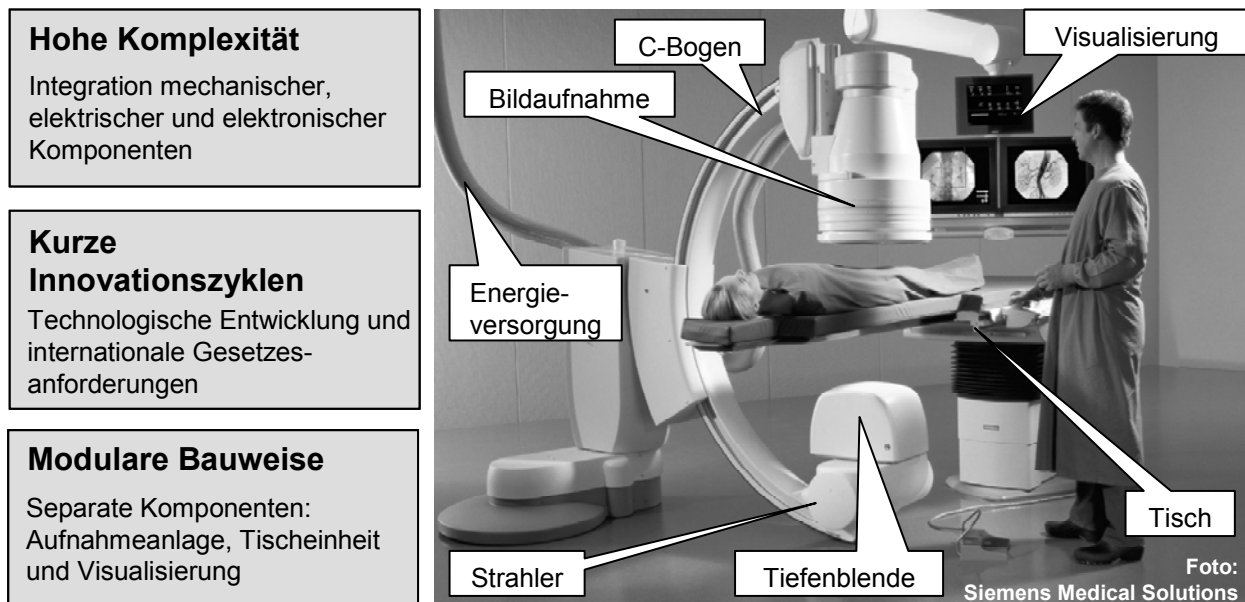


Bild 46: Charakteristika und Komponenten medizinischer Röntgenanlagen am Beispiel eines Angiographiesystems

Diese Anlagen zeichnen sich, wie in Bild 46 dargestellt, durch eine hohe Komplexität aus. Die über einen meist extern angebrachten Generator bereitgestellte Hochspannung wird im Strahler zur Erzeugung der Röntgenstrahlung benötigt, geht allerdings zu rund 98% als Verlustleistung in Wärme über [109]. Bleilamellen formen die Strahlung in der Tiefenblende, die durch das zu untersuchende Körperteil dringt und im Bildaufnahmesystem auf eine röntgensensitive Folie trifft. Die dort generierten Impulse werden an eine Visualisierungseinheit übertragen und dem behandelnden Arzt zur Verfügung gestellt.

Die Kosten für eine Neuanlage belaufen sich je nach Gerätetyp auf etwa € 25.000,- bis € 500.000,-. Ein Großteil der in den bis zu 3,5 t schweren Anlagen befindlichen Komponenten beläuft sich auf hochwertige Elektro- und Elektronikteile modernsten Standards.

Aufgrund der hohen Komplexität der Anlagen, von denen weltweit jährlich einige tausend Stück vertrieben werden, und deren modularen Aufbaus eignen sie sich in hervorragender Weise für das Refurbishing. Die ständige technologische Weiterentwicklung im medizinischen Bereich und die strikten internationalen Anforderungen an einen wachsenden Patientenschutz führen zu einer kontinuierlichen Optimierung der Systeme, so dass innerhalb weniger Jahre neue Standards entstehen und Anlagen trotz voller Funktionsfähigkeit nicht mehr neuesten Kriterien genügen.

Sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene gilt für medizinische Produkte eine Vielzahl an Gesetzen, Richtlinien und Normen zum Schutz von Patienten und Anwendern sowie zur Sicherstellung der vom Hersteller spezifizierten Leistung seiner Produkte [72]. Die Erfassung aller Regelungen ist äußerst umfangreich und komplex. Maßgeblich ist jedoch vor allem das Medizinproduktegesetz (MPG) [146], welches in seiner geänderten Fassung seit dem 01.01.2002 Gültigkeit hat. Darüber hinaus verfügt der Medizingerätehersteller über interne Regelwerke, welche die geltenden gesetzlichen Regelungen spezifisch für jeden Unternehmensbereich auf dessen Produkte und Dienstleistungen umsetzen. Diese internen Regelungen werden aktualisiert, sobald sich an Gesetzen, Richtlinien oder Normen Änderungen ergeben oder interne Veränderungen dies erfordern. Dadurch ist gewährleistet, dass stets geltendes Recht in allen Prozessen umgesetzt wird und so die hohen Anforderungen an medizinische Produkte erfüllt werden.

5.3 Prozessanalyse des Refurbishing von Medizinanlagen

Ziel des Refurbishing medizinischer Anlagen ist es, Umweltbelastungen durch die Verlängerung des Nutzungszeitraumes zu minimieren. Dabei ist es wesentlich, die von dem Gerät bereitgestellte Dienstleistungseinheit als Grundlage der Betrachtung heranzuziehen.

5.3.1 Darstellung des Umweltpotenzials

Wie in Bild 47 erkennbar ist, erfordert die Fertigung der komplexen Geräte den größten energetischen Aufwand. Werden einer ersten Produktnutzungsphase rund 40.000 Aufnahmen zugrunde gelegt, deren Energiebedarf vergleichsweise gering ist, führt dies zu einer relativ schlechten Energiebilanz pro Dienstleistungseinheit, d. h. pro durchgeführter Aufnahme. Aufgrund der Wiederaufarbeitung der Anlage verlängert sich der Lebenszyklus. Der für das Refurbishing zusätzlich aufzubringende Energieaufwand ist in Abhängigkeit von den durchzuführenden Maßnahmen und dem Umfang einzusetzender Austauschteile zu berücksichtigen. Im Vergleich zur Steigerung der Aufnahmezahl, die in Bild 47 mit 50% des ersten Lebenszyklus abgeschätzt wurde, reduziert sich dadurch

die Umweltwirkung je durchgeführter Dienstleistungseinheit. Der Aufwand für die Verwertung der Anlage ist, ebenso wie der Fertigungsprozess, identisch und wirkt sich somit qualitativ auf die Aussage der Bilanz nicht aus.

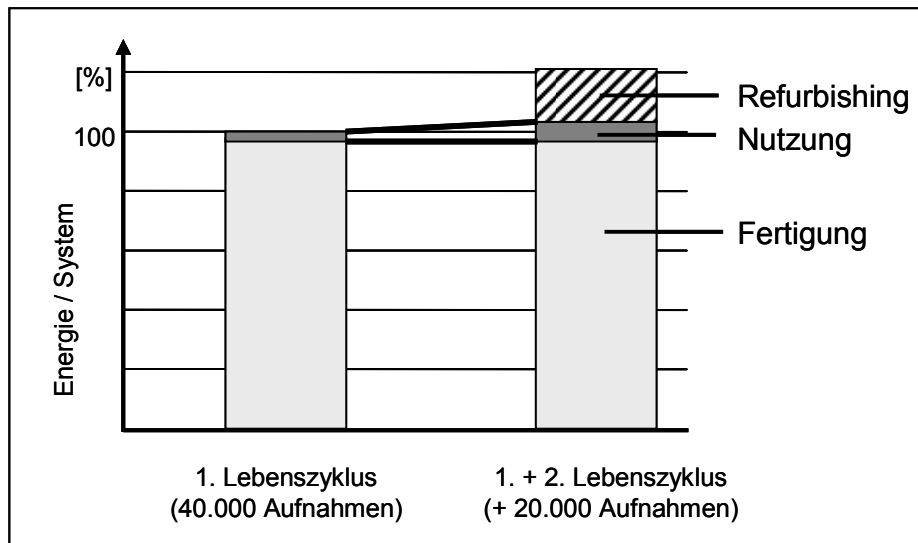


Bild 47: Qualitative Darstellung des energetischen Aufwands für die Fertigung, Nutzung und das Refurbishing einer Röntgenanlage

Eine mathematische Darstellung der Umweltwirkung pro Diagnose (U/d) wird in [109] durch (Gl. 2) beschrieben.

$$\frac{U}{d} = q \cdot \left(\frac{U_{\text{Prod.}}}{n_{\text{ges.}}} + u + \frac{U_{\text{Ents.}}}{n_{\text{ges.}}} \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

Wesentlich dabei ist die Berücksichtigung der Diagnosequalität (q), die aussagt, dass eine Diagnose ggf. mehrere Aufnahmen erforderlich macht. Einfluss auf die Umweltwirkung nehmen neben der Diagnosequalität die Umweltwirkungen der Fertigungs- und Entsorgungsphase ($U_{\text{Prod.}}$ bzw. $U_{\text{Ents.}}$), die über den gesamten Produktlebenszyklus ($n_{\text{ges.}}$) gemittelt werden müssen, sowie der Umwelteinfluss pro Aufnahme (u).

5.3.2 Gesetzliche Anforderungen an Gebrauchtanlagen

Der Handel mit gebrauchten medizinischen Anlagen unterliegt speziellen Voraussetzungen und Bedingungen, die insbesondere rechtliche und sicherheitsrelevante Aspekte betreffen. Eine Gebrauchtware (G-Ware) ist definiert als ein Produkt (System, Subsystem oder Komponente), das bereits im Verkehr stand und erneut in Verkehr gebracht werden soll. Inverkehrbringen bedeutet nach [146] § 3 Abs. 11 die entgeltliche oder unentgeltliche Weitergabe eines Produktes an einen Dritten, das heißt, es findet ein Besitzerwechsel statt.

Der Kunde ist bei Kauf einer aufgearbeiteten Anlage in jedem Fall darauf hinzuweisen, dass er eine G-Ware erwirbt. Durch die Lieferung der G-Ware darf die Ersatzteillieferpflicht für das Produkt insgesamt jedoch nicht verlängert werden. Die Gewährleistungs-

zeit des Systems muss vertraglich mit dem Kunden festgelegt werden, wobei die gesetzlich vorgeschriebene Garantiefrist von mindestens 6 Monaten zu gewährleisten ist.

Ein wesentlicher Faktor im Bereich des Refurbishing ist die Begriffsbestimmung zwischen „neuen“, „neuwertigen“ und „gebrauchten“ Teilen und Geräten und die damit verbundenen Aktivitäten bezüglich Produkthaftung, Kennzeichnung und Gewährleistungspflicht. Aus diesem Grund hat das Deutsche Institut für Normung einen Entwurf für die DIN 48480 „Elektrotechnik; Gebrauchstauglichkeit und Qualität bei erneuter Verwendung von Teilen und Geräten, Anforderungen und Prüfungen“ erstellt, um die Anforderungen an gebrauchte und wiederverwendete Teile und Geräte zu definieren [124]. Darin heißt es:

„Ein neues Ersatzteil wird zum ersten Mal in Verkehr gebracht. Es erfüllt vorgegebene Herstellerspezifikationen. Ein neuwertiges Ersatzteil erfüllt vorgegebene Herstellerspezifikationen von neuen Teilen. Es wurde mindestens einmal in Verkehr gebracht bzw. enthält Teile, die mindestens einmal in Verkehr gebracht wurden. Die spezifischen Eigenschaften bleiben für mindestens die übliche Nutzungsdauer eines neuen Teils erhalten.“

Die Gewährleistungsansprüche sind bei neuwertigen Teilen die gleichen wie bei Ersatzteilen. Fehler, die für die Verwendung belanglos sind und die Funktion nicht einschränken, wie z. B. Verfärbungen, sind zulässig und eindeutig zu dokumentieren. Darüber hinaus dürfen neuwertige Teile ebenfalls mit neuen Teilen vermischt und eingebaut werden, solange sie als solche deklariert werden.

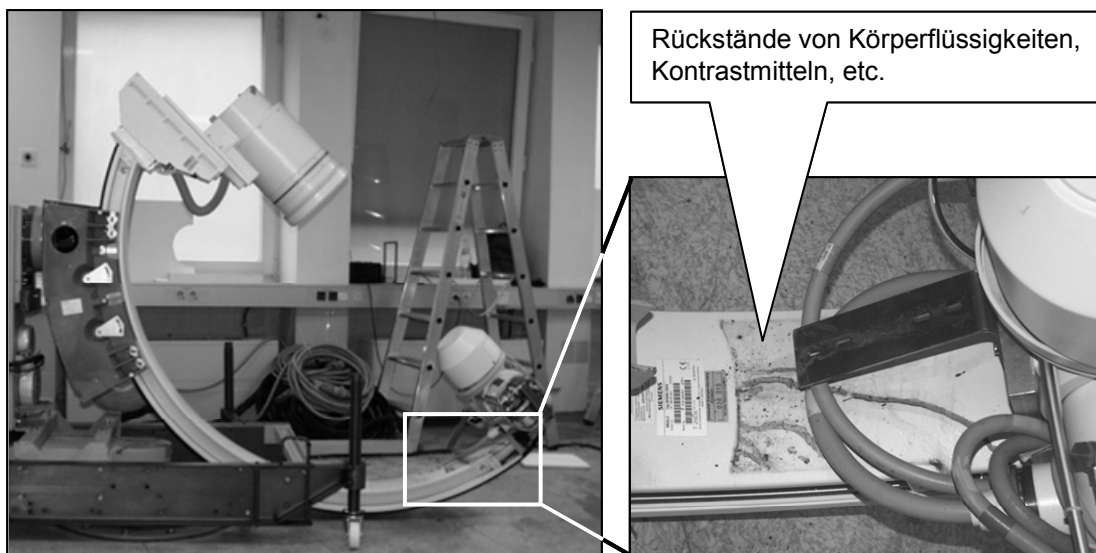


Bild 48: Hygienische Anforderungen an das Refurbishing medizinischer Anlagen

Insbesondere hinsichtlich hygienischer Anforderungen werden hohe Ansprüche an medizinische Systeme gelegt. Wie in Bild 48 dargestellt, sind Rückstände von Körperflüssigkeiten, Exkrementen, Kontrastmitteln etc. bei medizinischen Anlagen unvermeidbar. Die Entfernung dieser Verschmutzungen ist unerlässlich, um die Anlagen als Gebrauchtware in den Markt zu bringen. Gesetzlich geregelt wird dies seitens der Biostoff-

sowie der Gefahrstoffverordnung [150], [154] welche sowohl dem Patienten- als auch den Arbeiterschutz dienen.

Beim internationalen Handel von Gebrauchsgütern ist weiterhin sicherzustellen, dass die gesetzlichen Anforderungen des Empfängerlandes erfüllt werden. Sofern keine wesentlichen Änderungen an der Anlage vorgenommen wurden, gelten die Anforderungen zum Zeitpunkt des ersten Inverkehrbringens des Systems.

Eine vorschriftsmäßige Vermarktung wird über die CE-Kennzeichnung der Medizingeräte gewährleistet, welche im Medizinproduktegesetz festgeschrieben ist. Eine erneute Anlagenbewertung entfällt, sofern keine wesentlichen Änderungen an der Altanlage vorgenommen werden. Alle über die Instandsetzung hinausgehenden Funktionserweiterungen sind einer neuen Konformitätsbewertung zu unterziehen, um das CE-Zertifikat aufrecht zu erhalten.

5.3.3 Abwicklung der Ersatzteilversorgung

Die Versorgung mit Ersatzteilen nimmt bei so komplexen Anlagen wie Medizingeräten einen hohen Stellenwert ein. Zur Gewährleistung einer durchgängigen Funktionsfähigkeit der Anlagen bilden die Teilbereiche Wartung, Inspektion und Instandsetzung die Hauptaufgaben des technischen Kundendienstes.

Der qualitative Verlauf der Produktlebensphasen wird in Abhängigkeit von der Zeit und den verkauften Stückzahlen in Bild 49 dargestellt. Dabei ist die Ausprägung der Produktlebensphasen sehr heterogen und hängt von zahlreichen Faktoren wie der Innovationsgeschwindigkeit oder des Anwendungsfeldes ab.

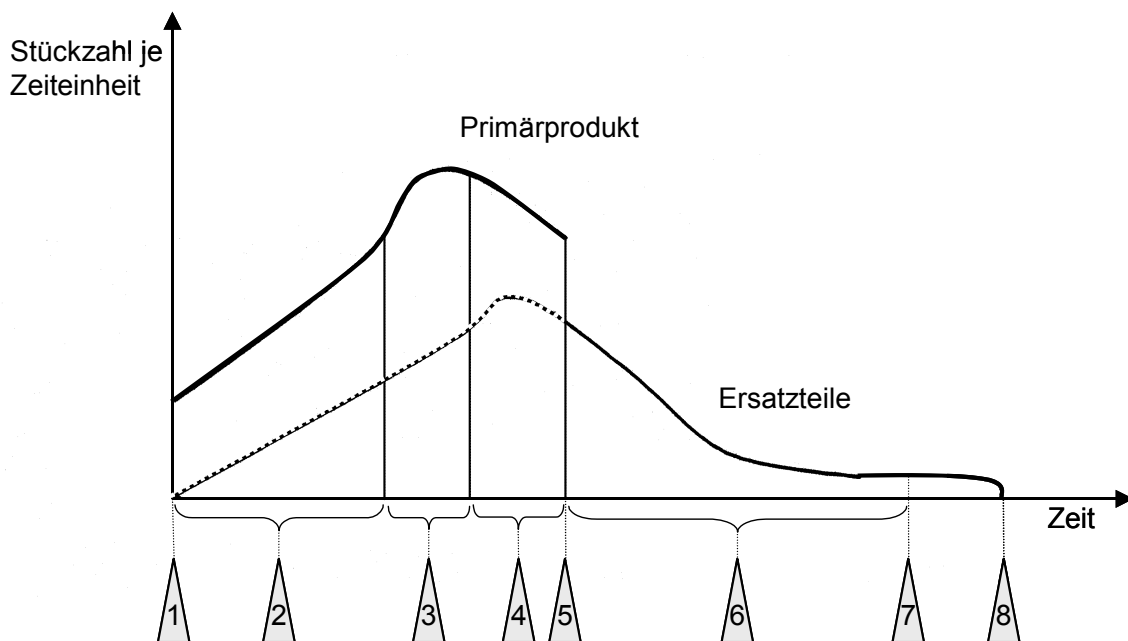


Bild 49: Lebenszyklus eines Primärproduktes unter Berücksichtigung des Ersatzteilbedarfs (nach [8])

Die in Bild 49 dargestellten Phasen 1 bis 5 beschreiben die Entwicklung des Produktlebenszyklus eines Primärproduktes.

Nach der Produkteinführung (1) folgt die Wachstumsphase (2), in der sich das Produkt auf dem Markt etabliert. Nach der Reifephase (3) folgen der Produktniedergang (4) und letztendlich die Produktabkündigung (5). Während dieser fünf Phasen, welche die aktive Phase der Produktherstellung widerspiegeln, sind Ersatzteile leicht beschaffbar, da bei einer Neubestellung automatisch die Fertigung von Zusatzteilen für das Ersatzteillager berücksichtigt wird.

Nach der Abkündigung (5) geht das Produkt in die passive Phase über, d. h. es werden keine Neuprodukte mehr gefertigt. Dieser Zeitpunkt ist ausschlaggebend für das Ende der Ersatzteillieferpflicht. Zur Bereitstellung von Ersatzteilen (6) kann eine Endeindeckung erfolgen, die jedoch neben Fertigungskosten hohe Lagerkosten nach sich zieht. Alternativ können über den Rückkauf von Altkomponenten Ersatzteile bereitgestellt werden. Bevor die Ersatzteillieferpflicht endet, wird geprüft, ob zu diesem Zeitpunkt eine Reparatur der Ersatzteile wirtschaftlicher als eine Neubeschaffung ist (7). Sollte der Bestand an Lagerteilen ausreichend sein, wird dazu übergegangen, den Bestand an Ersatzteilen sukzessive abzubauen. Mit dem End-of-Support (8) endet die Ersatzteillieferpflicht des Herstellers gegenüber dem Kunden. Ab diesem Zeitpunkt werden ebenfalls bevorratete Ersatzteile endgültig verworfen.

Im Bereich Medizintechnik ist die Phase des Ersatzteilbedarfs mindestens doppelt so lang ist, wie die Herstellungsphase der Primärprodukte. Die durchschnittliche Dauer der Herstellungsphase beträgt drei bis fünf Jahre, die Ersatzteillieferpflicht dagegen zehn Jahre nach Produktabkündigung, so dass dem Ersatzteilmarkt eine hohe logistische Bedeutung zukommt [8].

Ein wesentlicher Aspekt des Refurbishing ist die Ersatzteilversorgung mit Gebrauchtteilen. Nachdem die in medizinischen Diagnosesystemen enthaltenen Bauteile am Ende ihrer primären Gebrauchsphase in der Regel voll funktionsfähig sind, kann die Verwendung von Komponenten als Ersatzteil in einer sekundären Gebrauchsphase eine ökonomische wie ökologische Wertschöpfung darstellen, da die Werte der entnommenen Ersatzteile mitunter weit über den Entsorgungskosten der Gesamtanlage liegen.

Gebrauchte Teile und Komponenten werden in erster Linie für die Aufarbeitung und Instandsetzung von Altanlagen verwendet. Nach Rücknahme einer Altanlage, dem Ausbau der benötigten Teile und Komponenten, der Feststellung deren Qualität und ggf. einer Aufarbeitung dienen die Teile zur Instandsetzung einer weiteren Altanlage oder zum Aufbau einer Anlage aus Komponenten, wie anhand der Strategien in Bild 45 dargestellt wurde. Dieses Vorgehen ist wirtschaftlich sinnvoller als die Beschaffung der benötigten Komponenten, da die Kosten für Ausbau, Transport, Instandsetzung, etc. in der Regel niedriger sind als die Kosten einer Neubeschaffung. Ausgenommen sind jedoch Verschleißteile, die auch bei einer Anlageninstandsetzung in jedem Fall durch neuwertige oder neue Teile ersetzt werden müssen.

Die Organisation des Ersatzteilwesens erfordert neben der Sortimentsplanung die Lagerplanung und die Ersatzteilbeschaffung (Bild 50). Kann die Bereitstellung eines Ersatzteils nicht über das Lager erfolgen, bieten so genannte „Fahndungslisten“ die Möglichkeit, bei Abbau einer Anlage auf die Notwendigkeit der Beschaffung einer Komponente aufmerksam zu machen. Weiteres Potenzial der Wiederaufarbeitung bieten solche Komponenten, die nicht als Ersatzteil in Erwägung gezogen wurden, allerdings dennoch als solches benötigt werden und über Bedarfslisten als Austauschteil gesucht werden, wie z. B. Verkleidungsteile. Deren Aufarbeitung ist nach einer Dekontamination einfach und kostengünstig durchführbar, so dass der Aufwand gegenüber einer Neuproduktion gering ist.

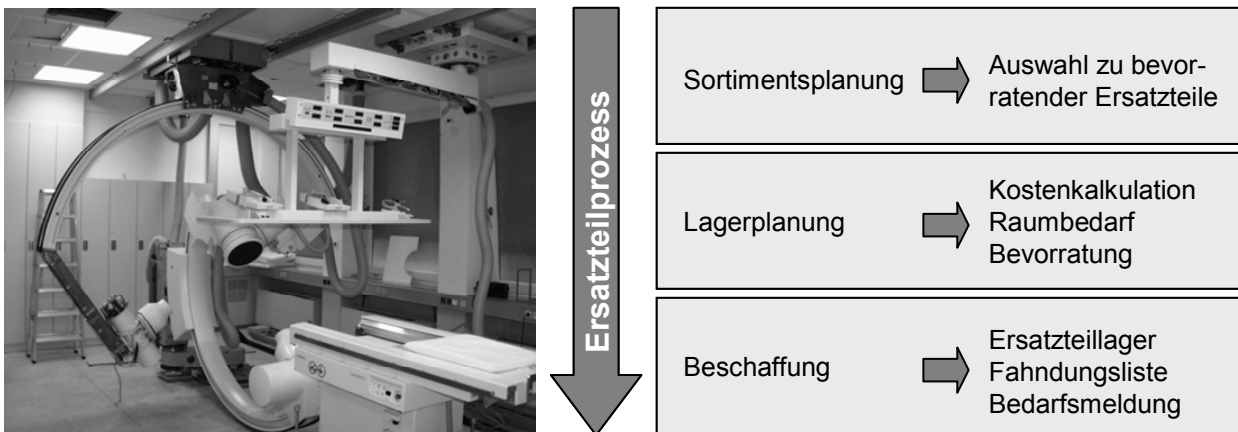


Bild 50: Aufgabenbereiche des Ersatzteilwesens

Der Abbau der Anlage beim Kunden erfordert erfahrenes und speziell geschultes Personal, um die demontagerelevante Zerlegereihenfolge einzuhalten und notwendige Sicherheitsvorkehrungen zu beachten.

Die Entscheidung darüber, ob eine Gesamtanlage aufgearbeitet wird bzw. welche Teile ausgebaut werden, fällt während der Befundung, da nach umfangreichen Funktionstests der Anlage, zusammen mit einer Sicht- und Funktionsprüfung aller Komponenten, diese Aufschluss über den Zustand und die Vollständigkeit der Anlage geben muss. Die benötigten Teile werden dann während der Zerlegung der Anlage ausgebaut und einer Reinigung unterzogen, bevor sie für die Weiterverwendung eingelagert werden. Daran anschließend werden die weiter zu verwendenden Komponenten erfasst und dokumentiert. Bei gebrauchten Ersatzteilen kommen die gleichen Maßnahmen zur Qualitätserhaltung zur Anwendung wie bei neuen Teilen. Ergänzt werden müssen diese allerdings durch zusätzliche Prüfungen, Tests, Befundungen o. ä., um den Zustand der Teile nach deren Ausbau aus der Anlage sicherzustellen. Abhängig von der Funktion der Komponenten sind unterschiedliche Kontrollmechanismen erforderlich. Sicherheits- und funktionsrelevante Komponenten, so genannte primäre Funktionsträger, müssen eingehend auf Funktion überprüft werden. Dies kann zumeist nur innerhalb einer bestehenden Anlage bzw. mit spezifischen Prüfeinrichtungen erfolgen. Dementsprechend hoch ist der Aufwand zu bewerten, da insbesondere bei älteren Komponenten die notwendigen Prüfvorrichtungen ggf. nicht mehr vorhanden sind, so dass hier auf alternative Metho-

den zurückgegriffen werden muss. Sekundäre Funktionsträger, wie Motoren, können anlagenunabhängig auf Funktion geprüft werden, so dass relativ einfach Aufschluss über deren Funktionsfähigkeit erlangt werden kann. Bei tertiären Funktionsträgern, wie nicht sicherheitsrelevanten Verkleidungs- oder Designelementen, ist zumeist eine Sichtprüfung ausreichend, um deren Weiterverwendbarkeit zu beurteilen.

5.4 Entwicklung eines rechnergestützten Planungssystems zur effektiven Prozessgestaltung

Der Prozess des Refurbishing verläuft, wie bereits in Kapitel 5.1 angesprochen, vom Kunden über den Hersteller zurück zum Kunden. Dadurch ist eine Vielzahl an Akteuren am Prozess beteiligt, so dass eine intensive Kommunikation untereinander erforderlich ist, um das Refurbishing effektiv zu gestalten. Das Umfeld, bzw. der prinzipielle Ablauf eines Wiederaufarbeitungsprozesses, ist in Bild 51 dargestellt.

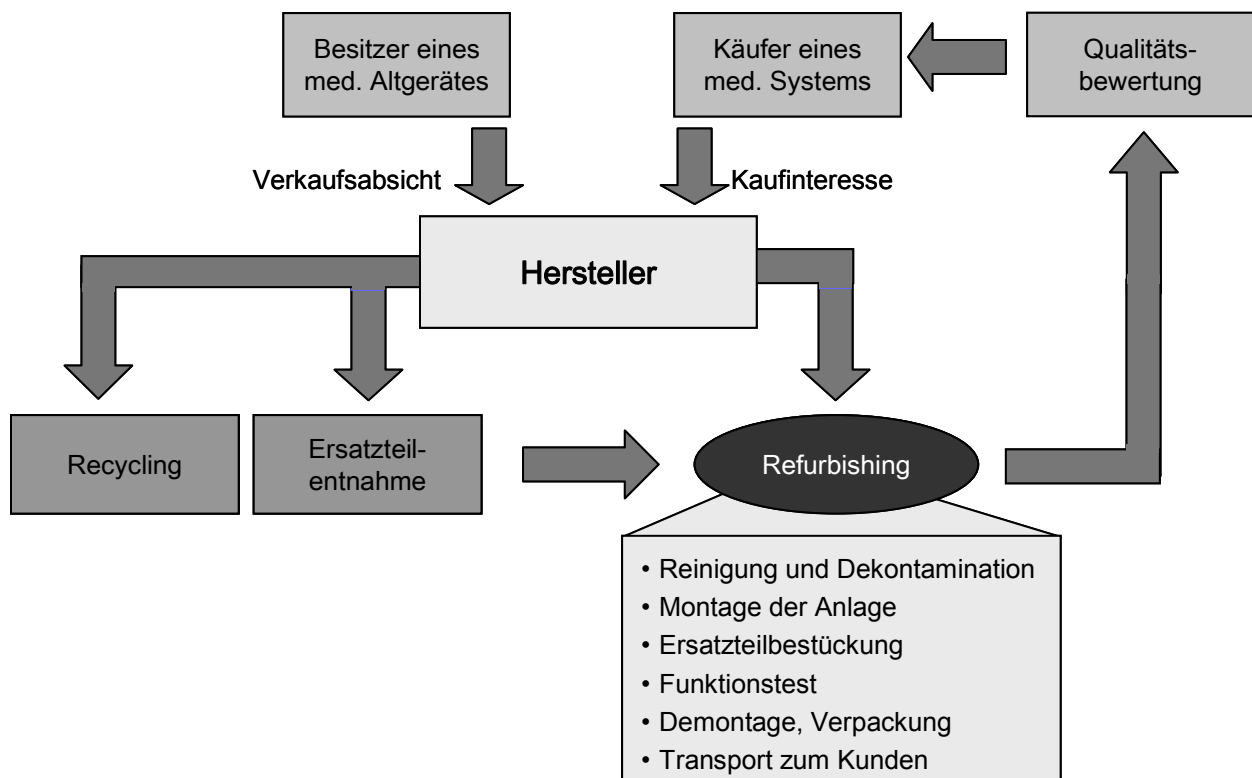


Bild 51: Refurbishing als Prozess vom Kunden zum Kunden

Zur Feststellung aller Aktivitäten entlang dieses komplexen Gesamtprozesses ist daher zunächst eine intensive Prozessanalyse durchzuführen. Diese muss Rückschlüsse über den Informations- und Aktionsfluss liefern, sowie die beteiligten Akteure darstellen. Nachdem die umzusetzenden Prozesse, wie Bild 52 zeigt, sowohl technologische als auch administrative Bereiche umfassen, bestehen unterschiedliche Anforderungen an das damit verbundene Ablaufcontrolling.

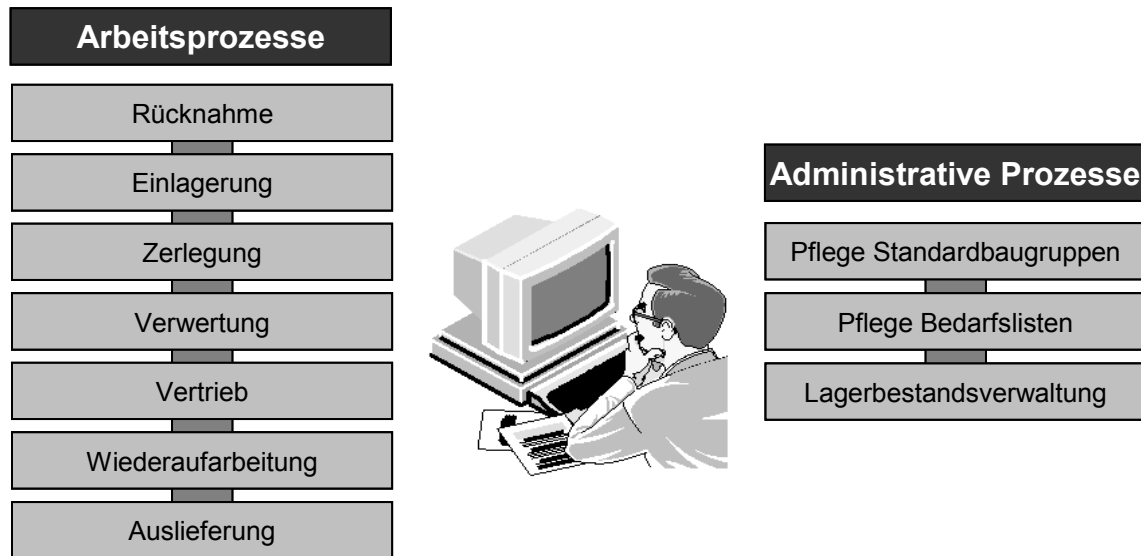


Bild 52: Arbeits- und administrative Prozesse des Refurbishing als Grundlage einer Softwarestruktur

Die Analyse des im Rahmen des Projektes zur Wiederaufarbeitung von Medizingeräten durchzuführenden Gesamtprozesses weist nahezu 130 separate Einzelschritte zwischen unterschiedlichen Akteuren auf, die bisweilen sehr komplex miteinander verknüpft sind.

Vor Durchführung des Projektes basierte das Ablaufcontrolling des Refurbishing primär auf auszufüllenden Formularen, mitlaufenden Dokumenten etc. Dies führte dazu, dass Informationen bisweilen mehrfach zu erfassen waren und einzelne Vorgänge einen verhältnismäßig hohen dokumentarischen Aufwand erforderten.

Zur Vereinfachung des Controllings wurde im Rahmen des Projektes ein webbasiertes Softwaretool entwickelt. Dieses ermöglicht den Zugriff des Dienstleisters, der den Rückbau und die Reinigung der Anlagen durchführt, des Herstellers und des Verwerters. Dabei ist zu berücksichtigen, dass je nach Akteur und dessen Aufgabenbereich unterschiedliche Zugriffsberechtigungen zu vergeben sind.

Als Grundlage des Tools wird eine Datenbank implementiert, welche die wesentlichen komponentenbezogenen bzw. für den Rückbau notwendigen anlagenbezogenen Daten enthält. Bild 53 zeigt den Aufbau einer Datenbankstruktur, die einerseits den externen Zugriff für Vertrieb, Lager, Aufarbeitung etc. zulässt und darüber hinaus über eine Schnittstelle zur Hersteller-Intranetplattform verfügt, die eine herstellerinterne Datenabwicklung ermöglicht. Eine direkte Kommunikation des Herstellers mit dem Verwerter gewährleistet die qualifizierte Entnahme, Transport und Lagerung der Ersatzteile und gewährleistet die Beibehaltung umfangreicher Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Die Füllung der Datenbank erfolgt auftragsabhängig, beginnend mit der Rücknahmeanfrage, so dass sich die Inhalte anlagenspezifisch aufbauen und eine Urbefüllung vor Einsatz der Software nicht notwendig ist. Die Kopplung der Software mit bereits beim Hersteller vorhandenen Datenverwaltungssystemen wie SAP ermöglicht den Zugriff auf

Anlagendaten, die bereits vom Hersteller erfasst wurden, so dass Anfragen zur Bedarfsermittlung, Lagerhaltung und Teileidentifikation wesentlich vereinfacht werden.

Nachdem durch die Software eine Vielzahl am Refurbishing beteiligter Akteure bedient werden müssen, zeichnen sich neben der Datenbank als zentrales Element weitere Anforderungen an das Tool ab: Aufgabenlisten, Terminsteuerung und Benachrichtigungswesen sind zu implementieren, um Erinnerungen, Aufforderungen etc. festlegen zu können. Ein Datenmanagementsystem ermöglicht die Verwaltung und Archivierung der notwendigen Anlagendaten, ein virtuelles Gesamtlager befähigt zur Verwaltung der Lagerbestände der beteiligten Firmen, die sowohl intern als auch extern fungieren.

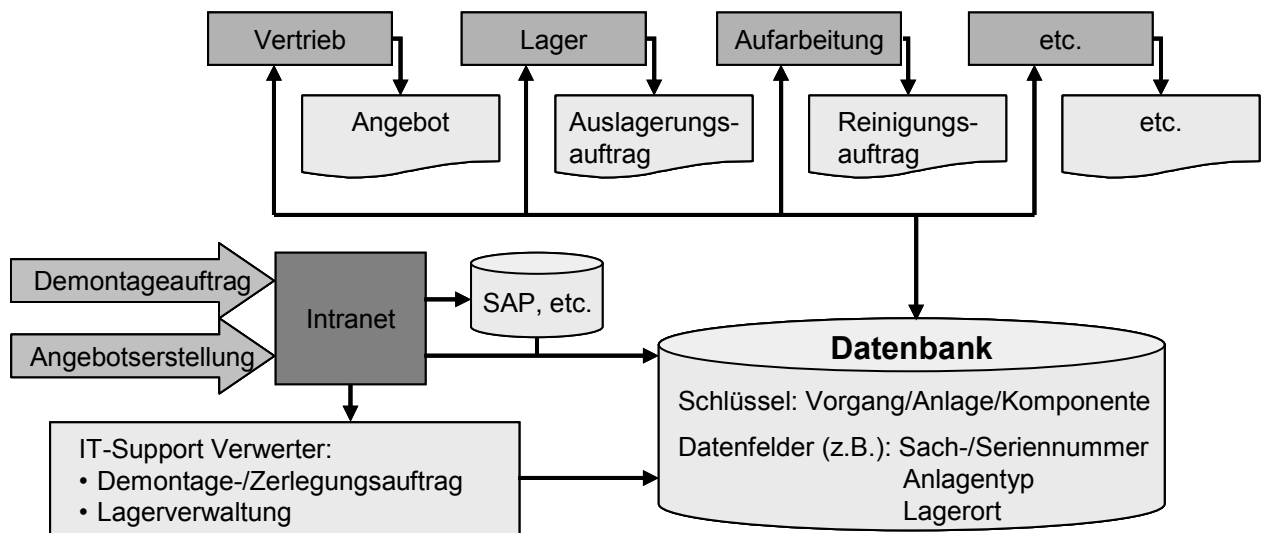


Bild 53: Konzept für die Umsetzung eines datenbankbasierten Softwaretools

Nachdem die Befugnisse der am Refurbishingprozess beteiligten Akteure sehr stark divergieren, ist es notwendig, alle Zugriffe berechtigungsgesteuert auszulegen und die Informationen im Inter- bzw. Intranet über verschiedene Sichten, spezifiziert über Attribute bereitzustellen und über Zugriffskontrollen zu schützen. Einen Eindruck der Vielzahl der zu erfassenden Statusattribute je Anlage zeigt Bild 54. Jedes Statusattribut verfügt über diverse vorgegebene Auswahlkriterien, so dass nach Erfassung der Anlage in der Software zunächst der Zustand der zurückzukaufenden Anlage ersichtlich ist. Beispielhaft werden die zu dokumentierenden Stati einiger Attribute im Folgenden genannt:

Lebenszyklusphase:	Rücknahme, Zerlegung, Vertrieb, Hold etc.
Aktueller Status:	Beim Kunden installiert, im Abbau, im Lager, befundet etc.
Optischer Eindruck:	Exzellente, gut, durchschnittlich etc.
Gesamteindruck:	Exzellente, gut, durchschnittlich, schlecht, zu reparieren etc.
Befundungsergebnis:	Funktionstüchtig, Aufarbeitung notwendig, zu entsorgen etc.

Daraus resultiert letztendlich die geplante Refurbishingstrategie, die, wie in Bild 45 dargestellt, die komplette Systemverwendung oder die Systemzerlegung bedeuten kann. Während des gesamten Aufarbeitungs- oder Verwertungsprozesses wird der aktuelle

Status der Anlage kontinuierlich dokumentiert und kann online von den Verantwortlichen nachvollzogen werden. Dies ermöglicht einen schnelleren Zugriff auf die jeweiligen, aktuellen Anlagendaten, fördert die Übersichtlichkeit des Ablaufcontrollings und vermindert die redundante Erfassung anlagenspezifischer Daten.

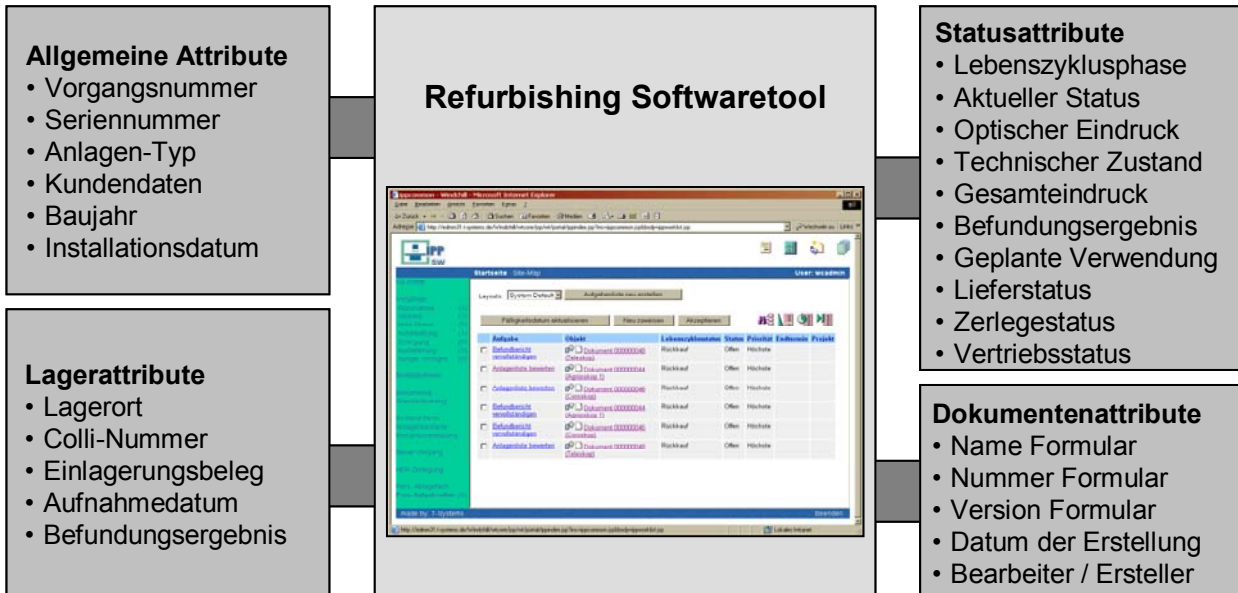


Bild 54: Auszüge der in der Software zu dokumentierenden Attribute je Anlage

5.5 Abschätzung des Umweltpotenzials durch das Refurbishing medizinischer Anlagen

Die Fertigung der im Rahmen des Projektes betrachteten medizinischer Anlagen ist aufgrund der hochgradig integrierten, komplexen Technologien, die einen hohen Material- und Energieverbrauch bedeuten, sehr aufwändig. Im Vergleich zum Energieaufwand, der während der Nutzungsphase einer medizinischen Röntgenanlagen durch die Erstellung von Aufnahmen auftritt, ist der während der Herstellungsphase – gemittelt auf die bereits in Bild 47 angenommen 40.000 Aufnahmen während des ersten Produktlebenszyklus – um den Faktor 160 höher anzusiedeln. Unter Berücksichtigung des Energieaufwands für das Refurbishing und der im zweiten Produktlebenszyklus verbrauchten Energie führt dies, gemittelt über den gesamten Produktlebenszyklus zu einer Energieeinsparung von ca. 20% pro Aufnahme. Bezogen auf insgesamt 60.000 durchgeführte Aufnahmen bedeutet dies eine Energieeinsparung von rund 9.600 kWh, was vergleichbar zum Energieverbrauch eines Drei-Personen Haushaltes über einen Zeitraum von fünf Jahren ist.

Die strukturierte Rücknahme von Altanlagen aus dem Markt hat darüber hinaus dazu geführt, dass während eines Zeitraums von 22 Monaten rund 80% der rückgeführten Medizingeräte wiederaufgearbeitet werden konnten. Von den verbleibenden 20%, die mit einem Masseanteil von ca. 1,27 Tonnen der Verwertung zugeführt wurden, wurden 95,6% (= 1.214,12 kg) über das Materialrecycling weiterverwendet. Lediglich

4% (= 50,8 kg) wurden thermischen verwertet und nur 0,4% (= 5,08 kg) der Deponie zugeführt.

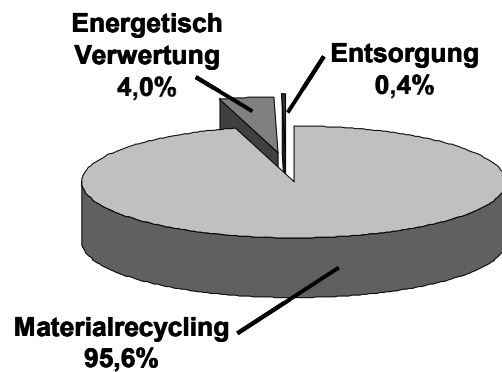


Bild 55: Behandlungsquoten der verwerteten Anlagen während der Projektlaufzeit

5.6 Zusammenfassung

Für medizinische Geräte werden derzeit im Rahmen der WEEE bzw. des ElektroG, wie in Kapitel 2.4 dargestellt, keine Quoten hinsichtlich Verwertung, Wiederverwendung und Recycling festgeschrieben, da die Berücksichtigung dieser B2B-Geräte erst ab 31.12.2008 erfolgt.

Dennoch konnte in diesem Kapitel anhand medizinischer Anlagen anschaulich dargestellt werden, welches ökologische und ökonomische Potenzial das Refurbishing für die Wiederverwendung und Verwertung bietet, wenn der Rückfluss der Anlagen vom Kunden über den Hersteller zum Kunden qualifiziert erfolgt.

Nachdem das Refurbishing eine Vielzahl beteiligter Akteure erfordert, ist eine klar strukturierte Kommunikation innerhalb eines vollständigen Wiederaufarbeitungsprozesses zwingend notwendig, um das Ablaufcontrolling effektiv zu gestalten. Die Nutzung eines auf die jeweiligen Spezifikationen der Produktgruppe angepassten Softwaretools trägt dazu bei, die Rückführlogistik zu optimieren, redundante Prozessschritte auszuschließen und aufgrund implementierter Warnmechanismen zügig auf Änderungsanforderungen zu reagieren.

Da medizinische Anlagen technologisch sehr komplex sind und durch die direkte Verwendung am Menschen besonderen Qualitätsanforderungen genügen müssen, dient die Analyse dieses Refurbishingprozesses als grundlegende Basis, um die gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls gewinnbringend in andere B2B-Bereiche übertragen zu können.

Die bevorstehende Einführung der EU-Richtlinie „Energy using Products“ (EUP) und das zunehmende Interesse der Industrie an der Wiederaufarbeitung Ihrer Altanlagen zeigen die politische und wirtschaftliche Bedeutung, die der Umsetzung der Integrierten Produktpolitik mittels Refurbishing zwischenzeitlich beigemessen wird.

6 Integrierte Produktpolitik bei schnelllebigen Massenprodukten

Im Zeitalter der mobilen Kommunikation und Datenverarbeitung gewinnen schnelllebige Massenprodukte in zunehmendem Maße an Bedeutung. Als Beispiele seien z. B. Laptops, Personal Digital Assistants (PDAs) oder Mobiltelefone genannt. Laptops, die bereits seit vielen Jahren vor allem im Geschäftsbereich weite Verbreitung finden, sind aufgrund der flexiblen Nutzbarkeit in zunehmendem Maße auch in Privathaushalten vorzufinden. Ebenso werden PDAs sowohl bei geschäftlichen als auch privaten Endnutzern sehr geschätzt. Die Möglichkeit, alle wichtigen Daten stets mit sich zu tragen, machen diese Geräte immer populärer und ermöglichen eine Steigerung der Effektivität geschäftlicher Abläufe. In dieselbe Kategorie gehören ebenfalls so genannte Handheld-PCs (Mininotebooks mit Tastatur) und Smartphones (Kombination aus Mobilfunkgerät und Handheld-Organizer). Die hohe Bedeutung der Geräte zeigt sich durch die allein im ersten Quartal 2004 erzielten Verkaufszahlen für PDAs von rund 2,2 Millionen verkaufter Geräte [84].

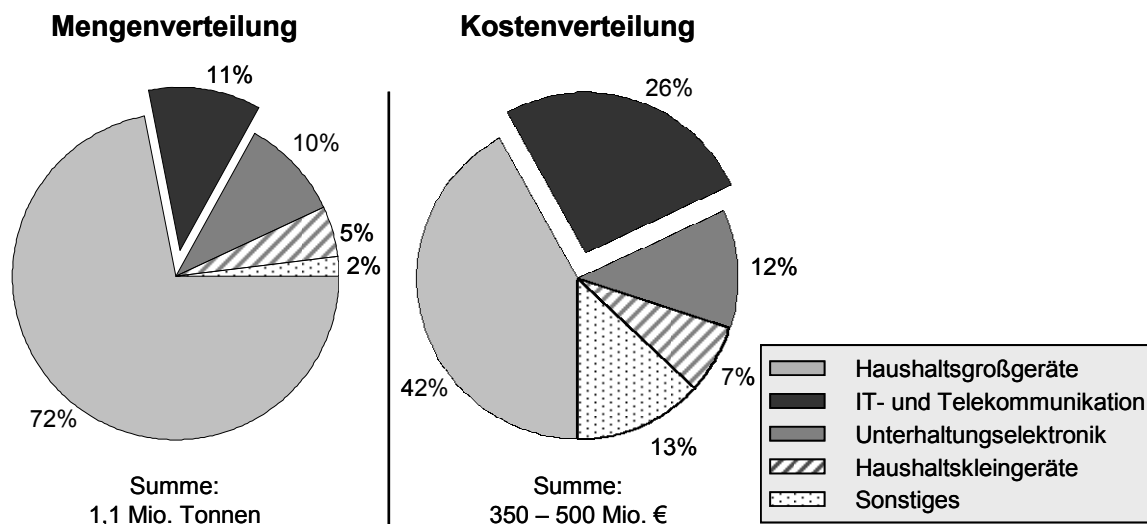


Bild 56: Geschätztes jährliches Aufkommen an Elektroaltgeräten ab 2005 [24]

Der Trend zu schnelllebigen Massenprodukten mit immer kürzeren Innovationszyklen bringt im Sinne der Integrierten Produktpolitik, d. h., einer ganzheitlichen, produktlebenszyklusübergreifenden Verantwortung, ebenfalls die Problematik der verwertungsgerechten Entsorgung der Geräte mit sich. Diese Geräte sind am Ende ihres ersten Produktlebenszyklus in den meisten Fällen voll funktionstauglich, werden allerdings von ihren Erstbesitzern nicht mehr verwendet. Wie in Bild 56 dargestellt, werden nach Umsetzung der WEEE und RoHS jährlich allein 1,1 Millionen Tonnen Elektroaltgeräte zur Verwertung erwartet. Der Bereich der IT- und Telekommunikationsgeräte hat mit 11% einen auf den ersten Blick eher geringen Anteil an der gesamten Mengenverteilung. Bei den Verwertungskosten hat diese Gerätekategorie allerdings einen Anteil von 26%, da diese innovativen Geräte in hohen Stückzahlen bei verhältnismäßig geringem Gewicht

und Volumen entsorgt werden, dabei jedoch teilweise hochintegrierte Komponenten enthalten, die getrennt verwertet werden müssen.

Insbesondere Mobiltelefone spiegeln diesen Trend wider. Daher wird im Folgenden auf das Potenzial zur Umsetzung der Integrierten Produktpolitik bei Mobiltelefonen eingegangen, wobei insbesondere deren durch die WEEE geforderte Entsorgungsanforderungen dargestellt und das bislang ungenutzte Potenzial zur Demontageoptimierung aufgezeigt werden. Bedingt durch die neuen Entsorgungs- und Verwertungsvorgaben sollen Rückschlüsse auf das Industrial Design gezogen werden, um dem ganzheitlichen Ansatz gerecht zu werden.

6.1 Aktuelle Marktsituation bei Mobiltelefonen

Weil Mobiltelefone nicht nur als Kommunikationsmedium genutzt, sondern auch als Modeaccessoire gesehen werden, erfolgt ein Austausch der Geräte nach ca. 18 bis 24 Monaten gegen ein aktuelles Modell, welches sowohl über erweiterte Funktionen verfügt, als auch hinsichtlich Form, Design und Haptik moderneren Ansprüchen genügt.

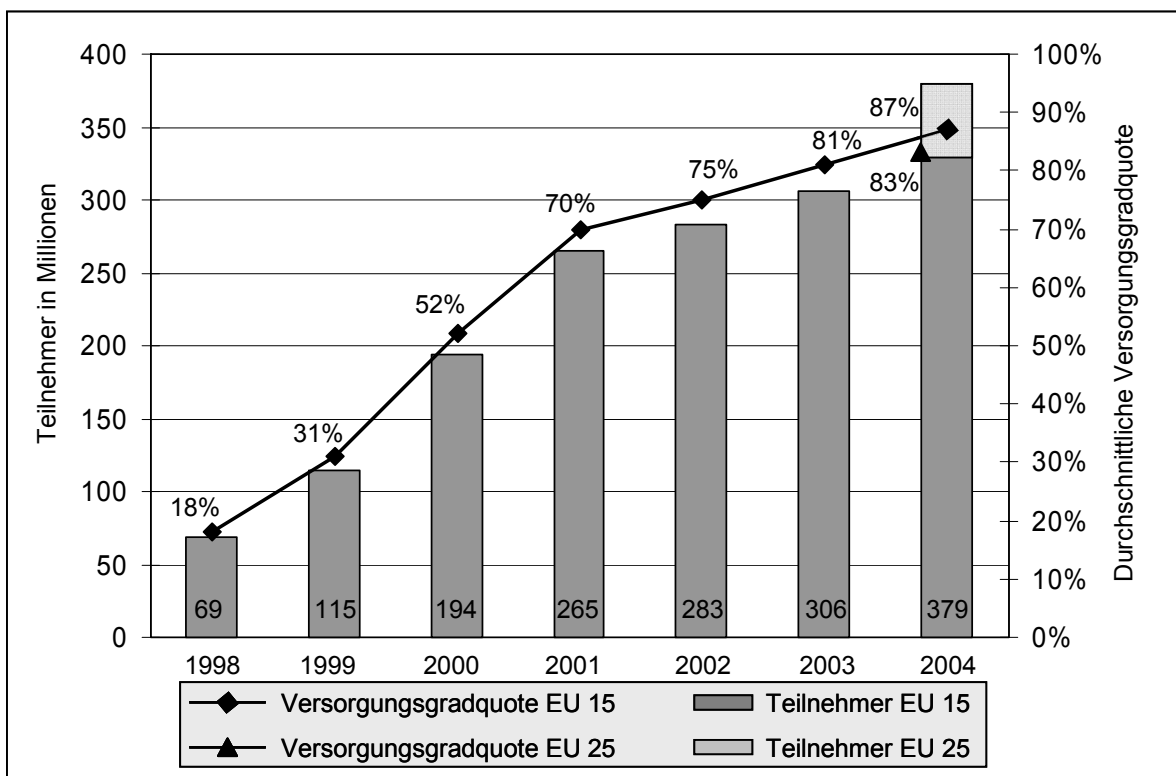


Bild 57: Entwicklung der europäischen Mobilfunkteilnehmer von 1998 bis 2004 unter Berücksichtigung der EU-Erweiterung in 2004 [63]

Der „10. Bericht der EU-Kommission zur Umsetzung des Regelungsrahmens im Bereich der elektronischen Kommunikation“ [63], veröffentlicht im Dezember 2004, zeigt umfangreiche Marktanalysen zur Entwicklung des europäischen Handymarktes. Wie in Bild 57 dargestellt, ist die Zahl der Mobilfunkteilnehmer in Europa seit 1998 kontinuierlich

lich sehr stark gewachsen. Insbesondere die Versorgungsquote von 83% (bzw. 87% bezogen auf die EU 15 Staaten), spiegelt die hohe Marktdurchdringung im Bereich mobiler Kommunikation wider.

Insgesamt sind EU-weit mehr als 279 Millionen Mobilfunknutzer registriert. Dabei steigt die Zahl jugendlicher Nutzer besonders stark an, wie der JIM-Studie (Jugend, Information und (Multi-)Media) [51] zu entnehmen ist. Die seit 1998 jährlich vom Medienpädagogischen Forschungsverbund Südwest (MPFS) durchgeführte Studie erfasst die Daten von 1000 Jugendlichen von 12 bis 19 Jahren, die in einer für die BRD repräsentativen Alters- und Geschlechtsverteilung ausgewählt wurden. Betrachtet werden unter anderem Verbreitung und Nutzung verschiedener Kommunikations- und Multimediageräte sowie deren Auswirkung auf das Freizeitverhalten der Jugendlichen.

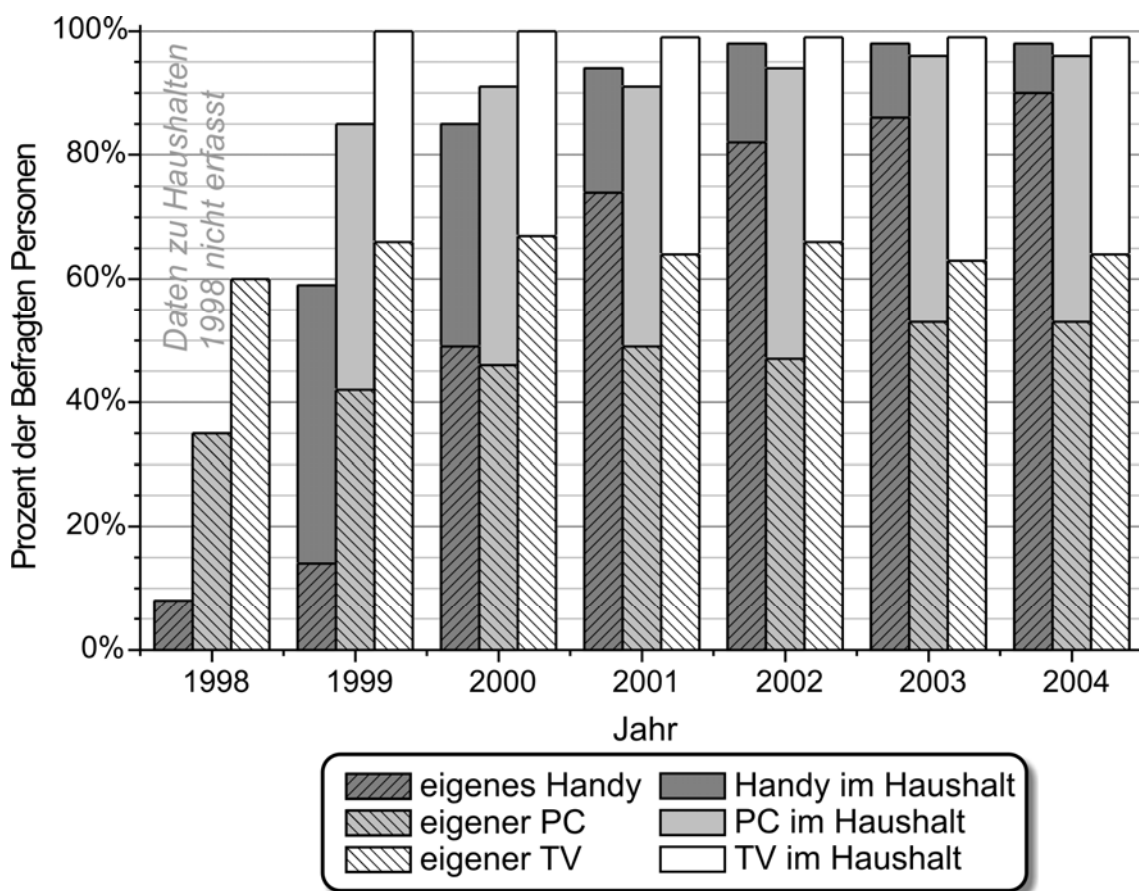


Bild 58: Entwicklung der Anzahl von Handys in privaten Haushalten mit besonderem Fokus auf Jugendliche

Bild 58 zeigt die Entwicklung der Zahlen von Mobiltelefonen im Vergleich zu PCs und TV-Geräten in privaten Haushalten mit besonderem Fokus auf Jugendliche. Seit 1998 ist die Anzahl der Handys bei Jugendlichen überproportional stark angestiegen. Bereits im Jahr 2000 übersteigt die Anzahl der Mobiltelefone bei Jugendlichen erstmals die der Computer, die seit 1999 mit knapp 65% nahezu konstant bleibt, wohingegen im Jahr 2004 bereits 90% der Jugendlichen über ein eigenes Mobiltelefon verfügen. Das heißt, innerhalb von nur sechs Jahren stieg der Anteil der jugendlichen Handybesitzer von

8% auf 90% an. Somit kann bei Haushalten mit Jugendlichen nahezu von einer Vollausstattung mit Mobiltelefonen gesprochen werden.

Die Entwicklung des Handymarktes in Europa ist recht heterogen, wie einer Pressemitteilung des Statistischen Amtes der Europäischen Gemeinschaften (EuroStat) vom 07.02.2005 zu entnehmen ist [73]: Die durchschnittliche Zahl an Mobilfunkverträgen je 100 Einwohnern im EU-weiten Mittel liegt bei etwa 80. Zwischen den führenden Ländern wie Luxemburg (120), Schweden (98) und Italien (96) und Ländern wie Lettland (52) oder Polen (46) liegt jedoch eine relativ weite Spanne, so dass ein weiteres Entwicklungspotenzial besteht.

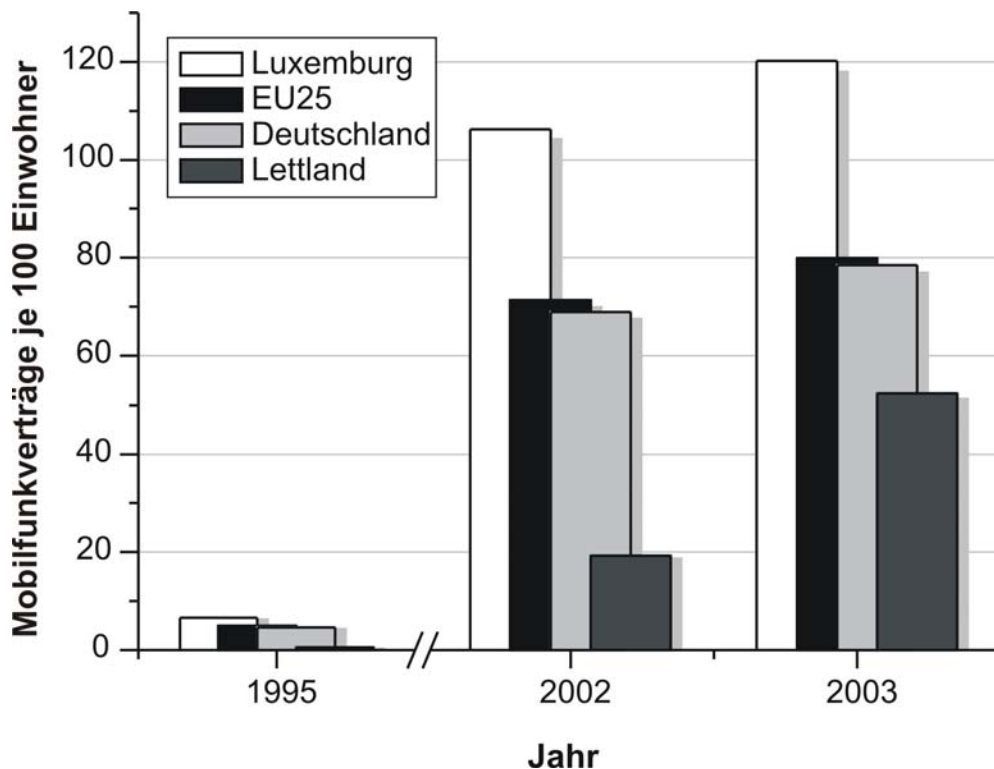


Bild 59: Anzahl der Mobilfunkverträge je 100 Einwohner einiger ausgewählter EU-Länder gemittelt über alle 25 Mitgliedstaaten (EU 25) [73]

Weltweit wurden im Jahr 2004 insgesamt 520 Millionen Mobiltelefone verkauft. Dies ist eine Steigerung um 20,5% gegenüber dem Vorjahr [78]. Insbesondere die Entwicklung in China und Indien trägt zu dem rasanten Wachstum des Handymarktes bei. Im Jahr 2004 ist die Zahl der chinesischen Handy-Nutzer auf über 320 Millionen angewachsen und übersteigt damit erstmals die Anzahl an Festnetzanschlüssen, die bei 310 Millionen liegt. Dennoch beträgt die Deckungsrate mobiler Telefone erst 24,8%, so dass in den nächsten Jahren mit einem weiteren Wachstum mobiler Endgeräte zu rechnen ist [50].

6.2 Entsorgungsproblematik mobiler Endgeräte

Die Entsorgung von Mobiltelefonen war bislang keine besondere Herausforderung, da die Rücklaufquoten dieser Geräte als relativ gering einzustufen sind. Daher wurden

auch keine für sie gesonderten Entsorgungsverfahren entwickelt, sondern die Geräte gemeinsam mit anderen Kleingeräten geschreddert. Nach der Zerkleinerung werden sie über Separationsverfahren wie Schwimm-/Sinkverfahren, Zyklontechnologie etc. soweit möglich in Materialfraktionen aufgespaltet und entsorgt. Nachdem die Leiterplatte bei Mobiltelefonen einen prozentual auf das Gewicht bezogenen, hohen Anteil von ca. 20% bis 30% ausmacht, wie ausführlich in Kapitel 6.3.1 dargestellt werden wird, wird diese Fraktion der Kupferhütte zugeführt, um die hochwertigen Bestandteile wie Kupfer, Gold etc. wiederzugewinnen. Die verbleibenden Kunststofffraktionen werden größtenteils verbrannt, der Akkumulator dem Recycling zugeführt.

Mit Einführung der EU-Richtlinien WEEE und RoHS, bzw. Umsetzung des für Deutschland relevanten ElektroG, treten für Mobiltelefone besondere Regelungen in Kraft. Die im ElektroG verankerte Entsorgungspflicht für alle Elektro- und Elektronikgeräte betrifft auch Mobiltelefone, die der Kategorie 3 „IT- und Telekommunikationsgeräte“ zuzuordnen sind und zukünftig gemeinsam mit „Geräten der Unterhaltungselektronik“ gesammelt werden. Wie in Bild 60 dargestellt, sind diese Gerätekategorien zukünftig zu mindestens 75% zu verwerten, wovon mindestens 65% dem Recycling zugeführt werden müssen. Lediglich 25% dürfen in Form von Deponierung beseitigt werden.

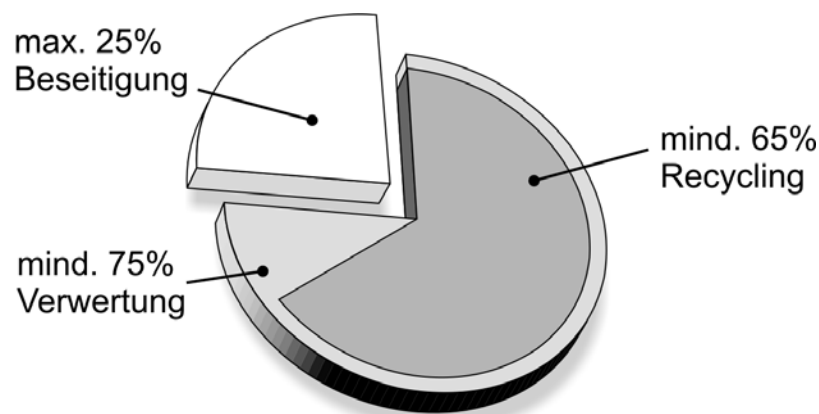


Bild 60: Verwertungsquote laut ElektroG für IT- und Telekommunikationsgeräte

Darüber hinaus gilt für Mobiltelefone eine besondere Regelung: Anhang III des ElektroG stellt, in Anlehnung an die Vorgaben der WEEE, besondere Anforderungen an die „*Selektive Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen der Elektro- und Elektronik-Altgeräten nach § 11 Abs. 2*“ [125]. Absatz 1 besagt:

„Mindestens folgende Stoffe, Zubereitungen und Bauteile müssen aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden: [...]

c) Leiterplatten von Mobiltelefonen generell sowie von sonstigen Geräten, wenn die Oberfläche der Leiterplatte größer ist als 10 Quadratzentimeter.“

Nachdem die Anzahl der in Umlauf befindlichen Handys zunimmt, wird zukünftig auch die Zahl rückläufiger Altgeräte vehement ansteigen. Daher stellt die Forderung nach der „Entfernung“ der Leiterplatte aus Mobiltelefonen die Entsorger vor eine große Herausforderung. Die Richtlinie legt nicht eindeutig fest, ob die „Entfernung“ der Leiterplatte

durch Separation mittels Schreddervorgang ausreichend ist oder die „Entfernung“ dieser Fraktion selektiv durch manuelle oder automatisierte Demontage zu erfolgen hat. Daher wurden zur Feststellung der Demontagerechtheit derzeit im Verwertungsprozess befindlicher Handy-Altgeräte eine Demontageanalyse durchgeführt, die Schwachstellen und Potenziale aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden vorgestellt.

6.3 Demontagerechtheit rückläufiger Mobiltelefone

Die Demontage von Mobiltelefonen stellt aufgrund der kurzen Innovationszyklen und der hohen Variantenvielfalt eine besondere Herausforderung für Industrie und Entsorger dar. Dabei sind insbesondere die Charakteristika für die manuelle und automatisierte Demontage zu beachten. Die besonderen Anforderungen an die automatisierte Demontage dieser Produktkategorie werden eingehend im Sonderforschungsbereich 281 „Demontagefabriken“ betrachtet [83]. Die Automatisierung gestaltet sich als ein sehr anspruchsvoller Prozess, da die Geräte durch ihre komplexe Technologie und kompakte Bauform schwer handhabbar sind [3], [102]. Darüber hinaus bedeuten die hohe Materialvielfalt und geringen Gewichte der einzelnen Komponenten lediglich marginale Erträge bei der Materialverwertung, so dass die Effektivität des Prozesses und die Höhe der Rücklaufquoten wesentlichen Einfluss auf den Gewinn haben. Mobiltelefone gestalten sich aufgrund der vielen Komponenten auf sehr kleinem Raum relativ demontageunfreundlich: Das Handling wird durch kleine Greifflächen schwierig, winzige Schrauben und Schnappverbindungen lassen das Öffnen des Gehäuses anspruchsvoll werden. Die Problematik der Klapphandys stellt darüber hinaus zusätzliche Anforderungen an die Prozessführung [79].

6.3.1 Manuelle Demontageanalyse mittels Display/ReGrEd

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die allgemeine Demontagefreundlichkeit derzeit rückläufiger Mobiltelefone unter Berücksichtigung der durch das ElektroG gegebenen Anforderungen analysiert. Dafür wurde das in Kapitel 3.3.2 vorgestellte Demontageanalysetool Display/ReGrEd verwendet.

Die umfangreichen Berechnungsfunktionen sowie hinterlegten Daten zu Verwertungs- und Recyclingprozessen ermöglichen eine virtuelle Demontage der Geräte. Verschiedene Optimierungsstrategien und Analysefunktionen helfen bei der Bewertung des Demontagevorgangs und geben Anhaltspunkte für konstruktive Verbesserungen. Hierbei wurden die vier in Tabelle 12 dargestellten Demontagestrategien analysiert. Unter Berücksichtigung des ElektroG war insbesondere die „Kosten- und Recyclingoptimierte Demontage“ für die durchgeführten Untersuchungen von Bedeutung.

Bezeichnung der Demontageart	Strategie
Minimal	Nur Komponenten mit Giftstoffen werden entfernt
Kostenoptimal	Optimierung nach Gesamtkosten
Kosten- und Recycling/Verwertungsoptimiert	Optimierung nach Gesamtkosten unter Einhaltung vorgegebener Recycling- und Verwertungsquoten
Komplett	Vollständige Demontage

Tabelle 12: Demontagestrategien in Display/ReGrEd

Insgesamt wurden 30 Geräte betrachtet, die seitens eines Verwerfers zur Verfügung gestellt wurden und somit den derzeit vorhandenen Rückfluss gebrauchter Mobiltelefone widerspiegeln.

Der Schwerpunkt der untersuchten Geräte lag bei den nach 1997 entwickelten Modellen. Telefone mit Baujahren nach 2000 sind häufig noch in Benutzung oder werden als Ersatzgeräte aufbewahrt, und standen somit, wie Tabelle 13 zu entnehmen ist, nicht für Demontagezwecke zur Verfügung. Unmittelbar erkennbar ist der Entwicklungstrend der Akkumulatoren: Seit 1995 wurden Nickel-Metallhydrid-Akkus und bereits seit 1996 Lithium-Ionen-Akkus eingesetzt. Die schweren, leistungsschwächeren und umweltkritischen Nickel-Cadmium-Akkus werden ab 1997 bei Neugeräten nicht mehr verwendet.

Die Demontage der Geräte erfolgte, soweit möglich, zerstörungsfrei. Dies ist nur bedingt umsetzbar, da teilweise Spezialwerkzeuge zum Öffnen komplizierter Clipverbindungen oder Spezialschrauben erforderlich sind, was den Demontagevorgang wesentlich erschwert. Der Aufbau der Telefone ist weitestgehend ähnlich, so dass die wesentlichen Demontageschritte nahezu identisch sind: Als erster Schritt ist der Akkumulator von der Geräterückseite zu entfernen. Teilweise wird er durch eine Kunststoffabdeckung geschützt, so dass ein zusätzlicher Demontageschritt notwendig wird. Da der Akku vom Benutzer des Telefons selbst entnommen werden kann, um ihn auszutauschen oder die darunter liegende SIM-Karte zu wechseln, ist diese Verbindung sehr einfach und ohne Werkzeug zu lösen. Bei manchen Geräten kann vor dem Öffnen des Gehäuses die Antenne abgeschraubt werden, bei anderen ist diese erst bei geöffnetem Gehäuse entnehmbar, sofern sie nicht als MID-Bauteil in dieses integriert ist. Den aufwendigsten und wichtigsten Schritt stellt die Trennung von Ober- und Unterschale dar. Bei den meisten Geräten sind hierfür mehrere Schrauben zu lösen, die auch die im Inneren liegende Leiterplatte fixieren. Zusätzlich sind darüber hinaus Clipverbindungen zu öffnen, die vereinzelt sehr schwer zugänglich sind. Nach Trennung des Gehäuses sind Leiterplatte, Display, andere Elektronikkomponenten, Tastatur, Knöpfe, Befestigungselemente, Abstandhalter, Abschirmungsplatten, Dämpfungsmatten etc. demontierbar. Die Reihenfolge ist gerätespezifisch sehr unterschiedlich. Die Komponenten sind in die Gehäuseschalen geclipt, gelegt oder geklebt, oder werden über die Leiterplatte oder zusätzliche Befestigungselemente fixiert.

	Hersteller - Modell	Baujahr	Akkutyp	Gewicht [g]
1	alcatel - one touch club db	2000	NiMH	149
2	alcatel - one touch club+	1997	NiMH	181
3	alcatel - one touch easy	1997	NiMH	196
4	ericsson - 1512	1992	NiCd	454
5	mitsubishi - electric	1998	NiMH	178
6	mitsubishi - trium astral	1999	NiMH	149
7	mitsubishi - trium laser	2000	NiMH	149
8	motorola - c160	1998	NiMH	193
9	motorola - cd 930	1998	Li-Ion	151
10	motorola - d1-528	1994	NiCd	288
11	motorola - d170	1997	NiMH	203
12	motorola - m3788	1999	NiMH	172
13	motorola - startac85	1997	Li-Ion	119
14	nokia - 1611	1996	NiMH	231
15	nokia - 2110	1995	NiMH	231
16	nokia - 5130	1998	Li-Ion	143
17	nokia - 6110	1998	Li-Ion	137
18	nokia - 6210	2000	Li-Ion	108
19	nokia - 8110	1996	Li-Ion	151
20	nokia - pt11	1995	NiMH	229
21	panasonic - gd50	1999	NiMH	112
22	philips - diga	1997	NiMH	186
23	philips - fizz	1996	NiCd	244
24	philips - pr810	1992	NiCd	470
25	philips - savvy	1999	NiMH	145
26	siemens - c25	1999	NiMH	135
27	siemens - c35	2000	NiMH	117
28	siemens - s10active	1998	Li-Ion	188
29	siemens - sl10d	1998	Li-Ion	154
30	sony - cmdj5	2000	Li-Ion	83

Tabelle 13: Übersicht der analysierten Mobiltelefone

Besonders negative Konstruktionsbeispiele fielen bei drei Handys auf. Bild 61 zeigt auf der linken Seite ein Gehäuse, welches mit insgesamt sieben Schrauben fixiert wird. Der Demontageaufwand, der betrieben werden muss, um die Leiterplatte sowie die übrigen Komponenten zu entfernen, steigt dadurch unverhältnismäßig an. In der Mitte wird eine Spezialschraube verwendet, die ohne zusätzliches Werkzeug nicht oder nur zerstörend entfernbare ist. Die Verwendung von Schraubenabdeckungen, wie rechts in Bild 61 dar-

gestellt, führt dazu, dass Schraubverbindungen zunächst als solche erkannt werden müssen. Insbesondere wenn sie nicht, wie hier abgebildet, einzeln abgedeckt werden, sondern unter Logo-Emblemen, Typenschildern etc. verborgen sind.

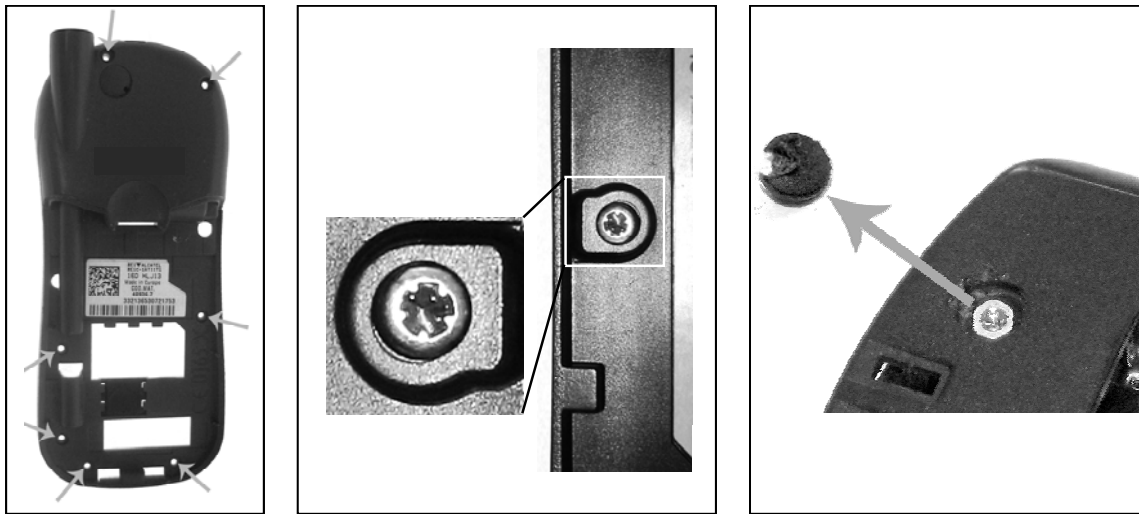


Bild 61: Negative Konstruktionsbeispiele von Handygehäusen (Links: Schraubenvielzahl, Mitte: Spezialwerkzeug notwendig, Rechts: Schraubenabdeckung)

Eine genaue Kenntnis der Öffnungsmechanismen für die hohe Variantenzahl scheint nahezu unmöglich. Abhilfe könnte durch ein Werkerinformationssystem gegeben werden, welches den Arbeiter über die genauen Orte und Arten zu öffnender Verbindungen informiert. Dies setzt allerdings voraus, dass eine Datenbank zur Verfügung steht, der die demontagerelevanten Informationen der Mobiltelefone hinterlegt sind. Dies beinhaltet sowohl Informationen über Art und Ort der Verbindungen, als auch Aussagen zu Materialarten, um die Separation der Materialfraktionen zu vereinfachen und die gesamte Verwertungskette zu optimieren. Aufgrund der hohen Variantenvielfalt an Mobiltelefonen stellt dies einen nicht unerheblichen Aufwand zur Datenerfassung dar, der wiederum in der Kosten-/Nutzenanalyse Berücksichtigung finden muss.

Anhand der Demontageanalyse wird schnell deutlich, dass der Akkumulator und die elektronische Baugruppe die Hauptbestandteile eines Mobiltelefons hinsichtlich der Demontageanforderungen darstellen. Dabei lässt sich der Akku erfahrungsgemäß sehr einfach, die elektronische Baugruppe hingegen in Abhängigkeit von den gewählten Verbindungstypen umso schwieriger entfernen.

Wie Bild 62 zeigt, sind die elektronische Baugruppe und der Akkumulator bei älteren Modellen mit bis zu 90% hauptverantwortlich für das Gewicht eines Mobiltelefons. Die Wahl des Akkumulators, dessen Gewicht stark variiert, beeinflusst maßgeblich die prozentuale Verteilung des Gesamtgewichts: Nickel-Cadmium-Akkus sind deutlich schwerer als Nickel Metallhydrid oder gar Lithium-Ionen Akkus, darüber hinaus verfügen sie über geringere Speicherkapazitäten, so dass sie deshalb nur in sehr alten Geräten aufzufinden sind. Neben diversen Kleinteilen stellt das Gehäuse eine weitere, wesentliche Materialfraktion dar. Die übrigen Komponenten beschränken sich auf unterschiedliche Materialfraktionen mit geringen Gewichtsanteilen.

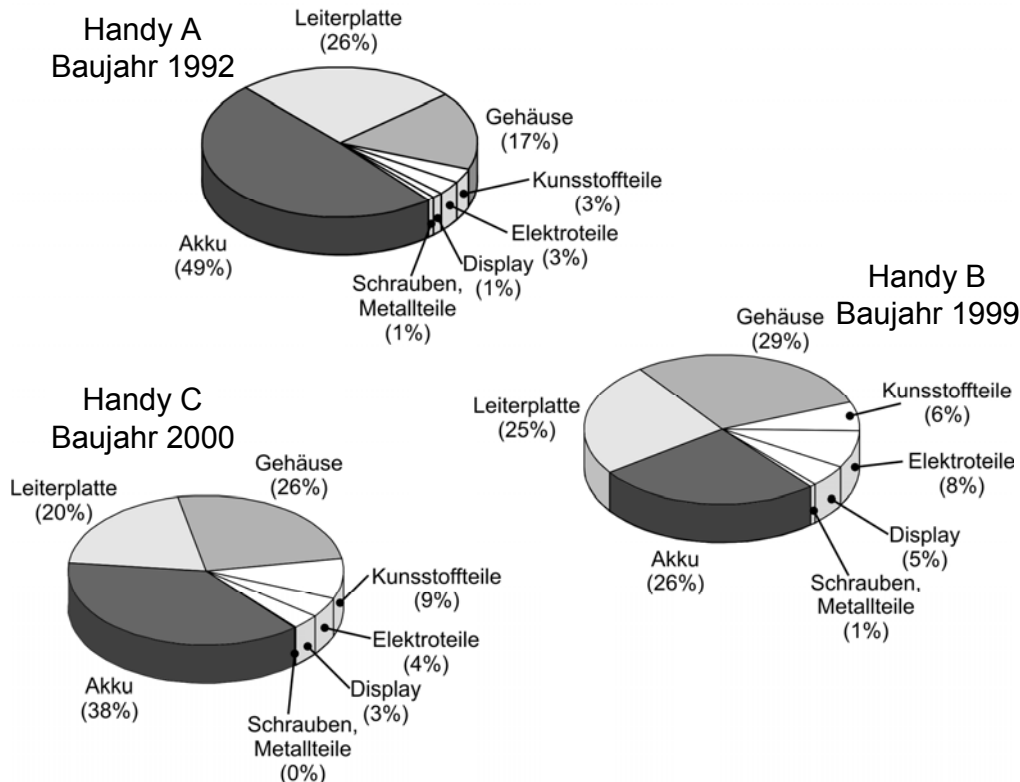


Bild 62: Gewichtsverteilung dreier ausgewählter Mobiltelefone mit unterschiedlichen Akkutypen (Modell A: NiCd, Modell B: NiMH, Modell C: Li-Ion)

Innerhalb des betrachteten Zeitraums von acht Jahren zeigt sich ein deutlicher Trend zu reduzierter Handygröße. Betrug das Gewicht der Modelle von 1992 noch rund 450 g, reduzierte sich dies in 2000 bereits um 63% auf durchschnittlich 120 g. Der gleiche Trend lässt sich für das Gerätevolumen feststellen, da aufgrund integrierter Multilayer-Technologien und kompakterer Strukturen kleinere Bauweisen möglich sind.

Trotz reduziertem Volumen sinkt die Anzahl der Komponenten tendenziell nicht, wie Bild 63 zu entnehmen ist. Dabei werden bei jedem Hersteller jeweils auf der linken Seite die älteren und rechts die neueren Modelle dargestellt. Lediglich Hersteller F zeigt eine klare Trendwende der Komponentenzahl bei den zwei jüngeren Modellen (gefertigt 1999 und 2000), die um nahezu 50% reduziert wurde. Bei Hersteller B ist eine kontinuierliche Abnahme der Komponentenzahl erkennbar. Alle übrigen Hersteller zeigen keinerlei Entwicklungstendenzen in diesem Bereich.

Neben der Anzahl der Komponenten sind insbesondere die Verbindungen charakteristisch für die Demontagefreundlichkeit von Produkten. Bild 64 gibt daher einen Überblick über die unterschiedlichen, in den Mobiltelefonen vorhandenen Verbindungen. Dabei wird sowohl die Anzahl als auch der Typ verdeutlicht. Die linke Ordinate stellt die Gesamtzahl der Verbindungen dar. Gleichzeitig kann, aufgrund der gestaffelten Darstellung, die Häufigkeit der jeweiligen Verbindungstypen abgelesen werden. Auf der rechten Ordinate wird die Zeit aufgetragen, die zu einer Kosten- und Recycling/Verwertungsgerechten Demontage (s. Tabelle 12) entsprechend der Anforderung des ElektroG not-

wendig ist. Zunächst ist anschaulich, dass eine hohe Anzahl an Verbindungen ebenfalls zu einer hohen Demontagezeit führt.

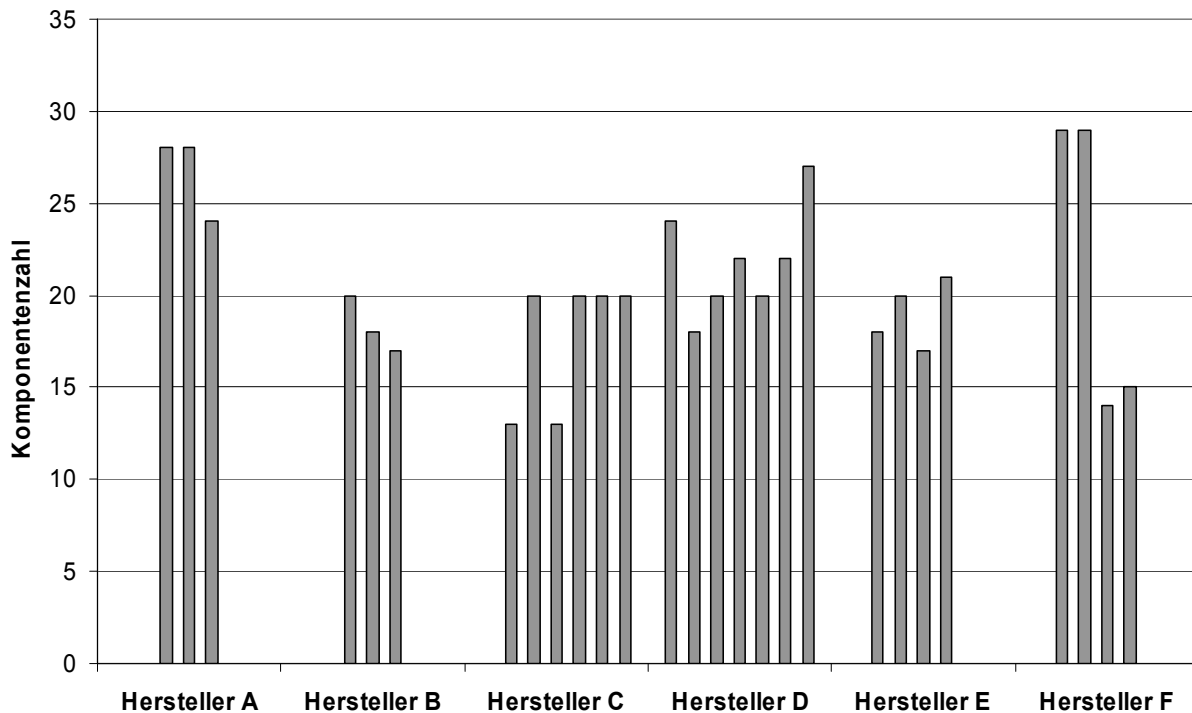


Bild 63: Komponentenzahlen einiger Modelle sortiert nach Hersteller

Ein Vergleich der Geräte 23 und 24 zeigt deutlich, dass abhängig von der Anzahl der Schraubverbindungen die Demontagezeit stark anwächst, obwohl beide Mobiltelefone über die identische Gesamtzahl an Verbindungen verfügen. Absolute Negativbeispiele sind Geräte Nr. 2 und 3, die jeweils 16 Schraubverbindungen und eine Kosten- und Recycling/Verwertungsoptimierte Demontagezeit von jeweils nahezu 4 Minuten (234 Sekunden) aufweisen. Lediglich Gerät 26 und 27 verzichten vollständig auf Schraubverbindungen, was sich unmittelbar in der Demontagezeit widerspiegelt, die bei 39 Sekunden liegt. Im Vergleich hierzu sei Handy 10 genannt, welches über die identische Anzahl an Verbindungen wie Modell 27 verfügt, allerdings eine Schraubverbindung hat, so dass die Demontagezeit von Gerät Nr. 10 unter Berücksichtigung weiterer Optionen bei 86 Sekunden liegt, wohingegen Gerät Nr. 27 lediglich 39 Sekunden für die Kosten- und Recycling/Verwertungsoptimierte Demontage benötigt.

Die in den Telefonen eingesetzten Werkstoffe entscheiden über die anwendbaren Verwertungsmethoden nach der Demontage. Aufgrund der dabei anfallenden Kosten oder erzielbaren Gewinne haben diese eine Rückwirkung auf den Verwertungsprozess. Exakte Kenntnisse über die eingesetzten Werkstoffe erleichtern daher die Effektivität des Demontageprozesses der kleinen Komponenten geringer Masse. Nachdem bislang keine Kennzeichnungspflicht für verarbeitete Materialien existiert, bereitet deren Identifikation derzeit Schwierigkeiten. Während Schrauben oder Aluminiumbauteile leicht identifi-

zierbar sind, gestaltet sich dies bei den meisten anderen Komponenten umso schwieriger.

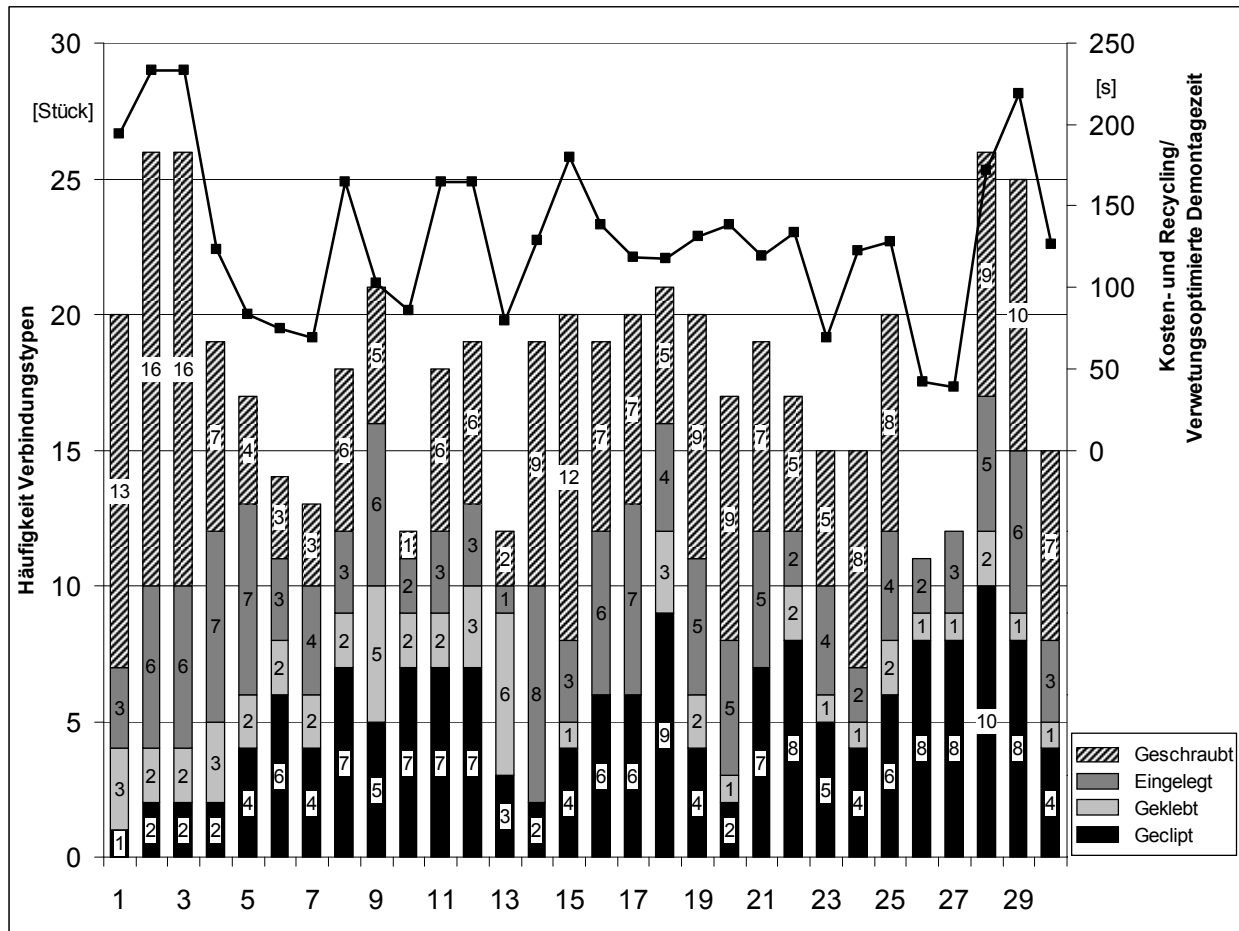


Bild 64: Darstellung der Verbindungstypen je Handy gegenüber der Kosten- und Recycling/Verwertungsoptimierten Demontagezeit

Die Identifizierung der Kunststoffe ist besonders problematisch, da sie optisch meist nicht eindeutig einzuordnen sind, so dass eine Unterscheidung in recycelbare und nicht recycelbare Kunststoffe schwierig wird. In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für anorganische und analytische Chemie (AOC) der Universität Erlangen-Nürnberg wurden für einige Bauteile chemische Analysen durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei den Gehäuseteilen der Telefone der Kunststoff PC/ABS zum Einsatz kommt, der bei den meisten Geräten auch als solcher gekennzeichnet ist. Bei anderen Bauelementen ergaben stichprobenartige Tests jedoch keine vergleichbaren Resultate. Selbst optisch identisch erscheinende transparente Werkstoffe werden oftmals aus chemisch völlig verschiedenen Materialien gefertigt, wie z. B. Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC) und Polystyrol (PS). Dies erschwert ein hochwertiges werkstoffliches Recycling, da die Anforderung an eine sortenreine Materialtrennung nicht gewährleistet werden kann. Eingefärbte Kunststoffe erschweren die Differenzierung nochmals um ein Vielfaches.

Zusätzlich zu Standardgeräten sind Klapp- und Schiebehandys weit verbreitet. Sie bestehen im Allgemeinen aus zwei Gehäusen, von denen eines das Display und ggf. eini-

ge Displaytasten enthält, das zweite die Haupttastatur. Bei Nichtgebrauch werden die zwei Gehäuse zusammengeklappt oder -geschoben, so dass sich die Größe des Mobiltelefons nochmals reduziert und darüber hinaus das Display und die Tastatur geschützt werden. Diese komplexen Bauformen erfordern einen zusätzlichen Aufwand für die Demontage, da statt nur einem hier zwei Gehäuse geöffnet werden müssen. Damit steigt neben der Komponentenzahl auch die Demontagezeit und somit die Kosten zur Entnahme der Baugruppe erheblich an. Ein Vergleich von Modell 27 und 29 in Bild 64 zeigt unmittelbar, dass, obwohl beide sowohl vom gleichen Hersteller als auch aus demselben Fertigungsjahr sind, für das Klapphandy (Modell 29) ein wesentlich höherer Aufwand für die Demontage aufzuwenden ist. Hinsichtlich einer verwertungsgerechten Kosten-/Nutzenrelation erweist sich diese Art von Mobiltelefonen als unpraktikabel.

6.3.2 Optimierungspotenzial

Die in Kapitel 6.3.1 gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass Mobiltelefone im Sinne der Integrierten Produktpolitik ein hohes Optimierungspotenzial aufweisen. Wie anhand Bild 65 erkennbar ist, ist erst eines der analysierten Handys in der Lage, die durch das ElektroG gestellten Anforderungen an Recycling- und Verwertungsquoten zu erfüllen. Die übrigen Geräte erreichen zwar die Anforderungen an die 75%-Quote der Verwertung, ein Recycling von 65% kann in den meisten Fällen jedoch nicht erzielt werden.

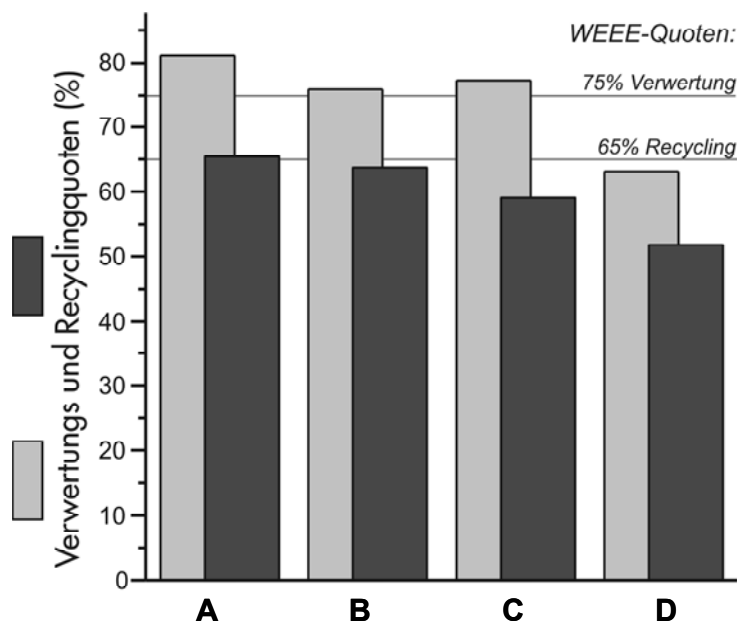


Bild 65: Erfüllung der Verwertungs- und Recyclingquoten einiger ausgewählter Mobiltelefone nach den Anforderungen des ElektroG

Generell ist derzeit der zur Demontage notwendige Aufwand als sehr hoch und somit kostenintensiv einzustufen. Die Entwicklung von Neugeräten muss somit neben der Integration neuer, erweiterter Funktionen ebenfalls die Demontagefreundlichkeit berücksichtigen.

sichtigen, um ein ganzheitliches Produkt entlang des gesamten Lebenszyklus zu gewährleisten, langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben und Kosten zu senken.

Sowohl die Wahl der Verbindungstechnologien hinsichtlich Anzahl und Art als auch die Materialreinheit sowie -kennzeichnung sind entscheidende Kriterien für den ökologischen Nutzen sowie den ökonomischen Gewinn, da sie sich unmittelbar auf die Demontagezeit und sortenreine Verwertung auswirken.

Insbesondere die Trennung der Ober- und Unterschale, welche die wichtigsten Komponenten für das Öffnen des Gerätes darstellen, muss zügig und möglichst einfach erfolgen. Gleichzeitig muss im Sinne der Garantieverpflichtung jedoch sichergestellt werden, dass der Kunde das Mobiltelefon nicht unsachgemäß öffnet und womöglich Schäden innerhalb der Gewährleistungsfrist verursacht. Darüber hinaus sollte die elektronische Baugruppe mit Öffnen der Gehäuseschalen ebenfalls zügig und ohne zusätzliche Demontageschritte entfernbar sein, um der Anforderung des ElektroG nach separater Behandlung mit möglichst wenig Zusatzaufwand gerecht zu werden. Der Einsatz von Clipverbindungen, welche auf hinreichend einfache Lösbarkeit überprüft werden sollten, hat sich als sinnvoll erwiesen. Dies führt zu einer Zeitersparnis nicht nur bei der Demontage sondern ebenfalls bei der Montage, so dass darüber hinaus Kosten eingespart werden, da die Handymontage weitestgehend manuell erfolgt.

Ansätze zur Reduktion der Materialvielfalt sollten zukünftig im Sinne der IPP in den Produktentwicklungsprozess integriert werden, so dass sich nach Möglichkeit eine über die Entfernung der Baugruppe hinausgehende Demontage von Komponenten erübrigt. Nachdem sich PC/ABS als Gehäusewerkstoff etabliert hat, spricht insbesondere bei den im Geräteinneren liegenden Kunststoffteilen in vielen Fällen aus technischer Sicht nichts dagegen, ebenfalls diesen Materialkomplex zu verwenden. Eine mechanische Belastung ist meist nicht vorhanden, und die Auswirkung unterschiedlicher Materialkosten ist aufgrund der geringen Bauteilabmessungen nicht wesentlich. Für transparente Bauteile wie Displayfenster oder elastische Komponenten wie die Tastaturmatte sollte jeweils ein geeignetes Material gewählt werden. Eine entsprechende Kennzeichnung der Bauteile erleichtert die Charakterisierung für die Verwertung erheblich und wird von den meisten Herstellern bereits an einigen Bauelementen durchgeführt. Eine Ausweitung auf alle Komponenten dürfte mit relativ geringem Aufwand realisierbar sein. Eine Beschränkung auf wenige Kunststoffe ermöglicht die sortenreine Auftrennung nach der Demontage als Voraussetzung für einen hochwertigen Recyclingprozess zur Gewinnung von Recyclingmaterialien mit ähnlich guten Eigenschaften wie die des Ausgangsmaterials. Der Materialkreislauf kann dadurch in sich geschlossen werden, so dass Ressourcen geschont werden und die Menge der zu deponierenden Abfälle reduziert wird.

Die Anzahl unterschiedlicher Komponenten lässt sich, wie in Bild 66 dargestellt, durch den Einsatz flexibler Schaltungsträger reduzieren. Die dargestellte Komponente wurde in dem im Jahr 2000 gefertigten Mobiltelefon „Sony CMDJ5“ verwendet und integriert die Komponenten Piepser, seitlicher Drehknopf zur Menüführung, Seitentaster und Lautsprecher in einem Bauteil miteinander, so dass dadurch sowohl die Montage als

auch die Demontage des Gerätes erheblich erleichtert werden, da statt vier separater Komponenten lediglich eine entfernt werden muss.

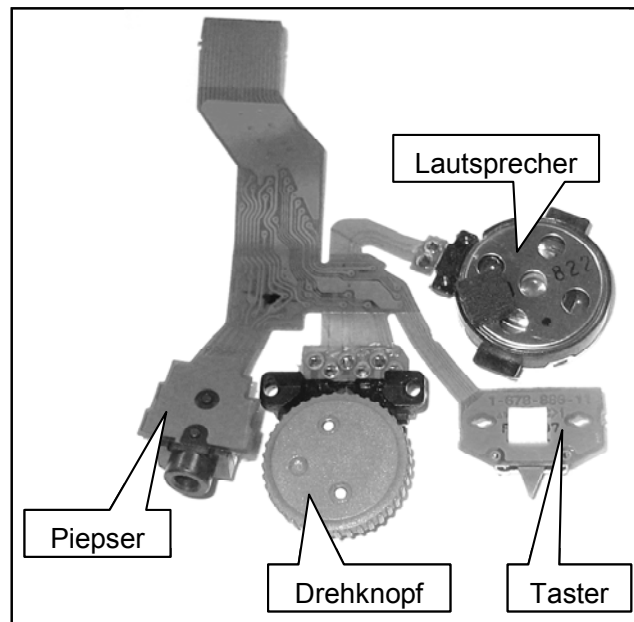


Bild 66: Reduktion von Komponenten durch kombinierte Bauteile mittels Leiterfolie

Hinsichtlich der Entwicklung der Akkumulatoren ist bereits ein deutlicher Fortschritt beobachtbar: Betrug die durchschnittliche Größe eines 1992 verwendeten NiCd-Akkus noch knapp 140 mm, so war im Jahr 2000 bereits die Gesamtgröße des Mobiltelefons mit unter 120 mm kleiner. Der zu diesem Modell gehörige Li-Ionen Akkumulator hat bei einer wesentlich höheren Leistungsfähigkeit noch eine Baugröße von knapp 60 mm.

Der heute beobachtbare Trend geht hin zur Entwicklung von Brennstoffzellen für mobile Kommunikationsgeräte – u. a. auch Handys. Bereits 2004 hat ein japanischer Handyhersteller das erste Gerät mit Brennstoffzelle vorgestellt. Hierbei wird das Handy in die 152 x 57 x 16 mm große und 190 g schwere Brennstoffzelle eingelegt. Serienreif wird die 700 mA und 5,4 V liefernde Zelle jedoch frühestens im 2. Quartal 2005 sein [75].

Ein weiteres Verfahren, das unter anderem von den Herstellern Nokia, Sony und Motorola untersucht wurde, umgeht die gerätetypenspezifischen Demontageanforderungen weitgehend, indem so genannte Formgedächtnismetalle oder -kunststoffe (Shape Memory Metals/Polymers) verwendet werden. Bauteile aus solchen Materialien verändern abhängig von der Temperatur ihre Form, die als sich selbst lösende Verbindungselemente eingesetzt werden können. Metallklammern die sich öffnen, Kunststoffschrauben deren Gewinde verschwindet oder Clipverbindungen die durch einen Formgedächtnisdraht gelöst werden, sind hier denkbar. Die Temperatur des Lösevorgangs kann durch die Wahl und Modifikation des Shape Memory Materials festgelegt werden. Hier ist zu beachten, dass diese Temperatur hoch genug sein muss, um ein ungewolltes Öffnen z. B. durch Sonneneinstrahlung zu vermeiden. Sie muss aber stets unter dem Schmelzpunkt der verarbeiteten Kunststoffe liegen, da sich eine temperaturbedingte Verformung der Bauteile ungünstig auf die Demontage, die Verwertung und ggf. Wie-

der Verwendung von Komponenten auswirkt. Die Temperaturwahl wird durch die physikalischen Eigenschaften der Formgedächtnismaterialien in diesem Bereich nicht eingeschränkt, z. B. kann die Umwandlungstemperatur von Nickel-Titan-Legierungen im Bereich von -150 bis $+150^{\circ}\text{C}$ liegen [31].

Beim Demontagevorgang muss das Gerät lediglich auf die Aktivierungstemperatur des Formgedächtnismaterials erwärmt werden. Die entsprechenden Verbindungen öffnen sich, das Gerät trennt sich in seine Bauteile auf. Der Einsatz von Lasern als lokale Wärmequelle ermöglicht die punktgenaue und schnelle Erwärmung, so dass sehr schnelle Demontagezeiten erreicht werden können [107].

Der Einsatz verschiedener Formgedächtnismaterialien in einem Gerät ermöglicht darüber hinaus eine stufenweise Demontage, die z. B. im ersten Erwärmungsschritt den Akku, im zweiten Schritt Gehäuseteile und Leiterplatte, etc. löst, so dass eine einfache Automatisierung dieses Verwertungsprozesses umsetzbar ist.

Der Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe wurde ebenfalls seitens des Mobiltelefonherstellers Motorola in Zusammenarbeit mit der Universität Warwick, Großbritannien, untersucht [70]. Die Verwendung von Polyvinylalkohol als Gehäusekunststoff ermöglicht das Kompostieren dieses Materials und macht somit eine absolut umweltfreundliche Entsorgung möglich. Aus gesetzlicher Sicht zählt die Kompostierung jedoch zu den Verwertungs- und nicht zu den Recyclingverfahren, so dass keine Vorteile bei der Erfüllung der durch das ElektroG gegebenen Quoten entstehen. Darüber hinaus bleibt das Öffnen der Gehäusehälften, einer der Hauptansatzpunkte für die Optimierung des Demontageprozesses, auch bei Verwendung biologisch abbaubarer Kunststoffe weiterhin bestehen.

6.4 Einfluss des Nutzerverhaltens auf die ökologische Gesamtbilanz

Der Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz liegt nicht allein beim Hersteller. Auch, wenn, wie in Kapitel 2.5.2 genannt, rund 80% des Energieverbrauchs bereits in der Konstruktionsphase vorbestimmt werden [112], hat der Verbraucher einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Product-Life-Cycle.

Die in der Einführung genannten mobilen Kommunikations- und Datenverarbeitungsgeräte zeichnen sich nicht nur durch ihre Schnelllebigkeit aus, sondern ebenfalls durch die Ausstattung mit Akkumulatoren zur Energieversorgung. Daher ist der Nutzer gefordert, die Geräte regelmäßig einem Ladevorgang zu unterziehen. Die Problematik, dass Ladegeräte für Akkumulatoren zu den stillen Verbrauchern gehören, wurde bereits in Kapitel 4.2.1 ausführlich dargestellt. Dies trifft ebenfalls auf Mobiltelefone zu. Die im Wesentlichen vom Nutzungsgrad und Akkutyp abhängige Stand-by-Zeit beträgt durchschnittlich zwischen 3 und 5 Tagen. Dies bedeutet, dass das Telefon ca. 100 mal pro Jahr geladen werden muss. Die Verwendung von Tischladestationen lässt das Wiederaufladen sehr komfortabel werden, da das Mobiltelefon, der PDA etc. einfach in die Ladeschale einge-

legt und nach Vollendung des Ladevorgangs dieser entnommen werden. Dies führt dazu, dass die Station dauerhaft an das elektrische Netz angeschlossen ist. Ähnlich verhält es sich mit Ladekabeln, die auch aufgrund des häufigen Einsatzes dazu verleiten, nach der Nutzung nicht vom Netz gezogen zu werden. Bezogen auf den einzelnen Nutzer sind die Verluste sicherlich marginal, unter Berücksichtigung von 379 Millionen Handynutzer EU-weit spielen diese Faktoren jedoch eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Eine intelligente Laderegulierung, die sich automatisch abschaltet, sobald das Gerät der Ladeschale oder dem Ladekabel entnommen wird, könnte Abhilfe beim Energieverbrauch durch stille Verbraucher schaffen. Wesentlich ist allerdings die Aufklärung des Kunden, so dass dieser eigenverantwortlich handeln und einen Beitrag zum ganzheitlichen Umweltschutz leisten kann.

Die Notwendigkeit der Kommunikation mit dem Kunden zeigte sich auch bei einer durchgeführten Umfrage bei Handybesitzern hinsichtlich des Anschaffungs- und Entsorgungsverhaltens. Dabei wurde deren Einstellung zum bisherigen und zukünftigen Kaufverhalten, dem Umgang mit Altgeräten und dem Wissen über Möglichkeiten zur umweltfreundlichen Entsorgung analysiert. Befragt wurden insgesamt 100 Kunden, welche die durchschnittliche Nutzerstruktur (Bild 67) widerspiegeln.

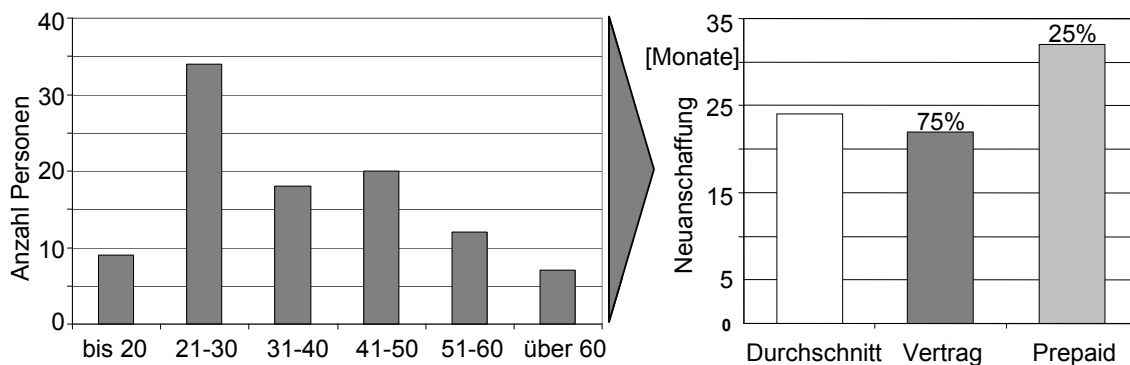


Bild 67: Altersstruktur der Befragten und Verteilung des Neuanschaffungszeitraums bei 75% Vertrags- und 25% Prepaidkunden

Von den Befragten waren rund 75% Vertragskunden und lediglich 25% Prepaidkunden. Dementsprechend unterschiedlich verhält sich auch das Anschaffungsverhalten für Neugeräte: Vertragskunden haben bereits relativ frühzeitig die Möglichkeit, sich ein Neugerät im Rahmen einer Vertragsverlängerung, die nach zwei Jahren erfolgt, anzuschaffen. Daher beträgt der durchschnittliche Zyklus für den Kauf eines neuen Handys 22 Monate. Prepaidkunden tauschen laut der Umfrage Ihr Telefon durchschnittlich nach 32 Monaten aus. Da diese prozentual jedoch geringer vertreten sind, wird im Allgemeinen das Handy nach 2 Jahren durch ein neues ersetzt.

Nachdem die Altgeräte nach 2 Jahren in den meisten Fällen noch voll funktionstauglich sind, werden sie oftmals als „Ersatzgerät“ vom Kunden behalten. Dies spiegelt sich mit einem Anteil von 53% auch in der Umfrage wider, wie Bild 68 deutlich zu entnehmen ist. Besitzer mehrerer Handys tendieren dazu, unterschiedlich mit ihren Geräten zu verfahren.

ren, d.h., zum Teil verkaufen, behalten oder entsorgen sie ihre Altgeräte, so dass insgesamt eine Quote von über 100% entsteht.

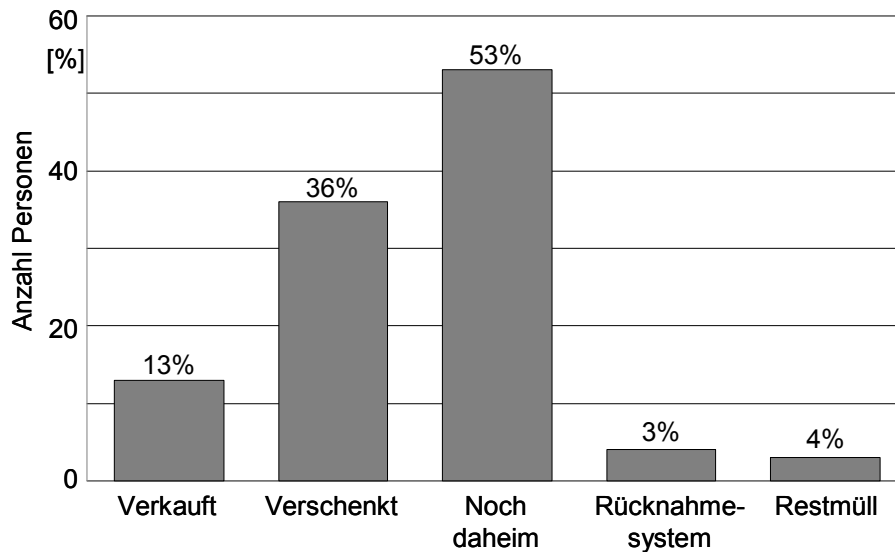


Bild 68: Strategien zur Entsorgung von Altgeräten

Das in Bild 68 angesprochene Rücknahmesystem bezieht sich auf Aktivitäten der Firma Greener Solutions mit Sitz in München [81]. Begonnen wurde mit der Sammlung von Mobiltelefonen in Großbritannien, wo Handys in Kaufhäusern, ähnlich wie Altbatterien in Deutschland, gesammelt werden. In Deutschland werden heutzutage flächendeckend Tüten von den Providern angeboten, so dass das Altgerät unfrei an Greener Solutions gesandt werden kann. Für jedes an Greener Solutions gesendete Gerät spendet die Firma einen Betrag von 5,- Euro an einen karitativen Zweck. Abhängig vom Zustand des Handys und dem erzielbaren Erlös, der sich aus dem Alter, der Marke und der Funktionsfähigkeit berechnet, wird dieses entweder direkt an einen Materialverwerter vertrieben oder aufgearbeitet. Derzeit werden ca. 70% der Mobiltelefone verwertet und rund 30% recycelt. Ähnliche Systeme werden in Amerika durch die Firma CAP Inc. [80] und Recellular Inc. [82] betrieben, die sich ebenfalls mit der Rücknahme und dem Refurbishing gebrauchter Mobiltelefone auseinandersetzen.

Die Umfrage zeigt mit lediglich 3% eine geringe Beteiligung der Befragten an dem angebotenen Rücknahmesystem. Nachdem gleichzeitig jedoch 23% der Befragten angaben, das Rücknahmesystem zu kennen, erstaunt die geringe Beteiligung. Mehr als 60% der Beteiligten zeigten sich interessiert an dem bislang für sie unbekanntem System und gaben an, gegen einen geringen Anreiz das Rücknahmesystem zu nutzen, wenn es praktikabel wäre und sie beim Kauf eines Neugerätes daran erinnert würden.

Auch hier ist deutlich festzustellen, dass ein vorhandenes Informationsdefizit den Kunden daran hindert, einen Beitrag zu einem nachhaltig gestalteten Prozess entlang des gesamten Produktlebenszyklus beizutragen. Die Bedeutung einer multidirektionalen, aktiven Kommunikation erweist sich wiederum als unerlässlich für eine ganzheitliche Optimierung des Product-Life-Cycles.

6.5 Zusammenfassung

Der Anteil schnelllebiger Massenprodukte mit kurzen Innovationszyklen nimmt in der Bevölkerung einen beständig wachsenden Anteil ein. Dementsprechend sind bei dieser Gerätekategorie mit Einführung des ElektroG relativ hohe Rücklaufquoten funktionsfähiger Altgeräte zu erwarten, da, wie Bild 68 beispielhaft für Mobiltelefone zeigt, durchschnittlich rund 93% der Handyaltgeräte noch in Haushalten vorzufinden sind.

Die seitens der Richtlinie gestellten Anforderungen an diese Produkte sind, kohärent zu den Anforderungen an eine Integrierte Produktpolitik, sehr hoch. Sollte die stringente Anforderung an die separate Entnahme der elektronischen Baugruppen aus Mobiltelefonen umgesetzt werden, stehen die Hersteller künftig vor der Herausforderung, nicht nur die ständig steigenden Anforderungen seitens der Nutzer in Mobiltelefone zu integrieren, sondern die Geräte ebenfalls demontagegerecht und somit ganzheitlich zu gestalten. Der Aufwand zur sortenreinen Trennung der bei der Separation der Baugruppe entstehenden Materialfraktionen muss über eine Kosten-/Nutzen-Relation abgewogen werden. Nur ausreichend hohe Rücklaufquoten rechtfertigen die bei einer manuellen oder automatisierten Demontage anfallenden Zusatzkosten. Zu diesem Zweck ist einerseits die Rückführlogistik zu optimieren, um den Markt funktionsfähiger, aufgearbeiteter Geräte oder Ersatzteile ausbauen zu können, andererseits muss der Kunde bereit sein, seine Altgeräte zurück zu geben. Dem offensichtlich noch vorhandenen Informationsdefizit müssen somit seitens des Providers und des Herstellers in Zusammenarbeit entgegen gewirkt werden.

7 Selektive Demontage von Bauelementen zu ReUse-Zwecken

Entwicklungstrends in der Elektronikproduktion führen zu immer komplexeren Strukturen auf immer geringeren Flächen. Schaltungsträger in Multi-Layer Ausführung, verbunden mit miniaturisierten Bauelementen, ermöglichen hochintegrierte Schaltungen auf kleinstem Raum.

Weiterhin führen technologisch anspruchsvolle Fertigungsprozesse dazu, dass bisweilen Schaltungen Fehlfunktionen aufweisen und somit einzelne Platinen von der Qualitätskontrolle erfasst und ausgemustert werden. Diesen Fehlern kann durch die Nacharbeit hochwertiger Baugruppen Rechnung getragen werden.

Motiviert durch den bereits in Kapitel 6 aufgezeigten Trend zu verkürzten Innovationszyklen moderner, hochtechnologischer Kommunikationsgeräte wie Computern, Laptops, PDAs oder Mobiltelefonen, entsteht im Sinne einer Integrierten Produktpolitik die Frage nach der Weiterverwendung dieser Produkte, wenn sie von ihrem Erstbesitzer trotz vollständiger Funktionsfähigkeit nicht mehr verwendet, sondern aufgrund innovativer, technologischer Neuerungen durch Neugeräte ersetzt werden. Diese Geräte werden entweder auf dem Sekundärmarkt verkauft oder – nach meist mehrjähriger Zwischenlagerung – als Elektroaltgeräte entsorgt.

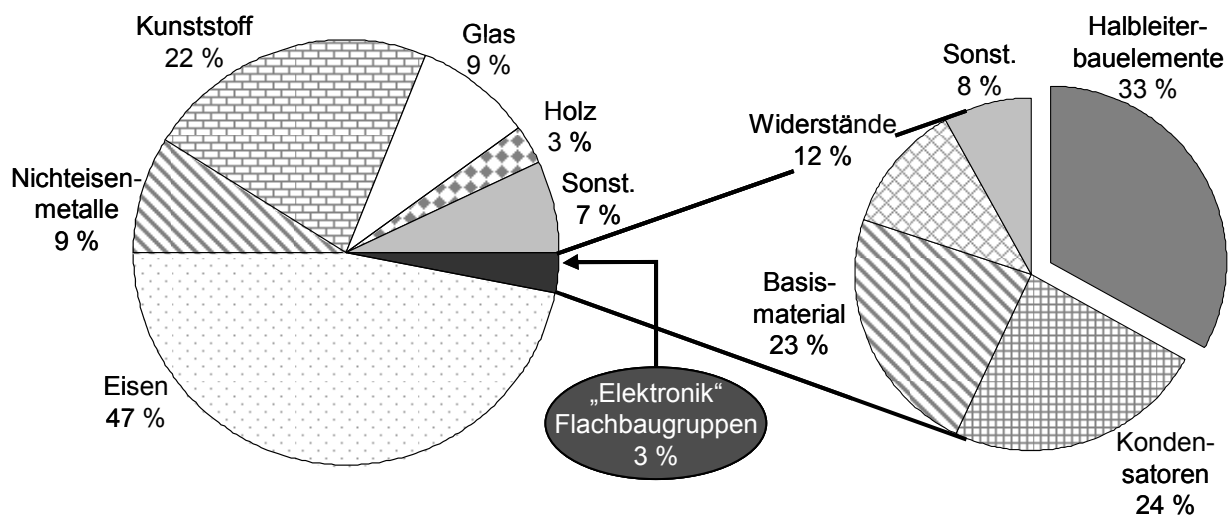


Bild 69: Stoffliche Zusammensetzung des Elektronikschrotts (li) mit Fokus auf die durchschnittliche Zusammensetzung bestückter Leiterplatten in Gew.-% (re) [96]

Wie das linke Tortendiagramm in Bild 69 zeigt, setzt sich Elektronikschrott im Wesentlichen aus Eisen (47%), Kunststoff (22%) und Nichteisenmetallen (9%) zusammen. Die Elektronik hat mit lediglich 3% nur einen geringen Umfang am gesamten Elektroaltgeräteanteil. Innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette stellt sie jedoch oftmals einen in höchstem Maße investitionsintensiven Bestandteil der Geräte dar. Im Sinne der Integrierten Produktpolitik stellt sich daher die Frage, in wie weit Möglichkeiten existieren, funktionierenden Elektronikkomponenten eine längere Nutzungszeit zu geben, um da-

durch – entsprechend nachhaltiger Prinzipien – sowohl Material als auch Energie und Kosten zu sparen.

Zur Klassifizierung der Prozesse muss zwischen dem Repair bzw. der Nacharbeit gesamter Baugruppen und dem ReUse einzelner, elektronischer Bauelemente unterschieden werden. Die Nacharbeit beschreibt den Vorgang, der im Bereich der Fertigung durchgeführt wird, um Baugruppen, die aufgrund vereinzelt defekter Bauelemente nicht den Anforderungen entsprechen, zu reparieren, bevor sie in den Nutzungsprozess integriert werden. Dabei werden defekte Bauelemente zunächst detektiert und anschließend in einem aufwändigen Prozess von der Baugruppe entfernt, bevor sie durch ein anderes Bauelement ersetzt werden. Weiterhin werden sehr kostenintensive, bereits in der Nutzung befindliche Baugruppen der Nacharbeit unterzogen, wenn durch Austausch einzelner Bauelemente die Funktionstüchtigkeit wieder hergestellt werden kann.

Die Nacharbeit in der Oberflächentechnologie (SMT) gliedert sich in sechs aufeinander folgende Stufen [17]:

- Entlöten der Bauteile
- Vorbereiten der Anschlussflächen auf der Leiterplatte
- Lotpastenauftrag
- Platzieren des Bauelements
- Einlöten zur Herstellung der elektrischen und mechanischen Verbindung
- Funktionstest der Baugruppe

Hierbei gilt es in erster Linie, die Baugruppe und die das defekte Bauelement umgebenden Bauteile zu schonen, da der Fokus auf der Wiederverwendung der Baugruppe liegt.

Im Vergleich hierzu zielt der ReUse darauf ab, das wieder zu verwendende Bauelement zu schonen, wobei die Baugruppe und weitere Bauelemente irrelevant sind.

Arbeiten auf dem Gebiet des ReUse elektronischer Bauelemente wurden bereits durch das Berlin Center for Advanced Packaging (BeCAP) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) durchgeführt [106]. Im Rahmen eines Projektes wurde eine Anlage zum automatisierten Entlöten von Small Outline-Bauelementen (SO) und Quad Flat Packackages (QFP) entwickelt. Der Gesamtprozess gliedert sich zunächst in eine optische Inspektion der SMDs, den Entlötvorgang und eine abschließende Qualitätskontrolle.

Die optische Inspektion dient einerseits der digitalen Identifikation der Bauelemente, die für den ReUse in Frage kommen, und andererseits der Überprüfung hinsichtlich einer Vielzahl normativer Vorgaben bezüglich Dimension, Position, Toleranzen, etc. Das Entlöten selbst findet unter Dampfphase statt. In der abschließenden Qualitätskontrolle wird aufgrund optischer Fehlstellen auf die Funktion des Bauelements geschlossen. Analysen erfolgen beispielsweise hinsichtlich der Bildung von Lotbrücken etc., um dadurch mögliche Kontaktierungsdefekte aufzuzeigen.

Der seitens des BeCAP und Fraunhofer IZM durchgeführte Prozess beschränkt sich allerdings auf SMDs, die über seitlich des Bauelements angebrachte Anschlusspins (J-Leads, Gull-Wings, Flats) verfügen.

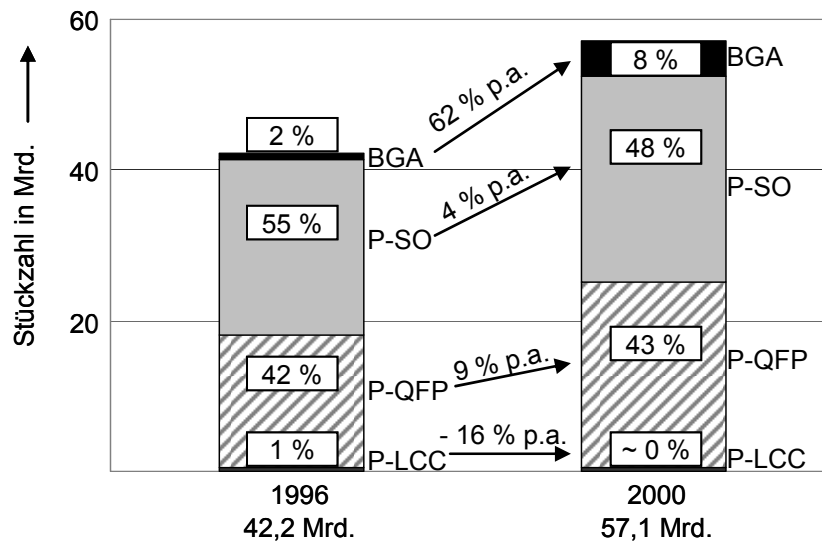


Bild 70: Gehäusetrends der IC-Produktion weltweit für SMT [94]

Die in Bild 70 dargestellte Entwicklung der weltweiten Gehäuseproduktion zeigt, dass Ball-Grid-Arrays (BGA) ein starkes Wachstumspotenzial aufweisen. Zuwachsraten von 62% pro Jahr verdeutlichen die Bedeutung dieser Gehäuseform, die sich durch ihren geringeren Platzbedarf im Vergleich zu anderen SMT Bauelementen auszeichnen, die ihre Anschlüsse als Gull-Wings, J-Leads oder Flats ausgeführt haben.

Aufgrund der wachsenden Bedeutung von BGAs und motiviert durch die Vorgabe der EU-Richtlinie WEEE, zukünftig die Leiterplatte aus Mobiltelefonen zu entfernen, resultierte die Frage nach Möglichkeiten zum ReUse von Ball-Grid-Arrays. Deren Handhabung wird insbesondere dadurch erschwert, dass sich deren Kontakte in Form von Balls unterhalb des Bauelements befinden. Zur Klassifizierung von Prozessalternativen werden zunächst einige Charakteristika von BGAs dargestellt.

7.1 Charakteristika von Ball Grid Arrays

Wesentliches Merkmal von BGAs ist, dass sie ihre Kontakte in Form einzelner Balls auf der Unterseite des Gehäuses aufweisen. Dabei kann, je nach Art des BGAs, sowohl die gesamte Unterfläche mit Kontaktierungen versehen sein oder aber nur Teilbereiche. Abhängig vom inneren Aufbau der Bauelemente ist die Anzahl, Dichte und Struktur der Balls unterschiedlich. Wie in Bild 71 dargestellt, sind Bautypen von BGAs in Die-Up und Die-Down zu unterscheiden.

Die-Up BGAs, welche die weitaus häufiger vorkommende Bauform darstellen, tragen den Chip oberhalb einer Substratschicht. Die-Down BGAs werden insbesondere für Hochleistungsanwendungen eingesetzt. Aufgrund der höheren, im Chip entstehenden

Temperaturen, ist es notwendig, Kühlkörper in den BGA zu integrieren. Dies erfordert die Befestigung des Chips unterhalb des Kühlkörpers, so dass Teilbereiche der Unterseite nicht für den Anschluss von Balls zur Verfügung stehen.

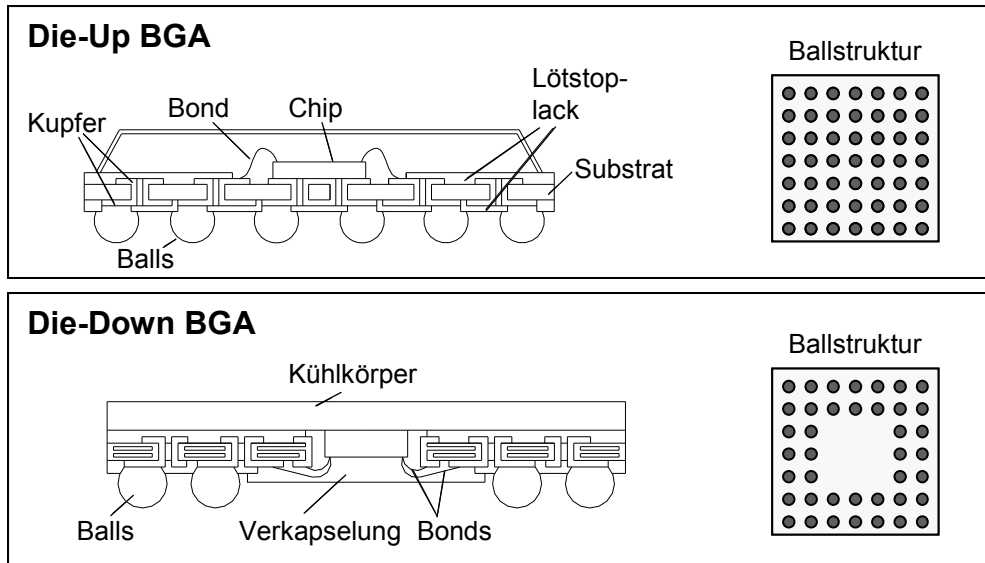


Bild 71: Beispielhafte Darstellungen für Die-Up und Die-Down BGAs

Die Verbindung des Chips mit dem Substrat erfolgt über Drahtkontaktierungen, sogenannte „Wire-Bonds“. Diese werden primär als Goldkontakte ausgeführt und haben Durchmesser von ca. 18 µm bis 30 µm. Alternative Kontaktierungsmaterialien sind Aluminium und Kupfer. Jedoch weist Gold in Summe wesentlich bessere Eigenschaften hinsichtlich Ausdehnung, Zugfestigkeit und Längenänderung auf als alternative Materialien [6], so dass es bevorzugt Einsatz findet.

Die Verkap selung besteht aus dielektrischen Materialien. Aufgrund der Materialeigenschaften findet bevorzugt Epoxidharz Verwendung. Es dient primär als Schutz des Chips gegen Feuchtigkeit, gleichzeitig muss es die Wärme, die vom Chip im Betrieb erzeugt wird, ableiten können. Dabei dürfen die elektrischen Eigenschaften und die dauerhafte Zuverlässigkeit des BGAs nicht beeinflusst werden.

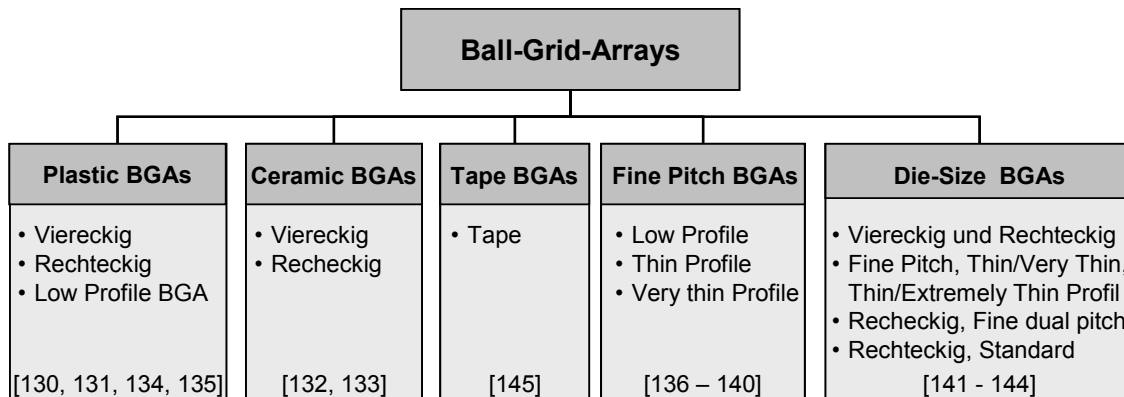


Bild 72: Unterteilung existierender BGA-Sorten nach JEDEC-Standard

Definierte Standards legen Richtlinien hinsichtlich Größen, Anschlussarrays, Lotkugelgrößen etc. fest. Hierbei sind insbesondere die seitens des Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC) vorgegebenen Standards zu nennen. Einen Überblick über die Einteilung existierender BGAs nach JEDEC-Standards gibt Bild 72.

Die für den Aufbau von BGAs relevanten standardisierten Abmaße werden in Bild 73 dargestellt. Dabei stellt die JEDEC exakte Anforderungen an die Fertigung von BGAs und die damit verbundene Einhaltung von Fertigungstoleranzen.

Für den ReUse sind zunächst die Abmessungen des BGAs verbunden mit der Größe und Anzahl der Balls relevant. Diese wirken sich primär auf den standardisierten Entlötprozess aus, da der Entlötkopf individuell auf die Abmaße des BGAs angepasst werden muss. Weiterhin ist der Temperaturverlauf des Prozesses so auszuführen, dass das Bauelement möglichst wenig thermische Belastung erfährt und zügig von der Baugruppe abgehoben werden kann. Abhängig von der Bauform des BGAs wirkt sich die Struktur der Ballgeometrie auf den Ablösevorgang aus.

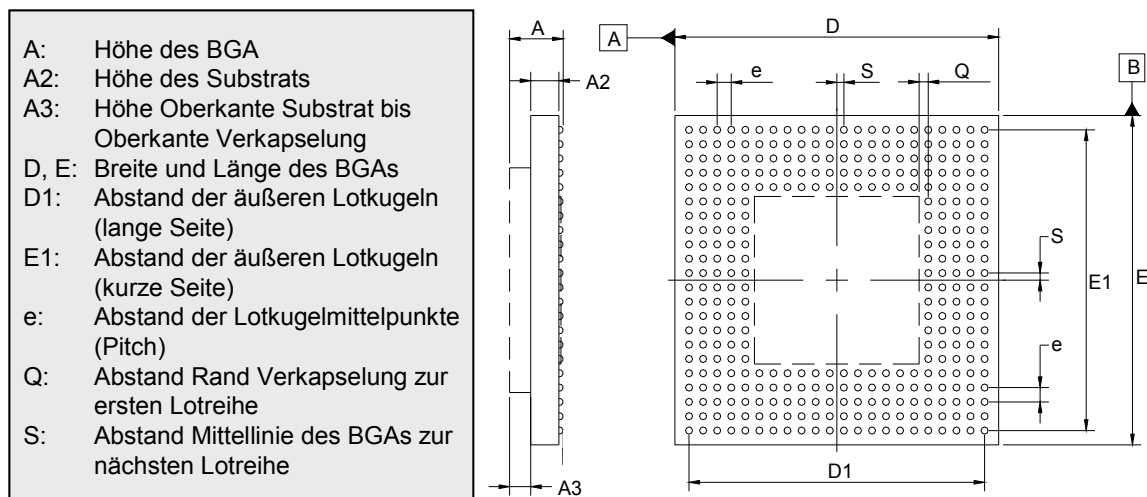


Bild 73: Standardisierte Abmaße von BGAs

Neben fertigungstechnischen Anforderungen an die Herstellung von Ball-Grid-Arrays sind diverse Kriterien bei der Handhabung der Bauelemente zu beachten, die ebenfalls für den ReUse relevant sind.

Zu Wahrung der Gehäuseintegrität stellt die Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Bauelemente, insbesondere für die Verarbeitung von Plastic-Ball-Grid-Arrays, einen wesentlichen Faktor dar. Da die Vergussmasse der PGBAs aus dielektrischen Materialien besteht, diese jedoch das Bauelement nicht hermetisch abschließen, weisen diese BGAs die bereits erwähnte Tendenz auf, hygroskopisch Feuchtigkeit aus der Atmosphäre aufzunehmen. Diese diffundiert in das Bauelement, schlägt sich an den Grenzflächen der beteiligten Materialien nieder, wodurch die Haftung geschwächt wird. Werden die Bauelemente ohne Vorbehandlung den hohen Temperaturen des Lötprozesses ausgesetzt, besteht insbesondere beim Reflowlöten die Gefahr, dass aufgrund des unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien und des auftretenden Dampfdrucks der vorhandenen Feuchtigkeit Materialspannungen auftreten, die zu Delaminationen von

Grenzflächen führen. Darüber hinaus können neben Bonddrahtabscherungen, Wire Einschürungen, Bond- oder Chip-Abhebungen, Dünnschichtbeschädigungen oder Kratererscheinungen im Bereich des Bonds auftreten, die zu latenten Ausfällen führen. Dieser so genannte „Popcorn-Effekt“ kann nur nach dem Fertigungs- oder Reparaturprozess diagnostiziert werden, da er innerhalb des BGAs auftritt. Im Fall externer Risse, die ebenfalls visuell erkennbar sind, bestehen Möglichkeiten zur Diagnose mittels Verwendung feiner, flexibler Endoskope [40], so dass Inspektionen bis zu einem Pitch von 0,8 mm durchgeführt werden können.

Feuchtekategorie	Feuchtesimulation		Verarbeitungszeit (Floor Life)	
	Zeit	Bedingungen	Zeit	Bedingungen
MSL 1	7 Tage	85 °C / 85% RH	Unbegrenzt	≤ 30 °C / 85% RH
MSL 2	7 Tage	85 °C / 60% RH	1 Jahr	≤ 30 °C / 60% RH
MSL 2a	29 Tage	30 °C / 60% RH	4 Wochen	≤ 30 °C / 60% RH
MSL 3	8 Tage	30 °C / 60% RH	1 Woche	≤ 30 °C / 60% RH
MSL 4	4 Tage	30 °C / 60% RH	3 Tage	≤ 30 °C / 60% RH
MSL 5	3 Tage	30 °C / 60% RH	2 Tage	≤ 30 °C / 60% RH
MSL 5a	2 Tage	30 °C / 60% RH	1 Tag	≤ 30 °C / 60% RH

Tabelle 14: Beispiele der Klassifizierung von Feuchteempfindlichkeit [128]

Insbesondere SMD Bauelemente mit geringem Volumen sind vom Popcorn-Effekt betroffen, da diese während des Reflow-Prozesses höhere Temperaturen erreichen als vergleichbar größere Bauelemente. Die Qualifizierung der SMDs – insbesondere der BGAs – erfolgt entsprechend der Vorgaben des JEDEC-Standards J-STD-020C [128]. Die für die Bestimmung der Bauteilzuverlässigkeit relevante Temperatur wird an der Oberseite der Bauelemente gemessen und fachlich als „Peak Reflow Temperature“ (PRT) bezeichnet [114]. Sie dient als Bezugsgröße zur Festlegung der Feuchteempfindlichkeit (MSL = Moisture Sensitivity Level), die Aussagen darüber ermöglicht, wie lange Bauelemente nach Öffnen einer vorhandenen Trockenverpackung vor einem Lötvorgang an der Atmosphäre gelagert werden können (Floor Life). Dabei werden Normalbedingungen von 30 °C und <60% relativer Luftfeuchtigkeit (RH) zugrunde gelegt (Tabelle 14).

Sollten Bauelemente länger als die vom Hersteller angegebene Floor-Life-Time der Atmosphäre ausgesetzt sein, beschreibt der JEDEC-Standard J-STD-033A [129] Methoden zum Trockenbacken von Bauelementen oder Baugruppen, um sie weiterverarbeiten oder reparieren zu können.

Entsprechend der in Tabelle 15 genannten Konditionen für das Trockenbacken von hygroskopischen Bauelementen kann die Floor-Life-Time zurück gesetzt werden, bevor die Bauelemente weiterverarbeitet oder in einer feuchtigkeitsabweisenden Verpackung ge-

lagert werden. Beim Trockenbacken ist zu beachten, dass der Prozess die Ausbildung intermetallischer Phasen bzw. die Oxidation der Kontaktflächen beschleunigen kann. Daher darf das Trockenbacken bei einer Temperatur von 125 °C die Dauer von 48 Stunden nicht überschreiten.

Gehäusedicke	Feuchteklasse	Trockenbacken	
		125 °C	150 °C
≤ 1,4 mm	2a	8 Stunden	4 Stunden
	3	16 Stunden	8 Stunden
	4	21 Stunden	10 Stunden
	5	24 Stunden	12 Stunden
	5a	28 Stunden	14 Stunden
≤ 2,0 mm	2a	23 Stunden	11 Stunden
	3	43 Stunden	21 Stunden
	4	48 Stunden	24 Stunden
	5	48 Stunden	24 Stunden
	5a	48 Stunden	24 Stunden
≤ 4,5 mm	2a	48 Stunden	24 Stunden
	3		
	4		
	5		
	5a		

Tabelle 15: Konditionen für das Trockenbacken von Bauelementen [129]

Die Handhabung elektronischer Halbleiterbauelemente, insbesondere der BGAs, hat unter strikten Anforderungen an den Schutz gegen elektrostatische Entladung (ESD) zu erfolgen. Aus der wachsenden Komplexität der Bauelemente bei kleineren Strukturen resultiert eine zunehmende Empfindlichkeit gegenüber ESD-Impulsen, d. h. Spannungs- und Stromspitzen, die durch den spontanen Ausgleich von elektrischen Ladungen zwischen zwei unterschiedlich geladenen Materialien hervorgerufen werden.

Rund 10% der Ausfälle von Halbleiterbauelementen werden auf elektrostatisch verursachte Defekte zurückgeführt [27]. Diese können zu einem Totalausfall oder zu einer Beschädigung des Bauelements führen, so dass Langzeitschäden erst nach einiger Zeit durch frühzeitigen Ausfall erkannt werden. Daher ist der Schutz vor elektrostatischen Entladungen in allen Bereichen der Mikroelektronik, d. h. auch für das Rework und den ReUse, unverzichtbar.

Neben diesen Grundanforderungen an die Handhabung elektronischer Bauelemente sind für die Automatisierung des ReUse-Prozesses die seitens des Herstellers angegebenen, individuellen Spezifikationen zu beachten. Hierzu gehören Vorgaben zum Lötprozess, wie die Einhaltung des individuellen Lötprofils, welches sowohl die Peak-Temperatur als auch die maximale Haltezeit bei vorgegebenen Temperaturgrenzwerten vorschreibt. Weiterhin existieren Anforderungen an die Prozessführung, die einerseits

den Temperaturgradienten während der Heiz- und Kühlphase des Lötprozesses angeben, als auch Aussagen über die zu verwendenden Lotlegierungen.

Die Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte garantiert die schadenfreie Behandlung des Bauelements. Insbesondere für Rework- oder ReUse-Zwecke ist es angebracht, im Bereich oder unterhalb der vorgegebenen Toleranzen zu arbeiten, um für den sich an den Prozess anschließenden Lebenszyklus des Produktes eine einwandfreie Funktion der Bauelemente oder der Baugruppe gewährleisten zu können.

7.2 Standardverfahren zum ReUse von BGAs

Nachdem Ball-Grid-Arrays ihre Kontakte unterhalb des Bauelementes haben, ist es technologisch nicht möglich, im Fall fehlerhaft durchgeführter Kontaktierungen, Lotanschlüsse vereinzelt nachzuarbeiten. Zum Rework funktionsunfähiger Baugruppen müssen somit der gesamte BGA entfernt, Anschlusspads vorbereitet und ein neues Bauelement durch einen weiteren Lötprozess auf die Baugruppe aufgebracht werden.

Aus ökonomischer Sicht erscheint es zunächst nicht sinnvoll, den entfernten BGA wieder zu verwenden, da dies ein Überarbeiten der Balls erfordert und die Herstellkosten neuer BGAs in den meisten Fällen eher gering einzustufen sind. Es gibt jedoch Ausführungen von Ball-Grid-Arrays welche sehr komplexe Strukturen aufweisen und dementsprechend kostenintensiv in der Fertigung sind. Aufgrund dessen haben sich in der Industrie Verfahren zum ReUse von Ball-Grid-Arrays etabliert. Sie zeichnen sich primär dadurch aus, dass sie manuell durchgeführt werden, wobei die Prozessparameter für jedes Bauelement individuell auf die Spezifikationen des Herstellers angepasst werden müssen. Aufgrund der hohen Vielfalt unterschiedlicher BGAs, sowohl in Form als auch in Größe und Anzahl der Balls, gestaltet sich das ReUse als kostenintensiver und langwieriger Prozess mit geringem Durchsatz.

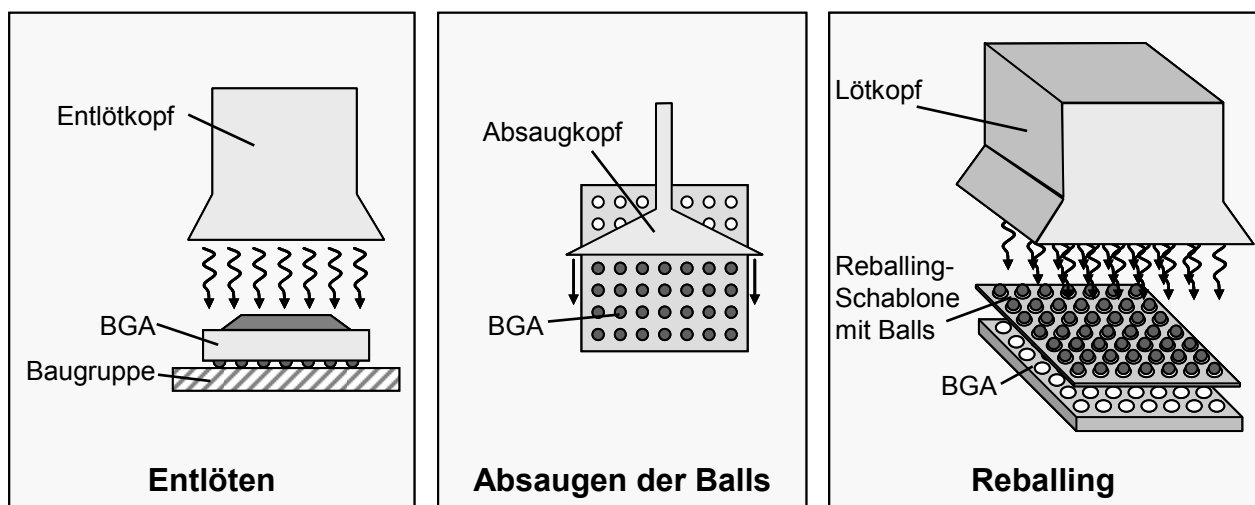


Bild 74: Schematische Darstellung des Prozessablaufs beim standardisierten Reballing

Bild 74 gibt einen Überblick über die für den ReUse von Ball-Grid-Arrays notwendigen Prozessschritte. Zunächst ist das interessierende BGA von der Baugruppe zu lösen. Dies erfolgt durch einen lokalen Entlötprozess mit einem speziell auf den BGA angepassten Lötkopf. Daran anschließend sind die Balls vom BGA zu entfernen. Dies erfolgt mittels eines Absauggriffels, der ebenfalls unter Einbringung lokaler Wärme in Form von Heißluft die auf dem BGA verbliebenen Lotdepots zum Schmelzen bringt und über ein Vakuumsystem absaugt. Abschließend wird nach Aufbringen von Flussmittel der Reballingprozess durchgeführt.

7.2.1 Entlöten von BGAs

Im Folgenden wird der Prozess zum Entlöten von BGAs mittels eines in der Industrie standardmäßig verwendeten Entlötprozesses vorgestellt. Dabei standen elektronische Baugruppen alter Mobiltelefone zur Verfügung, die, nach Einführung der in Deutschland umzusetzenden Richtlinie ElektroG, künftig aus diesen zu entfernen sind. Nachdem, wie bereits in Kapitel 6 dargestellt, steigende Rücklaufquoten von Mobiltelefonen zu erwarten sind und diese über verhältnismäßig kurze Nutzungszyklen verfügen, stellen die auf den meist funktionsfähigen Baugruppen befindlichen Bauelemente interessante Objekte für den ReUse-Prozess dar.

Die seitens der Firma Motorola zur Verfügung gestellten Baugruppen enthalten einen BGA, dessen technische Daten anhand eines Produktdatenblattes bekannt waren. Es handelt sich um einen quadratischen, dem JEDEC-Standard folgenden, Fine-Pitch-BGA (FBGA) mit einer Kantenlänge von 13 mm und einem Pitch von 0,8 mm. Einen Überblick über weitere, für den Prozess relevante technische Merkmale, gibt Tabelle 16.

Standard	JEDEC
Kantenlänge	13 mm
Pitch	0,80 mm
Anzahl Lotkugelreihen	15
Lotlegierung	62Sn36Pb2Ag oder 63Sn37Pb
Maximale Höchsttemperatur	240 °C
Maximaler Temperaturgradient	6 K/s
Mechanische Belastungsmittel	500 g
HBM ESD	500 V

Tabelle 16: Charakteristika des untersuchten Motorola FBGA

Die Separation des BGAs erfolgte über ein selektives Entlötverfahren mittels eines handelsüblichen, für den Rework- und ReUse-Prozess einsetzbaren, Fineplacers der Firma Finetech (Bild 75). Die Baugruppe wurde in einer auf ihre Größe angepassten Schablone oberhalb der Unterheizung platziert und mittels einer Luftkissenpositioniereinheit und eines in das Gerät integrierten, optischen Spiegelsystems exakt ausgerichtet.

Das Aufschmelzen der Lotdepots erfolgt über eine Unter- und Oberheizung. Die Unterhitze entsteht mittels Konvektion ausgehend von einer Heizkassette, die auf die gesamte Baugruppe ausstrahlt.

Die Oberhitze wird über einen für den BGA passgenau aufgebauten Entlötkopf direkt auf das wieder zu verwendende Bauelement lokal eingebracht.

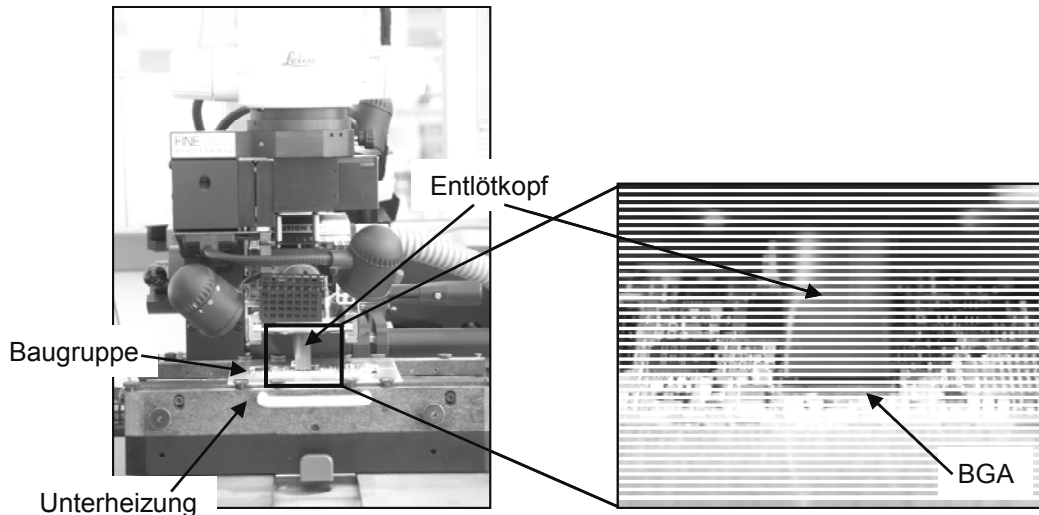


Bild 75: Versuchsaufbau zum Entlöten von BGAs mittels eines Fineplacers

Wenn die Lotdepots aufgeschmolzen sind, wird das BGA mittels eines Vakuumsystems, das in die Matrize integriert ist, von der Baugruppe abgehoben und steht für den weiteren ReUse-Prozess zur Verfügung.

Der wesentliche Unterschied in der Prozessführung zwischen Rework und ReUse liegt darin, dass während des Reworks die Baugruppe möglichst wenig thermischem Stress ausgesetzt ist. Nachdem beim ReUse der Fokus auf dem Bauelement liegt, das thermisch geschont werden muss, wird das Temperaturprofil des Fineplacers auf die entsprechenden Prozessanforderungen angepasst. Daher kann die Unterheizung wesentlich stärker zum Einsatz gebracht werden, als beim Rework. Dennoch ist eine Prozessüberwachung wesentlich, da die herstellerepezifischen Vorgaben zur Überhitzung des BGAs nicht überschritten werden dürfen.

Im Allgemeinen ist ein Entlötprofil in drei Zonen einteilbar:

- Aufwärmphase: Langsames Vorheizen der Baugruppe mit geringem Temperaturgradienten, um bauteilintern möglichst geringe, thermisch bedingte Verspannungen zu verursachen.
- Höchsttemperaturphase: Zügiges Erwärmen bis zum Erreichen der Maximaltemperatur. Diese wird gehalten, bis die Lotdepots aufgeschmolzen sind.

- Abkühlphase: Definiert zügiges Abkühlen des BGAs, wobei der maximale, vom Hersteller vorgegebene Temperaturgradient nicht überschritten werden darf.

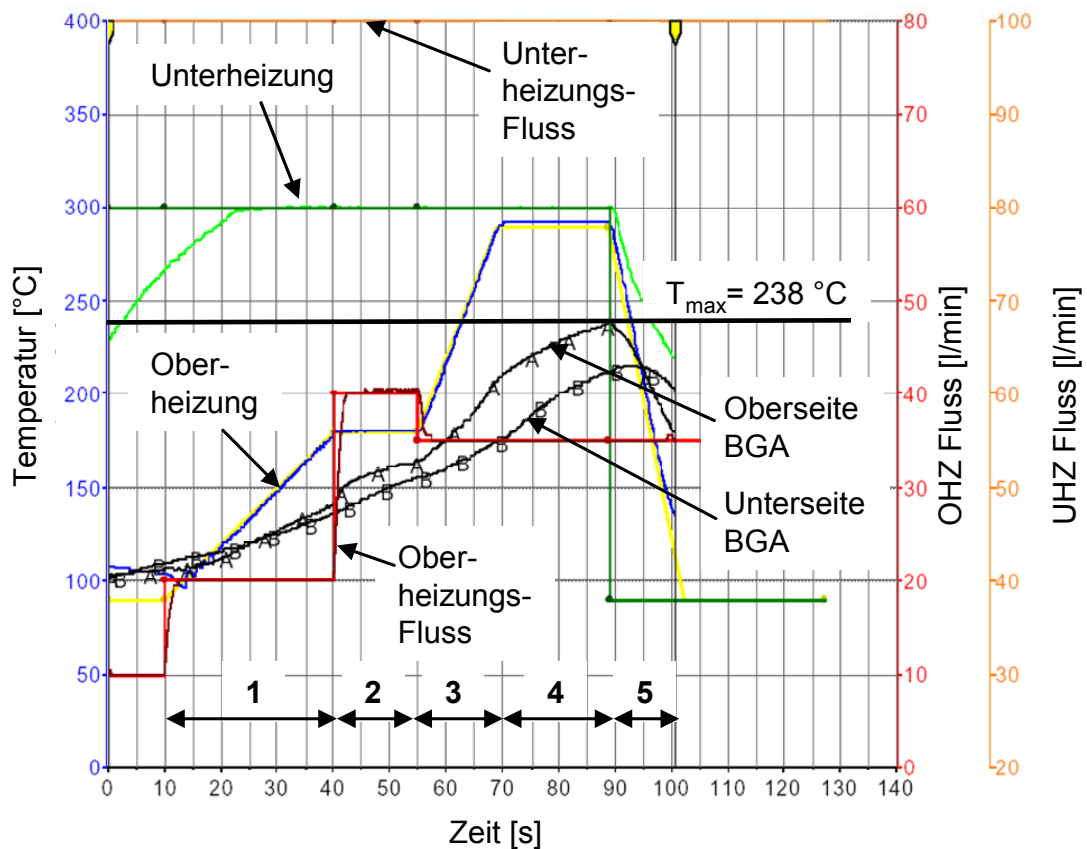


Bild 76: Entlötprofil für den BGA-ReUse

Das in Bild 76 dargestellte Entlötprofil gliedert sich in 5 Abschnitte. Abschnitt 1 und 2 beschreiben die Aufwärmphase. Zunächst wird der BGA langsam auf 180 °C vorgewärmt. In den sich anschließenden Phasen 3 und 4 wird die Temperatur zügig auf die Entlöttemperatur erhöht, die solange gehalten wird, bis die Lotdepots aufgeschmolzen sind und der BGA von der Baugruppe entfernt werden kann. Phase 5 stellt den Abkühlzeitraum dar.

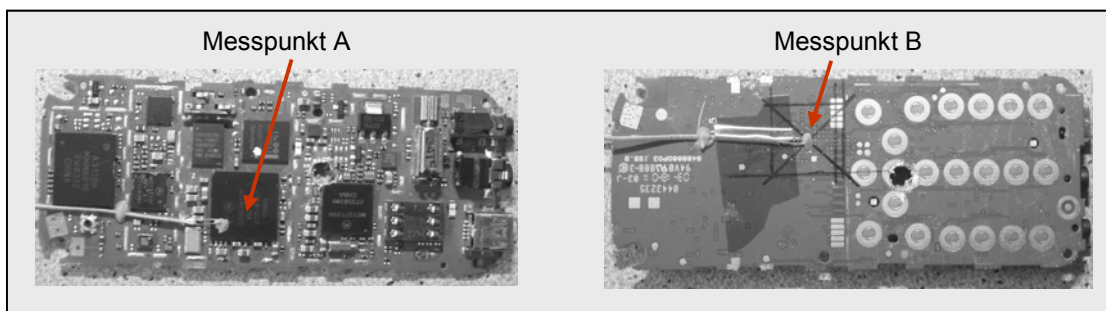


Bild 77: Positionierung der Sensoren an der Ober- (A) und Unterseite (B) des BGAs zur Verifikation des Temperaturprofils im Bauelement

Zur Verifikation der direkt am BGA auftretenden Temperaturen wurde, wie in Bild 77 dargestellt, eine Referenzbaugruppe mit Temperatursensoren versehen. Diese nehmen die unmittelbar an der Ober- (Messreihe A, Bild 76) und Unterseite (Messreihe B, Bild 76) des BGAs auftretenden Temperaturen auf.

Wie Bild 78 zeigt, weichen die auftretenden Temperaturen von dem eingestellten Temperaturprofil ab, da diese die Ausgangstemperatur der Matrize und der Unterheizung darstellen.

Aufgrund von Strömungsverlusten und durch die Absorption von Wärme durch die Baugruppe entsteht eine Temperaturdifferenz, so dass die laut technischem Datenblatt (Tabelle 16) maximal am BGA auftretende Temperatur von 240 °C trotz eingestellter Oberheizung von 290 °C und maximaler Unterheizung von 300 °C nicht überschritten wird. Nachdem die gesamte von der Oberheizung ausgehende Wärme durch den BGA geleitet werden muss, um die Lotdepots auf zu schmelzen, wird der Oberheizungsfluss abhängig von der Temperaturphase variiert. Beim ReUse beträgt der Unterheizungsfluss hingegen permanent 100%, da eine gegebenenfalls thermische Überlastung der Baugruppenunterseite für den ReUse irrelevant ist.

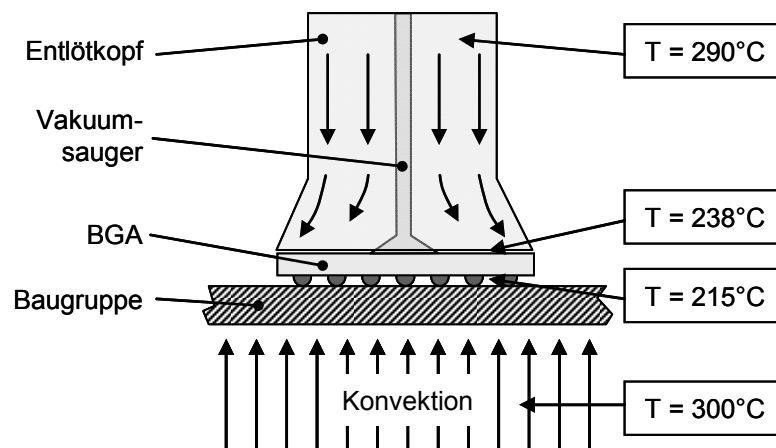


Bild 78: Temperaturverteilung am BGA entsprechend des gewählten Lötprofils

Das Entlöten der BGAs von der Baugruppe ist derart zu gestalten, dass das Bauelement nach Prozessende der direkten Weiterverarbeitung zugeführt werden kann. Daher sollte der Prozess einerseits zügig erfolgen, um das Bauelement möglichst wenig thermisch zu belasten, andererseits muss der BGA in einem verarbeitbaren Zustand vorliegen, d. h. es dürfen keine Lötbrücken etc. ausgebildet werden. Einen wesentlichen Einfluss auf das Entlötverhalten des BGAs hat die Länge der Plateaudauer in Prozessphase 4.

Der Einfluss der Plateaudauer (Phase 4) auf das Auslötverhalten wurde anhand von Versuchen für den Motorola-BGA verifiziert. Dabei wurden folgende konstante Prozessparameter gewählt:

Oberheizung:	290 °C	Fluss:	35 l/min.
Unterheizung:	300 °C	Fluss:	100%

Die Plateaudauer wurde im Rahmen von 20 Sekunden bis 25 Sekunden variiert. Die Besten Erfolge für das Auslöten ohne die Erzeugung von Lotspitzen wurden bei 23 Sekunden erzielt. Der BGA konnte leicht von der Baugruppe abgehoben werden und weist keinerlei Defekte auf (Bild 79), die vor einer unmittelbar daran anschließenden Weiterverarbeitung beseitigt werden müssten.

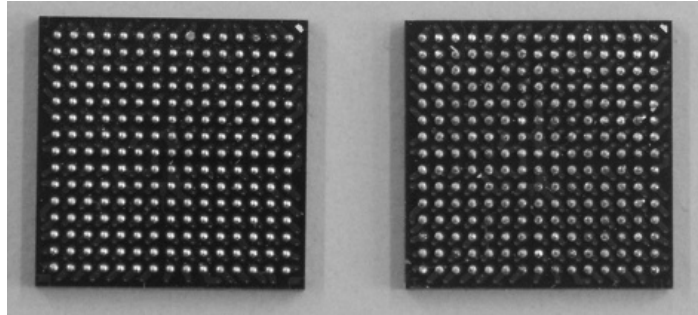


Bild 79: Abgelöste BGAs nach einer Plateaudauer von 23 Sekunden

Für die Automatisierung des Prozesses ist die Abhängigkeit der Größe der BGAs und der Anzahl der Balls auf die Plateaudauer zu verifizieren, sowie Größe und Ausführung der Platine zu berücksichtigen. Weiterhin muss abhängig von der Art des BGAs das Entlötverhalten auf die temperaturabhängigen Spezifikationen des Bauelementes angepasst werden.

7.2.2 Anschlussflächenvorbereitung

Nach dem Entlöten der Ball-Grid-Arrays ist es notwendig, die alten Lotdepots zu entfernen, um das Bauelement mit neuen Balls versehen zu können.

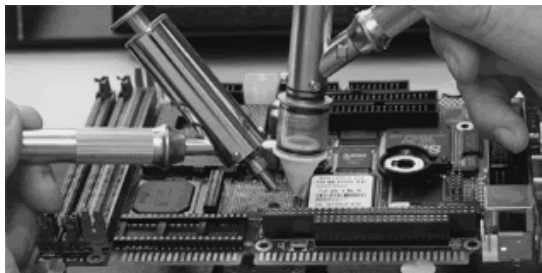


Bild 80: Absauggriffel zur Entfernung von Restlot [66]

Im Bereich des Rework wird die Baugruppe mittels eines Absauggriffels gereinigt, um diese für eine Bestückung mit einem neuen Bauelement vorzubereiten (Bild 80). Das gleiche Verfahren ist im ReUse anwendbar, um BGAs von Lotresten zu reinigen: Der Absauggriffel wird über das Bauelement geführt. Unter Einbringung von Heißluft schmelzen die Lotdepots auf und werden rückstandslos abgesaugt.

7.2.3 Verfahren zum Reballing von BGAs

Für das Reballing von Ball-Grid-Arrays haben sich in der Industrie mehrere Verfahren etabliert, die bislang manuell ausgeführt werden. Im Folgenden werden zwei dieser Verfahren vorgestellt und deren Automatisierbarkeit kritisch hinterfragt.

Reballing mittels Schablone

Ein von vielen Firmen angebotenes Verfahren zum Reballing von BGAs basiert auf der Verwendung von Schablonen, die individuell auf die Form und das Array des BGAs angepasst werden.

Der BGA wird, nachdem er zunächst gereinigt und mit Flussmittel versehen wurde, in einen eigens auf seine Spezifikationen angepassten Rahmen eingelegt. Auf den BGA wird, wie in Bild 81 dargestellt, eine Schablone aufgelegt (a), die über Unterdruck oder Federn passgenau in Position gehalten wird. Daraufhin werden Lotkugeln, die vorkonfektioniert bezogen werden können, auf der Schablone verteilt (b), überzählige beseitigt und der BGA samt Balls (c) einem Umschmelzprozess unterzogen. Hierzu kann einerseits ein Standard-Reflowprozess oder spezielle Anlagen verwendet werden, die für das Rework und Reballing Verwendung finden.

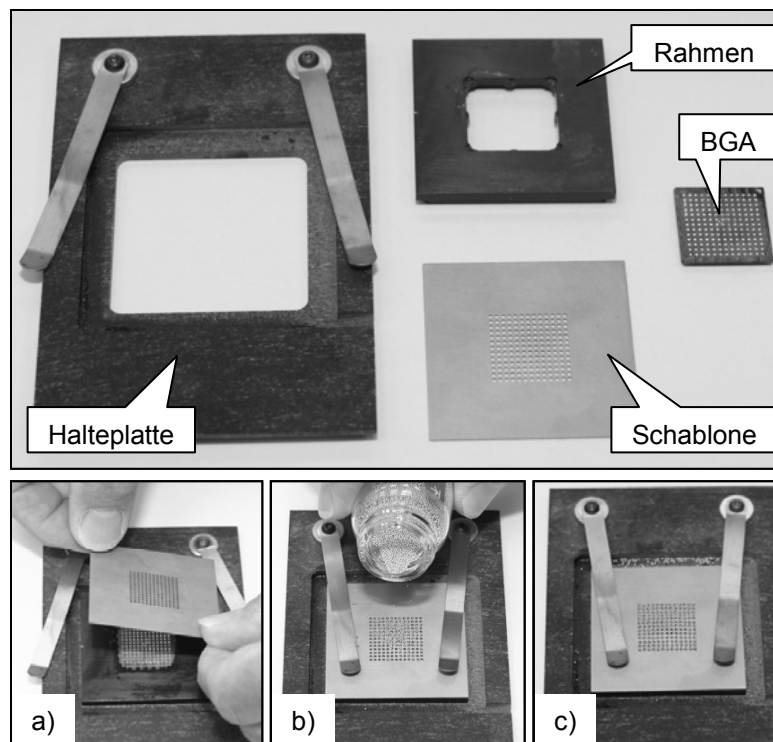


Bild 81: Darstellung des Reballing-Vorgangs mittels Schablone

Entscheidender Nachteil dieses Verfahrens ist, dass abhängig von der Bauform des BGAs und der Struktur des Arrays individuelle Formen und Schablonen bereitgestellt werden müssen. Diese sind zwar wieder verwendbar, verursachen jedoch aufgrund der hohen Varianz an BGAs hinsichtlich Baugröße, -form, Lotkugeldurchmesser, Pitch etc. Kosten in nicht unerheblichem Maße. Ist keine Reflowanlage für das Reballing verwendbar, sind spezielle Geräte für den Prozess bereitzustellen, die einen hohen Anschaffungswert haben. Weiterhin ist das Aufbringen der Balls auf die Schablone sehr zeitintensiv, da gewährleistet sein muss, dass einerseits alle Positionen mit Balls gefüllt sind, andererseits keine überschüssigen Balls den Lötprozess beeinträchtigen und Lötbrücken gebildet werden.

Die Automatisierung dieses Prozesses ist daher nur dann denkbar, wenn einerseits die Bereitstellung und das Aufbringen der Balls auf die Schablone realisierbar wird, andererseits das Wechseln der Formen und Schablonen, ähnlich wie über einen Revolver bei einer Werkzeugmaschine, individuell zu gestalten ist.

Reballing mittels Preforms

Eine sehr kostengünstige Methode des Reballings ist die Verwendung so genannter „SolderQuik BGA Preforms“ [53]. Die von der Firma Winslow Automation, Inc. entwickelten Preforms bestehen aus einer Lotdepotmatrix, die in einen wasserlöslichen Polymerträger eingebettet sind. Dieser wird auf den gereinigten, mit Flux versehenen BGA aufgelegt und einem Reflow-Prozess unterzogen. Nach Durchlaufen des Prozesses wird der reballte BGA zunächst mit deionisiertem Wasser gespült und anschließend der Polymerträger vom BGA abgezogen. Es verbleiben abschließend lediglich die Lotdepots auf dem BGA zurück.

Die entscheidenden Vorteile dieses Verfahrens sind, dass einerseits der Array der Balls individuell auf die Anforderungen des BGAs angepasst werden kann. Weiterhin sind außer einem Reflowofen keine zusätzlichen Anlagen und Werkzeuge notwendig, um das Reballing durchzuführen. Entsprechend der Anforderungen durch die EU-Richtlinie RoHS ist dieser Reballingprozess trotz höherer Löttemperaturen ebenfalls für Anwendungen mit bleifreiem Lot geeignet [62]. Nachdem die Preforms aus einem wasserlöslichen Polymerträger bestehen, sind sie zum Erhalt der Funktionalität bei einer relativen Luftfeuchte von < 60% zu lagern [71]. Weiterhin sollte die Umgebungstemperatur 60 bis 80 °C nicht übersteigen. Die Lagerung in Dunkelheit verhindert ebenfalls eine Alterung des Materials.

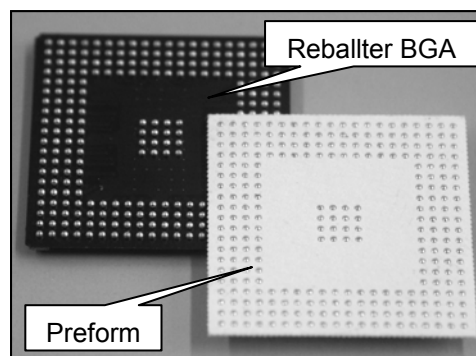


Bild 82: SolderQuick Preform und reballter BGA

Aufgrund der hohen Flexibilität der Preforms hinsichtlich Gestaltung der Padgeometrie für das Reballing und des einfachen Prozesshandlings ist eine Automatisierung dieses Prozesses gut vorstellbar. Lediglich die Positionierung der Preforms auf die zu reballenden BGAs stellt eine Herausforderung an den Prozess dar, für die geeignete Methoden gefunden werden müssen.

7.3 Alternative Verfahren zum Lösen der BGAs von Baugruppen

Wie bereits in Kapitel 7.2 dargestellt, werden BGAs primär zu Rework-Zwecken, d. h. zum Erhalt der Baugruppenfunktion, von dieser gelöst. Der fehlerhaft verlötete BGA wird entsorgt und durch einen neuen ersetzt.

Nachdem heutzutage auftretendes Konsumverhalten allerdings in zunehmendem Maße dazu führt, dass funktionsfähige Elektrogeräte der Verwertung zugeführt werden, ist ebenfalls eine Wiederverwendung einzelner, funktionsfähiger BGAs denkbar – insbesondere jener, die in großen Stückzahlen auftreten oder kostenintensiv in der Fertigung sind.

Das in Kapitel 7.2.1 vorgestellte Verfahren für das Entlöten der BGAs von der Baugruppe zeichnet sich durch einen geringen Durchsatz und hohe Kosten aus, da der Prozess manuell durchgeführt wird und die BGAs lediglich sequenziell entfernt werden können. Nachdem die Kosten für die Herstellung einer Großzahl von BGAs eher gering einzustufen sind, sollte der Prozess des Lösen der BGAs, die der Wiederverwendung zugeführt werden sollen, effizient und schonend durchführbar sein. Weiterhin sollte eine automatisierte Lösung einen Ansatz bieten, der möglichst viele Bauelemente gleichzeitig von der Baugruppe löst und dies in möglichst kurzer Zeit.

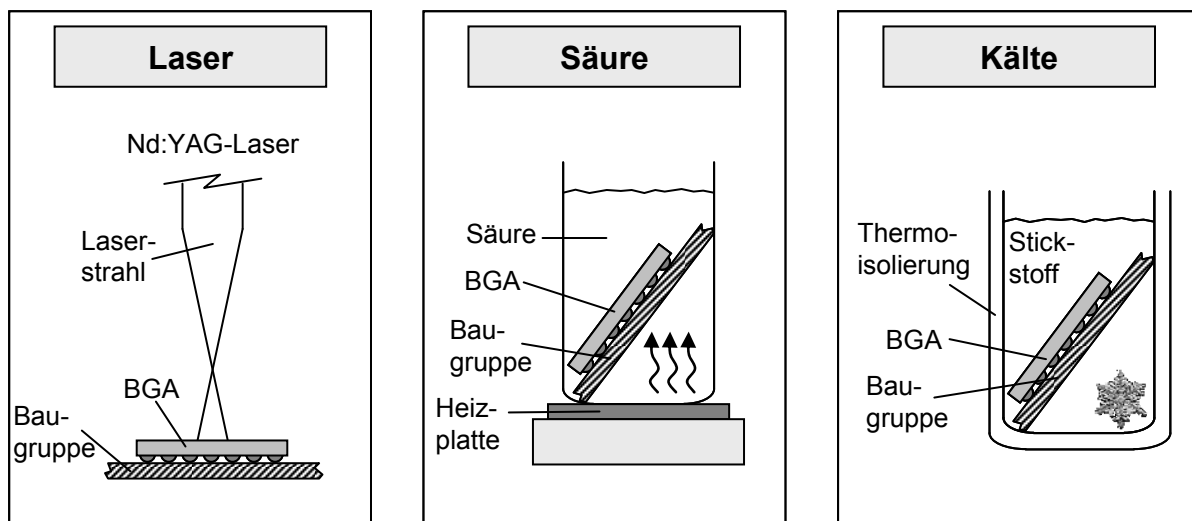


Bild 83: Alternative Verfahren zum Lösen von BGAs

Das manuelle Entlöten von BGAs, wie es beim Rework durchgeführt wird, stellt jedoch nur im begrenzten Rahmen einen automatisierbaren Prozess dar. Weiterhin findet durch den Entlötprozess eine weitere thermische Belastung des BGAs statt, so dass es hier zu Einbußen hinsichtlich der langfristigen Funktionsfähigkeit kommen kann.

Die Suche nach alternativen Verfahren für das Lösen der BGAs führte zu unterschiedlichen, in Bild 83 dargestellten Ansätzen, wie der Einsatz von Laser, Säuren oder Kälte mittels flüssigem Stickstoff. Im Weiteren werden die Erfahrungen im Rahmen der Erprobung dieser Verfahren vorgestellt. Dabei wurde weitestgehend darauf geachtet, dass es sich bei den untersuchten Methoden einerseits um automatisierbare Prozesse handelt, andererseits ein höherer Durchsatz als mit Standardverfahren erzielt werden kann.

Nachdem eine vollständig detaillierte Qualifizierung der Prozesse nicht stattfinden konnte, sind die im Folgenden beschriebenen Verfahren als Ansätze zu interpretieren, die bis zur industriellen Umsetzungsreife weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich machen.

7.3.1 Einsatz von Laser

Laser stellen bei den Lötverfahren und im Repair eine weit verbreitete Methode dar, um SMD-Bauelemente zu kontaktieren oder von der Baugruppe zu entfernen. Dabei stehen primär die Bauelemente im Vordergrund, die über seitliche Anschlüsse verfügen, da diese unkritisch mittels Laserstrahl – entweder punktuell oder linienförmig – fokussierbar und verarbeitbar sind.

Die Verwendung von Lasern als Selektivlötverfahren oder zum Ablösen der BGAs von der Baugruppe wurde bislang industriell nicht umgesetzt. Primäre Ursache ist, dass im Bereich des Lötens oder des Rework die Baugruppe und das Bauelement zu schonen sind, die bei Einsatz von Lasern Schaden nehmen können. Für den ReUse der Bauelemente ist jedoch die Struktur der Baugruppe irrelevant, so dass bei Abstimmung der Prozessparameter der Einsatz von Lasern eine denkbare Alternative darstellt.

In Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Laserzentrum wurden erste Versuche durchgeführt, um Ball-Grid-Arrays mittels Laserstrahlung von der Baugruppe zu lösen. Dabei wurden die bereits in Kapitel 7.2.1 genannten und durch Tabelle 16 charakterisierten Motorola-Baugruppen mit einem Fine-Pitch PBGA als Versuchsgrundlage herangezogen.

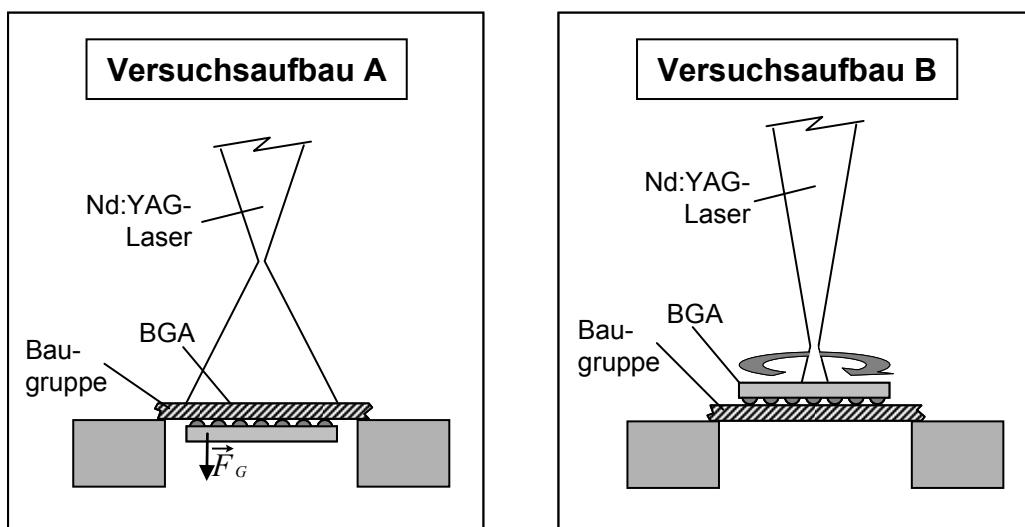


Bild 84: Versuchsaufbauten zum Ablösen von BGAs mittels Nd:YAG-Laser von der Baugruppe

Zum Einsatz kam ein Nd:YAG-Festkörperlaser (Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1.064 \text{ nm}$, der sich neben der flexiblen Strahlführung über Lichtwellenleiter u. a. durch unterschiedliche Betriebsarten auszeichnet. Neben gepulst betriebenen Einsatz bei mittlerer Leistung sind ebenfalls Dauerleistungen von

$P = 4,5 \text{ kW}$ umsetzbar [104]. Dieser Laser ist für den Einsatz zum Be- und Endstücken gut geeignet, da ca. 75% der Energie durch das Lot und lediglich 25% von der Baugruppe auf Basis von FR4 absorbiert werden [11]. Dadurch ist die Gefahr der thermischen Überlastung minimiert, was für das Rework von hoher Bedeutung ist.

Die Versuche gliedern sich in zwei Kategorien: Zunächst wurde, wie in Versuchsaufbau A in Bild 84 dargestellt, die Baugruppe mit dem BGA nach unten in die Anlage integriert. Dies bedeutet, dass die gesamte Strahlung des Lasers das FR4-Substrat durchdringen muss, um die Lotdepots auf zu schmelzen. Die Baugruppe dient somit als Schutz des Bauelements vor der direkten Einwirkung und thermischen Belastung des Laserstrahls. Aufgrund der wirkenden Gewichtskraft sollte der BGA nach Aufschmelzen des Lotes selbständig herabfallen. Der Laserstrahl wurde derart fokussiert, dass die gesamte Fläche des BGAs abgedeckt wird.

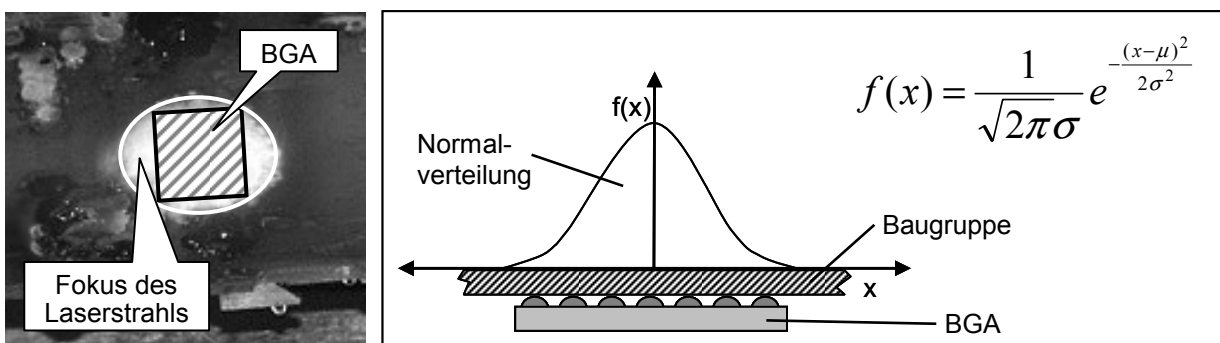


Bild 85: Prinzipielle Intensitätsverteilung des Laserstrahls über dem BGA

In mehreren Versuchen wurde die Leistung des Lasers von $P = 10 \text{ W}$ bis $P = 100 \text{ W}$ variiert, ohne dass eine Wirkung auf die Haftfestigkeit des BGAs erkennbar war. Bei einer Steigerung der Leistung auf $P = 150 \text{ W}$ traten, obwohl FR4 der Brennbarkeitsklasse UL V0 entspricht, sichtbare Verbrennungen an der Baugruppe auf, ohne dass sich der BGA selbständig von der Baugruppe löste.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Nachdem die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung der Standardisierten Normalverteilung mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ (Gl. 3) folgt, liegt aufgrund der Verbrennungen der Baugruppe die Vermutung nahe, dass der Energieeintrag durch den Laser im Zentrum des Strahls hoch gewesen sein muss, in den Randbereichen die Wärmeleitung des FR4 mit $0,3 \text{ W/mK}$ allerdings nicht ausreichend war, um die Lötstellen auf zu schmelzen, bevor die Baugruppe vehementen und für einen automatisierbaren Prozess indiskutablen Schaden nahm.

In Versuchsaufbau B wird, wie in Bild 86 dargestellt, der BGA dem Laserstrahl direkt zugewendet. Statt der Bestrahlung des BGAs mit einem konstanten Fokus wie in Versuchsaufbau A wird der Strahl auf einen Durchmesser von $D_f = 0,3 \text{ cm}$ fokussiert und die Gesamtfläche des BGAs abgescannt. Um eine homogene Temperaturverteilung im

BGA zu erzielen, wird der Laserstrahl entsprechend des in Bild 86 dargestellten Abtastschemas über das Bauelement geführt.

Nachdem die Leistungsdichte bei punktuellen Laserstrahlen wesentlich höher ist, war bereits eine Leistung von $P = 40 \text{ W}$ ausreichend, um den BGA nach einer Bestrahlungsdauer von ca. zwei Minuten von der Baugruppe lösen zu können, ohne dass dieser sichtbaren Schaden genommen hat. Dabei wurde allerdings mittels eines Pyrometers eine Oberflächentemperatur des Bauelements von $T_{\text{Of}} = 260 \text{ °C}$ gemessen. Diese liegt damit 20 °C über dem für diesen Plastic-BGA zulässigen Temperaturbereich von $T_{\text{max}} = 240 \text{ °C}$ (Tabelle 16).

Zur Reduktion der thermischen Belastung kann zunächst die Bestrahlungsdauer bei gleichzeitig reduzierter Laserleistung erhöht werden, was allerdings zu einer höheren Gesamtprozessdauer führt. Prozesszeiten unter 2 Minuten sind für BGAs, die einem Wiederverwendungszweck zugeführt werden sollen, nicht realisierbar [90]. Prozessunterstützend ist es sinnvoll, eine Heizung unterhalb der Baugruppe einzusetzen, so dass die Temperaturdifferenz zwischen Baugruppenober- und -unterseite vermindert wird. Dadurch werden die Balls über die Wärmeleitfähigkeit des Substrats vorgeheizt, so dass die Gesamtprozesszeit minimiert werden kann.

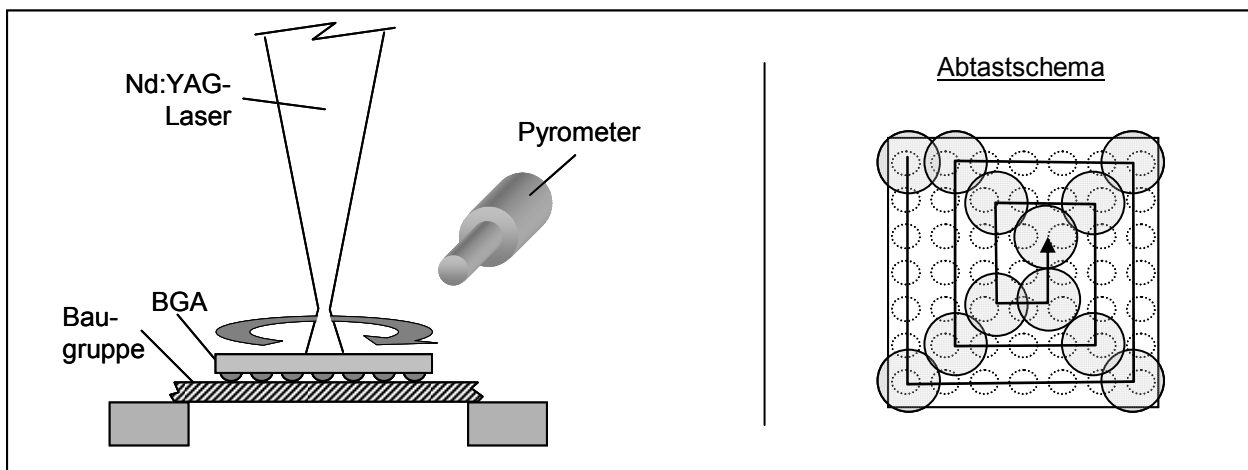


Bild 86: Versuchsaufbau zum Ablösen des BGAs durch Abscannen der Bauelementfläche mit dem Laserstrahl

Zusammenfassung

Ziel der Verwendung von Nd:YAG-Lasern zum ReUse von BGAs ist, den Reflowlötprozess nachzubilden. Die Einflussnahme auf das Abtastschema, die Scangeschwindigkeit und die Laserleistung müssen dabei individuell auf die Bauelementspezifikationen angepasst werden, um die thermische Überlastung der Bauelemente zu vermeiden. Eine kontinuierliche Prozessüberwachung kann durch den Einsatz eines Pyrometers, welches kontinuierlich die Temperaturentwicklung des Prozesses überwacht, realisiert werden. Insgesamt stellt der Laserprozess einen gut automatisierbaren und kontrollierbaren Prozess dar, der individuell auf die Anforderungen der BGAs eingestellt werden

kann, da sowohl die Größe und Struktur der Bauelemente als auch die Dicke des Substrats Einfluss auf die Prozessdauer haben [90].

7.3.2 Anwendung von Säure

Eine zunächst nicht nahe liegende, aber sehr einfache Methode zum Ablösen der BGAs von der Baugruppe stellt die Verwendung von Säuren dar. Zu diesem Zweck wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für anorganische und analytische Chemie (AOC) der Universität Erlangen-Nürnberg mehrere Versuchsreihen durchgeführt.

Ziel ist es, die BGAs mittels Säure von der Baugruppe abzulösen. Dabei soll die Säure auf die Lotdepots wirken und nicht das Gehäuse des Bauelements angreifen. Zur Diskussion standen Salpetersäure (HNO₃), Schwefelsäure (H₂SO₄) und Salzsäure (HCl), die zu den stärksten Säuren zählen.

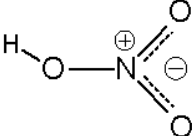
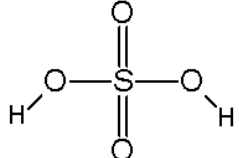
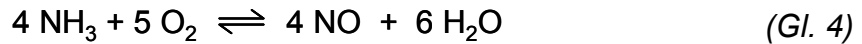
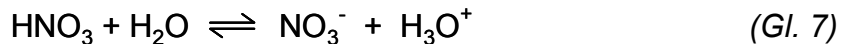
	Salpetersäure	Schwefelsäure	Salzsäure
Summenformel	HNO ₃	H ₂ SO ₄	HCl
Strukturformel			H—Cl
Siedepunkt bei ca. 20%iger Lösung	~ 105 °C	~ 115 °C	~ 110 °C
Azeotropiepunkt	67,4 Gew.-% / 120,7 °C	98,3 Gew.-% / 338 °C	20,22 Gew.-% / 110 °C
MAK	2 ml / m ³ (5 mg / m ³)	1 mg / m ³	5 ml / m ³
LD ₅₀	430 mg / kg (Ratte)	2140 mg / kg (Ratte)	900 mg / kg (Kaninchen)
R+S-Sätze	R 35 S 23, 26, 36,45	R 35 S 26, 30, 45	R 34, 37 S 26, 45

Tabelle 17: Charakteristika betrachteter Säuren [77]

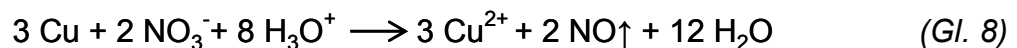
Salpetersäure ist die technisch wichtigste Sauerstoffsäure des Stickstoffs und eine der stärksten anorganischen Säuren [41]. Ihre Herstellung erfolgt nach dem Ostwald-Verfahren durch die Oxidation von Ammoniak [100]: Das Ammoniak wird gemeinsam mit Luft in einem Reaktor bei ca. 800 °C an einem Platin-Rhodium-Katalysator zu Stickstoffmonoxid und Wasser oxidiert (Gl. 4). In einem weiteren Oxidationsvorgang reagiert das Stickstoffmonoxid mit Sauerstoff bei Temperaturen unter 50 °C zu Stickstoffdioxid (Gl. 5). Abschließend wird das Stickstoffdioxid mit Wasser zu einer 50%igen Salpetersäure umgesetzt und durch eine nach geschaltete Destillationsanlage auf ca. 65% konzentriert (Gl. 6).



Salpetersäure ist – wie auch Salzsäure und Schwefelsäure – eine sehr starke Säure, die zudem in der Lage ist, Edelmetalle wie Silber zu zersetzen [77].



In Verbindung mit Wasser gibt Salpetersäure ein Wasserstoffatom ab, so dass als Resultat ein Oxonium-Ion entsteht, welches charakteristisch für die Bildung einer Säure ist (Gl. 7). Bei Reaktion mit Metallen entstehen, wie in (Gl. 8) anhand des Beispiels Kupfer gezeigt, die Salze der Salpetersäure, gleichzeitig bildet sich das für Salpetersäure charakteristische rotbraune Stickstoffdioxid. Lediglich Gold und Platin sind resistent gegen den Einfluss von Salpetersäure.



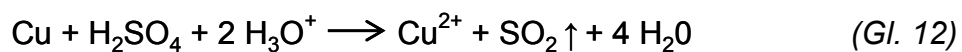
Schwefelsäure ist eine der am häufigsten produzierten Chemikalien [77]. Weltweit wurden im Jahr 1997 mehr als 130 Millionen Tonnen hergestellt. Neben vielfältigen Einsatzbereichen wie z. B. im Lebensmittelbereich oder der Landwirtschaft (Produktion von Düngemitteln) wird die Säure zum Aufschließen von Erzen oder zum Ätzen von Halbleitern eingesetzt.

Die Herstellung von Schwefelsäure erfolgt nach dem Vitriol- und dem Bleikammerverfahren, wobei das Vitriolverfahren die älteste Methode darstellt, Schwefelsäure zu gewinnen, da dieses Verfahren bereits im 13. Jahrhundert von den Alchemisten angewandt wurde. Heutzutage wird hauptsächlich das Kontaktverfahren verwendet [100]: Hauptbestandteile der Schwefelsäure sind Schwefel und Sauerstoff. In einem Verbrennungsofen wird reiner Schwefel mit Luftsauerstoff verbrannt, woraus in einem Oxidationsvorgang Schwefeldioxid entsteht (Gl. 9). Im so genannten Kontaktofen wird das entstandene Schwefeldioxid mit Sauerstoff weiter oxidiert, so dass Schwefeltrioxid entsteht (Gl. 10). In einem Zwischenabsorber wird das Schwefeltrioxid in konzentrierte Schwefelsäure geleitet bevor im Endabsorber Wasser hinzu gegeben wird, welches mit dem Schwefeltrioxid neue Schwefelsäure bildet (Gl. 11). Die Einleitung konzentrierter Schwefelsäure in den Zwischenabsorber ist zwingend notwendig, da Schwefeltrioxid nur sehr langsam mit Wasser reagiert.

Mit vielen unterhalb der Spannungsreihe von Wasserstoff ($\epsilon_0 = 0$ Volt) stehenden Metallen reagiert die nicht oxidierende, verdünnte Schwefelsäure zu Metallsulfaten, den Salzen der Schwefelsäure. Konzentrierte (heiße) Schwefelsäure hingegen wirkt oxidierend.

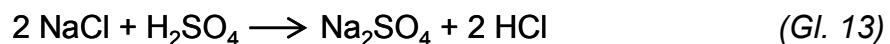


Dadurch ist sie in der Lage, Metalle aufzulösen, die in der Spannungsreihe dicht oberhalb des Wasserstoffs stehen. So wird z. B. auch Kupfer, das in der Spannungsreihe dicht oberhalb von Wasserstoff liegt ($\epsilon_0 [\text{Cu}^\circ/\text{Cu(II)}] = +0,340$ Volt), durch heiße, konzentrierte Schwefelsäure oxidiert, wobei Schwefeldioxid und Kupfersulfat entstehen, aber kein Wasserstoff (Gl. 12).

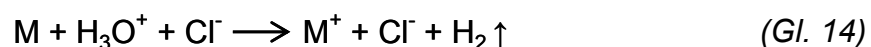


Eisen und Blei widerstehen konzentrierter Schwefelsäure. Das Blei bildet einen unlöslichen Überzug aus Bleisulfat, so dass Schwefelsäure zum Lösen der BGAs ungeeignet erscheint.

Chlorwasserstoff ist zunächst ein farbloses, stechend riechendes Gas, welches in Wasser gelöst Salzsäure bildet. Es gehört zu den wichtigsten Grundchemikalien der chemischen Industrie und hat eine hohe Bedeutung für die Chlorchemie [41]. Seine Herstellung erfolgt aus konzentrierter Schwefelsäure und Kochsalz (Gl. 13). Alternativ fällt es in der chemischen Industrie als Nebenprodukt bei der Chlorierung organischer Verbindungen an.



Durch Salzsäure werden die meisten unedlen Metalle (M) (z. B. Zinn und Blei) unter Bildung von Chloriden und Wasserstoff gelöst (Gl. 14). Einige unedle Metalle, wie z. B. Tantal, Niob und Germanium, sowie Edelmetalle wie z. B. Kupfer, Quecksilber, Silber und Gold werden nicht angegriffen.



Der in Bild 87 links dargestellte Versuchsaufbau stellt eine stark vereinfachte Rückflussapparatur dar. Dies gewährleistet beim Erhitzen ein konstantes Volumen sowie eine gleich bleibende Konzentration von Salpeter- und Schwefelsäure. Um dies auch bei der Salzsäure zu erreichen, wurden alle Säuren in 20%iger Konzentration verwendet, was dem Azeotrop der Salzsäure entspricht.

Ein Azeotrop ist ein Gemisch, welches durch Destillation nicht mehr getrennt werden kann, da die Zusammensetzung in der Flüssigkeit und der Gasphase identisch sind. Das heißt, die Gehalte in der Lösung entsprechen den Partialdrücken über der Lösung. Dadurch entsteht ein konstanter Siedepunkt (Tabelle 17).

Vorversuche mit den bereits in Kapitel 7.2.1 verwendeten Handy-Baugruppen zeigen, dass der Einsatz von Salpetersäure und Schwefelsäure zu unbefriedigenden Ergebnissen führt:

Die Schwefelsäure hat alle Bestandteile der Baugruppe – insbesondere die Oberfläche der BGAs sowie alle weiteren Kunststoffkomponenten – stark angegriffen. Die Reaktionsprodukte aus Schwefelsäure und Kunststoffkomponenten haben sich auf der Oberfläche der gesamten Baugruppe – besonders im Bereich zwischen Baugruppe und BGA – niedergeschlagen. Dadurch konnte die Säure nicht ausreichend zu den Lötstellen vordringen, um diese aufzulösen. Daher ist diese Säure für den Einsatz im ReUse Bereich ungeeignet.

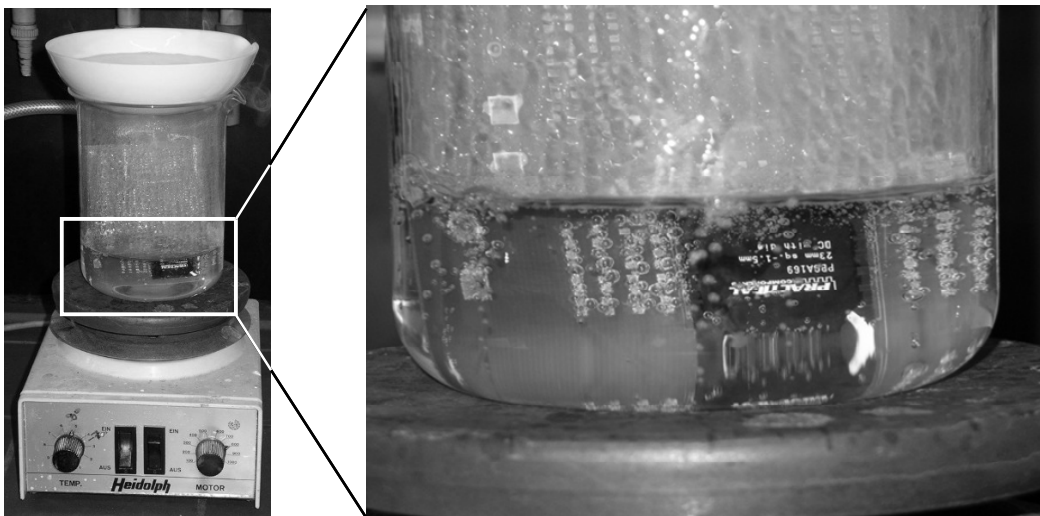


Bild 87: Versuchsaufbau zum Abätzen der BGAs von der Baugruppe

Die Salpetersäure hat unter gleichen Versuchsbedingungen dazu geführt, dass sich zwar das Kupfer aufgelöst hat, die BGAs jedoch auf der Leiterplatte verblieben sind. Grund hierfür ist die oxidierende Wirkung der Salpetersäure. Durch sie wird das Zinn nicht nur in den 2-wertigen Zustand überführt, sondern bildet Zinn(IV)Oxid. Dies haftet auf der Oberfläche der Balls und erschwert somit den Durchtritt der Säure zur metallischen Phase. Darüber hinaus hat die Säure die übrigen Bestandteile der Baugruppe stark angegriffen, so dass sich beispielsweise der vorhandene Vibrationsmotor aufgelöst hat. Daher ist Salpetersäure ebenfalls zu aggressiv, um im Bereich ReUse eingesetzt zu werden.

Der Einsatz von Salzsäure zum Ablösen der BGAs von der Baugruppe zu ReUse-Zwecken hat sich als viel versprechend erwiesen. Zur Durchführung der Versuche wurde die Säure entsprechend Bild 87 auf einer Heizplatte im azeotropen Zustand zum Sieden gebracht und die Baugruppen der Säure zugegeben. In azeotroper Konzentration hat Salzsäure einen Siedepunkt von ca. 110 °C (Tabelle 17). Somit liegt die Temperatur, der die BGAs ausgesetzt werden, weit unter der des Reflow-Prozesses und belastet das Bauelement thermisch wesentlich weniger.

Bei ersten Versuchen mit der Mobiltelefon-Baugruppe fiel zunächst die Empfindlichkeit der Bauelemente gegen die Säure auf, die Polyamid enthalten. Diese lösten sich unter

Einfluss der Säure auf und verursachten, wie in Bild 88 deutlich erkennbar ist, einen Rückstand auf der Baugruppe und dem BGA. Dadurch wird dieser für eine weitere Verwendung unbrauchbar.

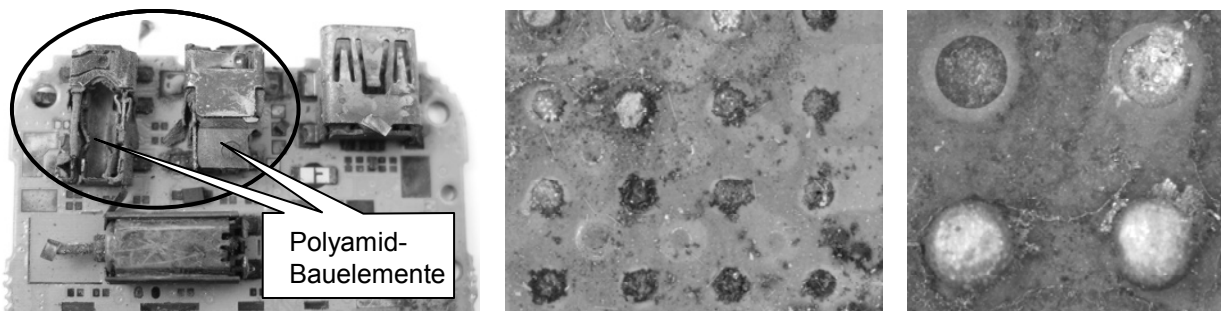


Bild 88: Wirkung der Salzsäure auf die Baugruppe mit Bauelementen aus Polyamid

Um unabhängig von derartigen Einflüssen zu sein, wurden für weitere Versuche Dummy-BGAs verwendet. Dies ermöglicht ebenfalls die Unterscheidung zwischen bleihaltigem und bleifreiem Lotmaterial. Zwar ist zum momentanen Zeitpunkt lediglich mit rückläufigen Baugruppen zu rechnen, die über bleihaltige Kontakte verfügen, mit Umsetzung des ElektroG im August 2005 wird jedoch die Zahl der bleifrei gelöteten Baugruppen stark zunehmen.

Bei den verwendeten Dummy-BGAs handelt es sich um einen Daisy-Chain Plastic-BGA der Firma Practical Components. Er verfügt über eine 13x13 Array mit 169 Balls, einem Pitch von 1,5 mm und einer Kantenlänge von 23 mm. Die Dummies standen sowohl mit bleihaltigem (62Sn36Pb2Ag) als auch mit bleifreiem Lot (95,5Sn4Ag0,5Cu) zur Verfügung und wurden mittels Reflow-Prozess auf ein Standard-FR4 bestückt.

Sowohl für bleifreies Lotmaterial als auch für bleihaltiges betrug die Reaktionszeit ca. 25 Minuten, bis sich die Lötstellen vollständig aufgelöst hatten und alle BGAs selbstständig von der Platine gelöst waren. Ein BGA wurde dann direkt aus der Säure genommen, ein weiterer 10 Minuten nach dem Ablösevorgang, um etwaige Rückstände auf den Kontaktstellen aufzulösen. Beide BGAs wurden unmittelbar nach dem Entfernen aus der Säure zunächst mit deionisiertem Wasser und dann mit Methanol gespült, um die Oxidation der Kontaktflächen einzugrenzen.

Die so behandelten BGAs wurden einer Mikrostrahlröntgenfluoreszenzanalyse (μ RFA) unterzogen, um Aussagen über die Qualität der Kontaktstellen treffen zu können. Der unmittelbar aus der Säure genommene BGA zeigt, wie Bild 89 zu entnehmen ist, primär ein Spektrum bestehend aus großen Anteilen Nickel (Ni) und Kupfer (Cu), daneben Barium (Ba) und Kalzium (Ca). Die Reste des Zinns sowie die starken Peaks von Nickel und Kupfer lassen den Schluss zu, dass die intermetallische Phase der Kontaktstellen unbeschädigt ist.

Die Analyse des zweiten BGAs, der nach zusätzlichen 10 Minuten dem Säurebad entnommen wurde, weist streckenweise Kontaktstellen mit einem hellgrauen Oberflächenbelag auf. Alle Stellen zeigen ein ähnliches Spektrum wie das in Bild 89 dargestellte. Jedoch sind außer Kupfer und Nickel keine weiteren Elemente nachweisbar. Auffällig ist

der der im Vergleich zum ersten BGA wesentlich kleinere Peak von Kupfer im Verhältnis zum Nickelpeak. Dieser Unterschied lässt den Schluss zu, dass das zuvor stärker detektierte Kupfer auf einer Ni-Schicht aufgebracht ist und sich unter der längeren Einwirkzeit der Salzsäure stärker gelöst hat. Die sichtbare, graue Färbung kann daher vom Nickel verursacht werden, welches sich nun direkt an der Oberfläche des Kontaktes befindet.

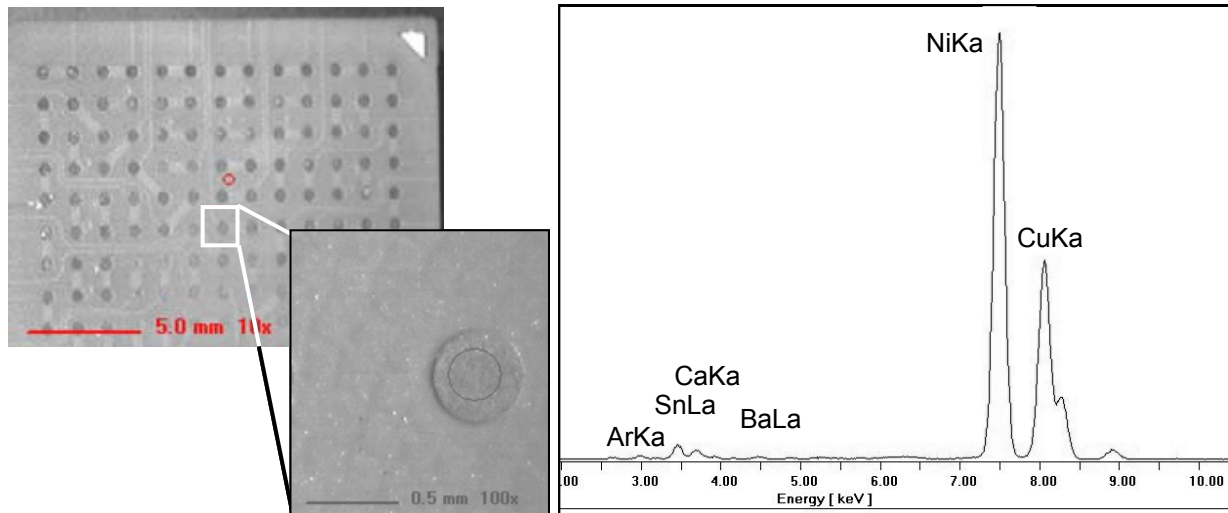
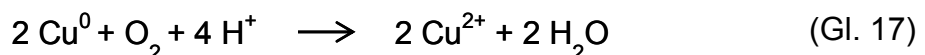
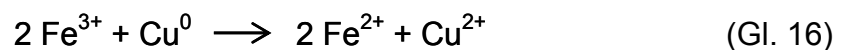
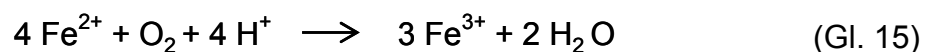


Bild 89: Spektrum der µRFA-Analyse eines nach 20 Minuten mittels HCl von der Baugruppe entfernten BGAs

Eine Erklärung ist das in der technischen Salzsäure vorhandene Eisen(II). Durch Luftzutritt kann dieses zu Eisen(III) oxidieren, wenn reduzierende Metalle (wie Blei⁰ und Zinn⁰) weitestgehend verbraucht sind. Die Oxidationskraft von Fe(III) (ϵ_0 [Fe(III)/Fe(II)] = +0,771 Volt) wiederum genügt, um metallisches Kupfer in seine ionische Form zu überführen (ϵ_0 [Cu⁰/Cu(II)] = +0,340 Volt) (Gl. 15) - (Gl. 17). Dabei wird Fe(III) immer wieder nachgebildet, solange Luft hinzutritt. Das Kupfer wird bei Anwesenheit von Fe quasikatalytisch durch den Luftsauerstoff oxidiert.



Nickel ist zwar in Salzsäure ebenfalls löslich, jedoch befindet es sich in der Schicht unterhalb des Kupfers und wird somit erst angegriffen, wenn das Kupfer von der Oberfläche abgelöst ist. Zudem bildet Nickel keine starken Chloro-Komplexe und wird auch durch Sauerstoff nur langsam angegriffen.

Eine Beeinträchtigung der Kunststoffoberfläche der BGAs durch die Säure konnte nicht beobachtet werden. In weiteren Versuchen ist jedoch der Einfluss des Chlorids auf die Lebensdauer der BGAs zu prüfen, die aufgrund von Dentritbildung oder Korrosionseffekten verkürzt werden könnte.

Aus ökologischer Sicht gestaltet sich die Verwendung von Salzsäure als unbedenklich, da deren Aufbereitung sehr einfach möglich ist: Nach dem Dekantieren und Filtrieren der Säure von Niederschlägen und Rückständen werden die verbleibenden Feststoffe dem Verhüttungsprozess zugeführt. Die azeotropische Destillation ermöglicht zum Großteil die Rückgewinnung der Säure, so dass eine Wiederverwendung der Substanzen von nahezu 100% erreichbar ist.

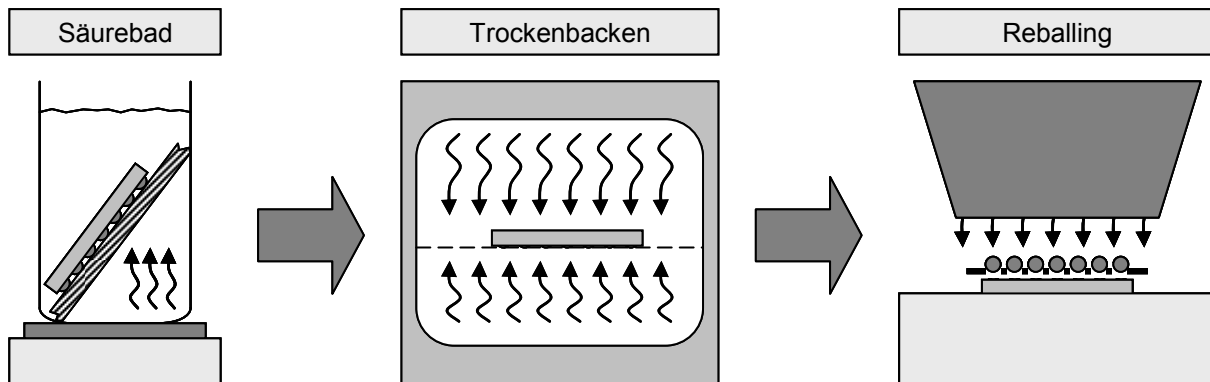


Bild 90: Prozessablauf vom Säurebad über das Trockenbacken zum Reballing der BGAs

Im Anschluss an das Säurebad ist es zwingend notwendig, die Bauelemente, wie in Bild 90 dargestellt, vor dem Reballing einem Trocknungsprozess zu unterziehen, damit aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften vieler BGAs das sich anschließende Reballing keine inneren, thermisch bedingten Spannungen im Bauelement verursacht, die wiederum zu Ausfällen führen. Dabei sind die bereits in Tabelle 15 genannten Kriterien für das Trockenbacken von SMDs vor der Weiterverarbeitung einzuhalten.

Zusammenfassung

Ein bedeutender Vorteil dieses Verfahrens ist die Unabhängigkeit von bleihaltigem oder bleifreiem Lot, da für beide Lotmaterialien gleiche Ergebnisse erzielt werden konnten. Das bereits bei vorherigen Untersuchungen gefundene Nickel ist Bestandteil der intermetallischen Phase am Lötkontakt des BGAs. Rückstände von Blei aus bleihaltigen Lotdepots lassen sich auf den abgeätzten BGAs nicht finden. Niederschläge von Metallsalzen der gelösten Elemente sind nicht nachweisbar, einziges „Fremdelement“ ist Eisen, das aus der technischen Salzsäure stammt. Die Kontakte werden daher durch die Säure nicht beschädigt.

Ansonsten bietet dieser Prozess gute Möglichkeiten der Automatisierung. In der zum Einsatz kommenden Salzsäure können mehrere Bauelemente gleichzeitig gelöst werden. Insgesamt sind die Prozesskosten für das Lösen der BGAs mit Salzsäure gering einzustufen, da technische Salzsäure einerseits sehr preisgünstig ist und aufgrund der zeitgleichen Verarbeitung ein hoher Durchsatz erzielt werden kann. Der darüber hinaus auftretende Aufwand für das Trockenbacken der BGAs erhöht zwar abhängig von der

Größe der BGAs die Gesamtprozesszeit, ermöglicht allerdings ebenfalls dessen gleichzeitige Durchführung.

7.3.3 BGA-Entfernung mittels Kälte

Das Entfernen der Ball-Grid-Arrays von der Baugruppe unter Einfluss von Kälte stellt einen weiteren, realisierbaren Ansatz dar. Hierzu wird als Medium flüssiger Stickstoff verwendet. Stickstoff ist ein bei Zimmertemperatur farb- und geruchsloses Gas, welches bei Abkühlung auf $-195,8\text{ °C}$ zu einer farblosen Flüssigkeit kondensiert.

Eine zunächst durchgeführte Temperaturmessung mit der bereits in Kapitel 7.2.1 verwendeten, mit Thermosensoren präparierten Baugruppe zeigt, dass bereits nach 15 Sekunden eine konstante Temperatur von -189 °C erreicht wurde. Diese liegt aufgrund der Wärmekapazität der Baugruppe etwas oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche zeigt sich, dass die BGAs, nachdem sie dem flüssigen Stickstoff etwa ca. 2 Minuten ausgesetzt wurden, mit geringem Kraftaufwand von der Baugruppe gelöst werden konnten. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des FR4-Materials und des Lotes liegt der Schwachpunkt der Verbindung bei der Baugruppe. Daher verblieben die Balls, wie in Bild 91 erkennbar, vollständig auf dem Bauelement. Dies vereinfacht das Reballing der BGAs erheblich, da lediglich durch einen Abfräs-, Abkant- oder Absaugvorgang die Oberflächenpräparation des BGAs stattzufinden hat.

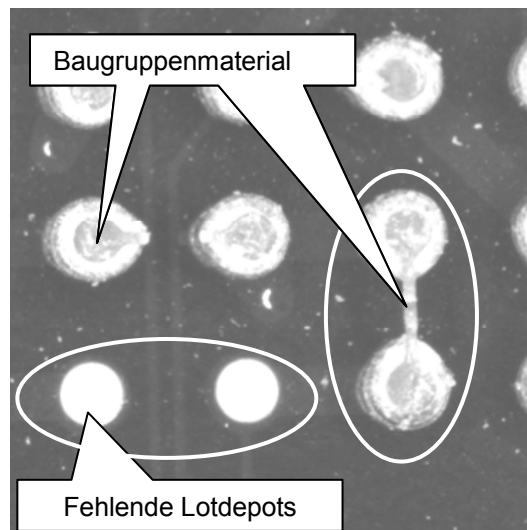


Bild 91: Mikroskopaufnahme der Lotdepots eines BGAs nach Behandlung mit flüssigem Stickstoff

Die Frage nach einer thermischen Überlastung der BGAs durch Kälte ist wissenschaftlich in weiteren Versuchsreihen zu verifizieren. Datenblätter geben im Wesentlichen Auskunft über maximale Höchsttemperaturen, die beispielsweise beim Reflow-Löten nicht überschritten werden dürfen. Zum Unterschreiten von Temperaturbereichen liegen

keine Grenzwerte vor. Lediglich Aussagen über Lager- und Betriebstemperaturen lassen Rückschlüsse auf den Langzeittemperaturbereich zu. Dieser kann – entsprechend der Herstellerspezifikation – allerdings für das Reflowlöten kurzzeitig überschritten werden, ohne dass das Bauelement langfristigen Schaden nimmt.

Die Prozesskosten sind insgesamt hoch einzustufen, da zur Erhaltung des flüssigen Stickstoffs ein verhältnismäßig hoher Aufwand zur thermischen Isolation notwendig ist. Darüber hinaus wird nicht verhindert werden können, dass der Stickstoff verdunstet, so dass zwar keine zu beseitigenden Rückstände verbleiben, allerdings kontinuierlich flüssiger Stickstoff bereitgestellt werden muss.

7.4 Zusammenfassung

Ball-Grid-Arrays gewinnen in der Elektronikproduktion stark wachsende Bedeutung. In Zusammenhang mit kurzlebigen, innovativen Produkten, die oftmals in voll funktionsfähigem Zustand entsorgt werden, stellt daher deren ReUse eine interessante Herausforderung dar.

Standardprozesse, wie sie bereits in der Industrie umgesetzt werden, bieten allerdings nicht den Rahmen, um große Durchsatzmengen kosteneffizient aufzuarbeiten. Die vorgestellten Alternativverfahren bieten daher interessante Ansätze, um den Prozess des ReUse beginnend bei der Abtrennung des BGAs von der Baugruppe bis hin zum Reballing effektiv zu gestalten. Zur Automatisierung des Prozesses ist es notwendig, weitergehende Prozessanalysen sowie Kosten-/Nutzenrelationen durchzuführen und Absatzmärkte für ReUse-BGAs im Vorfeld zu erschließen.

Im Sinne der Integrierten Produktpolitik bietet das ReUse gebrauchter Ball-Grid-Arrays die Möglichkeit, den Produktlebenszyklus dieser meist sehr aufwendig herzustellenden Bauelemente zu verlängern, dadurch Ressourcen zu schonen und neue Märkte zu erschließen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Produktlebenszyklus umfasst während der Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsphase eine Vielzahl einzelner Prozessschritte sowie verantwortlicher Akteure, die in direkter oder indirekter Weise Einfluss auf die Umwelt nehmen und somit unmittelbar zu einer geringeren Umweltbelastung beitragen können. Der Produktentwicklung kommt dabei von allen Prozessen die höchste Bedeutung zu, da rund 80% des während der Produktlebensphasen auftretenden Energieverbrauchs bereits in der Entwurfsphase festgelegt werden [112]. Für eine nachhaltige Vorgehensweise ist es jedoch unerlässlich, darüber hinaus die Wirkungen aller Lebensphasen, d. h. Herstellung, Nutzung und Entsorgung, auf den Produktlebenszyklus zu berücksichtigen, um umweltverträgliche Produkte zu erhalten.

Die politischen Aktivitäten auf EU-Ebene forcieren nachhaltiges Wirtschaften durch die Umsetzung von Richtlinien zum Umgang mit Elektroaltgeräten sowie Stoffverboten bei Neugeräten. Darauf aufbauend führen Deklarationsanforderungen im Bereich der Verwendung von Chemikalien und die Erstellung von Umweltprofilen von Produkten zu einer höheren Transparenz umweltrelevanter Daten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die seitens der Europäischen Union für die Elektro- und Elektronikindustrie aktuell umzusetzenden Richtlinien dargestellt und deren Implementierung in nationales Recht diskutiert. Dabei wurde insbesondere die Pflicht des Herstellers für die Entsorgung der von ihm gefertigten Produkte hervorgehoben, da hieraus eine Verantwortung über den gesamten Produktlebenszyklus entsteht, die langfristig Einfluss auf die demontage- und verwertungsgerechte Produktentwicklung haben wird. Darauf aufbauend wurde als zentrales Konzept die Integrierte Produktpolitik vorgestellt, die eine freiwillige Maßnahme der Unternehmen darstellt, den Gedanken der Nachhaltigkeit verstärkt in die Unternehmenspolitik zu integrieren.

Die erfolgreiche Umsetzung der Integrierten Produktpolitik ist nur möglich, wenn neben dem Hersteller, sowohl der Verbraucher als auch der Verwerter als Verantwortungsträger benannt werden. Nachdem deren Interessen sehr heterogen sind, wurde die Bedeutung der interdisziplinären Kommunikation entlang des gesamten Produktlebenszyklus zur Umsetzung der IPP herausgearbeitet. Da Integrierte Produktpolitik eine Strategie darstellt, die außer dem Ziel der ökologischen und ökonomischen Produkt- und Prozessoptimierung entlang des gesamten Produktlebenszyklus keine dezidierten Vorgaben über die Herangehensweise an deren Umsetzung macht, wurden im weiteren die Produktkategorien identifiziert, die aufgrund ihrer Charakteristika eine besondere Eignung zur Produkt- und Prozessverbesserung aufweisen. Anhand derer wurde die Umsetzung der Integrierten Produktpolitik und deren ökologischer und ökonomischer Nutzen aufgezeigt.

Für klassische Massengebrauchsgüter, die sich durch ihr geringes Gewicht, die hohe Materialvielfalt und niedrige Anschaffungskosten auszeichnen und deren Energieverbrauch primär in der Nutzungsphase stattfindet, wurde eine vollständige Produktneuentwicklung als zielführende Maßnahme zur Umsetzung der Integrierten Produktpo-

litik herausgearbeitet. Anhand des Beispielproduktes „Bodenstaubsauger“ konnte anschaulich gezeigt werden, dass ein seit bereits 100 Jahren im Haushaltsbereich bewährtes Gerät ein hohes Optimierungspotenzial aufweist, und gleichzeitig, trotz Umsetzung nachhaltiger Strategien, eine kostengünstige Fertigung gewährleistet werden kann.

Im Bereich der Investitionsgüter liegt die Wertschöpfung insbesondere in der Herstellungsphase, da sich die Fertigung dieser Business-to-Business-Geräte durch eine hohe Material- und Energiebereitstellung auszeichnet. Nachdem an diese Geräte beständig wachsende Qualitätsanforderungen gestellt werden und sich die technologischen Prozesse ständig weiterentwickeln, verfügen diese Anlagen über verhältnismäßig kurze Innovationszyklen. Darüber hinaus weisen sie einen modularen Aufbau auf, der eine Separation in Einzelkomponenten ermöglicht. Die Verlängerung der Anlagennutzungsdauer und damit die Bewahrung der zu ihrer Fertigung eingesetzten Ressourcen stellt die im Sinne der Integrierten Produktpolitik sinnvollste Strategie für diese Produktkategorie dar. Neben der Wiederverwendung von Komplettsystemen wurden die Komponentenverwendung, die Ersatzteilbereitstellung und letztendlich die Verwertung als weitere Maßnahmen dargestellt. Das Refurbishing medizinischer (Angiographie-) Systeme, welche als Beispielprodukte mit besonderen Anforderungen an Qualität und Sicherheit aufgrund der Anwendung am Menschen dienen, verdeutlichte, dass unter Berücksichtigung des für die Wiederaufarbeitung notwendigen Aufwands eine Steigerung der Aufnahmeanzahl um 50% gegenüber des ersten Produktlebenszyklus eine Energieeinsparung vergleichbar mit dem Energieverbrauch eines Drei-Personen-Haushaltes über einen Zeitraum von fünf Jahren bewirken kann.

Einen wesentlichen Aspekt nachhaltiger Produktentwicklung im Sinne der Integrierten Produktpolitik stellt die verwertungsgerechte Konstruktion dar, deren Bedeutung anhand schnelllebiger Massenprodukte verdeutlicht wurde. Diese Geräte des modernen Informationszeitalters weisen aufgrund der rasanten technologischen Entwicklung sehr kurze Innovationszyklen auf, so dass sie nach einer relativ kurzen Nutzungsphase durch Neugeräte ersetzt werden und dadurch sehr hohe Rücklaufquoten aufweisen. Die Forderung der EU-Richtlinie WEEE, die Baugruppe aus Mobiltelefonen zu entnehmen, motivierte die Untersuchung deren demontagegerechter Gestaltung. Die durchgeführte Analyse zeigte, dass sich die Hersteller bislang nicht auf die Anforderungen der Richtlinie eingestellt haben und das Potenzial zur Umsetzung einer Neuentwicklung von Mobiltelefonen unter ganzheitlichen Gesichtspunkten – insbesondere hinsichtlich der Demontagegerechtigkeit – noch ungenutzt ist.

Motiviert durch die Verpflichtung, die Baugruppe aus Mobiltelefonen zu entnehmen, entstand der Ansatz, darauf befindliche Bauelemente einem ReUse zu unterziehen und dadurch die Nutzungszeit dieser bisweilen hochintegrierten Komponenten zu verlängern. Dabei lag der Fokus auf Ball-Grid-Arrays, die sich durch ihre Kontaktierung auf der Bauelementunterseite auszeichnen. Die schwere Zugänglichkeit der Lötstellen erfordert ein Selektivverfahren, um das Bauelement von der Baugruppe zu entfernen. Nachdem die Integrierte Produktpolitik die Integration von Ökologie und Ökonomie zum

Ziel hat, der Selektivprozess jedoch als Einzelverfahren manuell durchzuführen ist, was hohe Kosten nach sich zieht, wurden Alternativverfahren untersucht. Diese sollten sowohl die Prozesskosten reduzieren und gleichzeitig den Durchsatz erhöhen. Neben dem Einsatz von Lasern wurde daher die Verwendung von Säuren und flüssigem Stickstoff untersucht. Alle drei Verfahren lieferten gute Ergebnisse, die Bauelemente schadenfrei von der Baugruppe zu lösen. Weiterführende Untersuchungen des Einflusses auf die Lebensdauer dieser hochsensiblen Bauelemente konnten nicht durchgeführt werden, so dass die erzielten Prozessergebnisse als Grundlage weiterer Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der nachhaltigen Verwendung integrierter Bauelemente zu verstehen sind.

Insgesamt zeigt die vorliegende Arbeit, dass die Integrierte Produktpolitik einen viel versprechenden Ansatz darstellt, der aufgrund der hohen Flexibilität und der zur Verfügung stehenden Instrumente auf alle Produktkategorien angewandt werden kann. Darüber hinaus wurde verdeutlicht, dass die im Umlauf befindlichen Produkte, trotz der wachsenden Bedeutung umweltrelevanter Aspekte in den vergangenen Jahren, nach wie vor ein großes Optimierungspotenzial aufweisen, wenn sie unter ganzheitlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Ebenfalls wird deutlich, dass Ökologie und Ökonomie miteinander in Einklang stehen, so dass die Umsetzung der Integrierten Produktpolitik ebenfalls für die Wirtschaft ein Instrument der Zukunft darstellt, dessen Bedeutung zukünftig stark wachsen wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Ahrens, A.; Böhm, E.; Heitmann, K.; Hillenbrand, T.: „Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe“, Umweltbundesamt, Berlin, Februar 2003
- [2] Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V., „Produktinformation: Kabel“, PVCplus Kommunikations GmbH, Bonn, Februar 2000
- [3] Basdere, B.: „Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch Anpassen von Mobiltelefonen“, Reihe: Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation, TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb, Berlin, 2004
- [4] Bathe J., Bönker, T., Bracke St., Fetting, T., et.al.: „Leitfaden für die kreislaufgerechte Konstruktion Produktgruppe Pumpen und Kompressoren“, Leitfaden im Rahmen des Verbundprojektes KOMTEG, Dortmund, 1998, ISBN 3-00-003936-8
- [5] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, München
- [6] Beitz, W., Grote, K.-H. (Hrsg.): „Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau“, 19. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997, ISBN 3-540-62467-8
- [7] Bentele, G., Steinmann, H., Zerfaß, A. (Hrsg.): „Dialogorientierte Unternehmenskommunikation. Grundlagen – Praxiserfahrungen – Perspektiven“, Berlin 1996
- [8] Böhnlein, B.: „Verwendung von Teilen aus medizinischen Altanlagen“, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1999, 1. Auflage
- [9] Buchholz, C.: „DEMROP Plus – Design and Evaluation Method for the Recyclability of Electromechanical Products“, In: Birkhofer H., Spath, D., Winzer, P., Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, November 2001
- [10] Buchmann, I.: „Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers“, Second Edition, Cadex Electronics Inc, ISBN: 0968211828, 05/2001
- [11] Cerda, E., Russel, E.: „Laser Soldering Applications for RF Shield Rework“, SMTA Conference Proceedings: Emerging Technologies, Minnesota, 2000
- [12] debis Systemhaus: „CUMPAN – Computergestützte, umweltorientierte Produktanalyse, Ein Programm für die Umwelt“, Benutzerhandbuch V 1.44, Fellbach, 1999
- [13] Deutsche Energieagentur, Pressemitteilung, „Chance für den Handel: Neues Internetportal zum EU-Energie-Label“, 10.03.2003, Berlin

- [14] Eversheim, W., Albrecht, T. Klöckner, R., Mann, E.W.: „Vergleich ökologischer und ökonomischer Bewertung unterschiedlicher industrieller Produktionsverfahren mit Hilfe eines Computerprogramms“, in: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung, Band 1“, VDI-Berichte 1321-1, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [15] Eyerer, P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, Springer Verlag, Berlin, 1996
- [16] Fahrner, M.: „Möglichkeiten und Grenzen der Behandlungs- und Verwertungstechnologie (am Beispiel von Haushaltsgroß- und Kleingeräten)“, Abschlussagung Experten-Forum „Umsetzung der WEEE“: Produktrecycling Umsetzung der EU-Richtlinie WEEE in nationales Recht ElektroG, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart, September 2004
- [17] Feldmann, K., Holzmann, R.: „Qualitätsoptimierung des Nacharbeitsprozesses durch die Analyse des Zuverlässigkeitsverhaltens alternativer Reparaturstrategien“, Tagungsband: „Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik“, VDE Verlag, Berlin, 2002 / S. 295-302 Fellbach, 06./07.02.2002
- [18] Feldmann, K., Melzer, K.: „Implementation of E-waste Legislation in EU Member States, North America and China“, Proceedings of the 11th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering: Product Life Cycle – Quality Management Issues“, Belgrade, Serbia, 20.-22.06.2004
- [19] Feldmann, K., Melzer, K., Trautner, St.: „Integrated Product Policy – Challenge in the Scope of Technology, Economy and Environmental Policy“, Proceedings of the 9th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering: Integrated Product Policy – Chance and Challenge, Erlangen, Germany, 09.-10.04.2002
- [20] Feldmann, K., Melzer, K.: „Integrated Product Policy – A Method for holistic Product Analysis“, Proceedings of the 6th World Congress on Integrated Resources Management, Geneva, Switzerland, 12.-15.02.2002
- [21] Feldmann, K., Melzer, K.: “The Benefit of Integrated Product Policy – Demonstrated by the Second Product Life Cycle of Medical Equipment“, Proceedings of the 10th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering: Engineering for sustainable development – an obligatory skill for the future engineers“, Copenhagen, Denmark, May 2003
- [22] Feldmann, K., Trautner, St., Lohrmann, H., Melzer, K.: „Computer-based product structure analysis for technical goods regarding optimal end-of-life strategies“, Proceedings of the Institution for Mechanical Engineers – ImechE 2001, issue 215, part B, page 683-693
- [23] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München
- [24] Frey, O.: „Aktivitäten der Hersteller – Aufgaben der Unternehmen, Blick nach Europa, B2B-Geschäfte“, Informationstagung des ZVEI, Fürth, 22.06.2004

- [25] Frischknecht R.: „Ökoinventare von Energiesystemen“, ETH Zürich, Zürich, 1996, 3. Auflage
- [26] Funke-Welti, J.: „Organisationskommunikation – Interpersonelle Kommunikation in Organisationen – Eine vergleichende Untersuchung von informalen Kommunikationsstrukturen in fünf industriellen Forschungs- und Entwicklungsbereichen“, Verlag Dr. Kovac, ISBN 3-8300-0232-7, Hamburg, 2000
- [27] Gebhard, K.: „Das QM-Lexikon“, Quality Datenbank, Qualitätsmanagement unter einem D,A,Ch, Hamburg, 2005
- [28] Geschick, S.: „Batterien mit schlechter Bilanz – Der mühsame Weg, die Qualität der Energiespeicher zu verbessern“, Süddeutsche Zeitung, Oktober 1998
- [29] Glauser, Ch., „Die Geschichte des Staubsaugers“, Verlag Orell Füssli, ISBN 3280026814, 2001
- [30] Grieger, S.: „DFE-Tool – Design for Environment“, In: Birkhofer H., Spaht, D., Winzer, P., Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [31] Gumpel, P., Strittmatter, J.: „Formgedächtnis-(FG)-Marknagel zur Knochenverlängerung“, Schlussbericht, Universität Konstanz, April 2000
- [32] Häcker: „Retrofit von Werkzeugmaschinen“, Präsentation, 3. Industriearbeitskreis Produktrecycling, EMAG Maschinenfabrik, Salach, 31.03.2004
- [33] Hauschild, M., Potting, J.: „Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology“, Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2004
- [34] Herrmann, C.: „Ökologische und ökonomische Bewertung des Materialrecyclings komplexer Abfallströme am Beispiel von Elektronikschrott – eine Erweiterung zur Ganzheitlichen Bilanzierung“, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Shaker Verlag, ISBN 3-8322-2374-6, November 2003
- [35] Herrmann, C.: „Werkzeug für die demontage- und recyclinggerechte Produktbewertung“, Tagungsunterlagen zum Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage, SFB 281, Berlin, 20./21.01.2000
- [36] Hierl, S.: „System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Reihe: Fertigungstechnik – Erlangen, Band 145, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004, ISBN 3-87525-198-9
- [37] Hollemann A.F., Wiberg N.: „Lehrbuch der anorganischen Chemie“, 101. Auflage, Verlag Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1995, ISBN 3-11-012641-9
- [38] <http://lca.apme.org/reports/htm/home.htm>; Stand Juli 2001

- [39] Janoschka, G., Umweltamt Stadt Nürnberg (Hrsg.): „Integrierte Produktpolitik – Leitfaden: Management ökologischer Produktentwicklung“, Netzwerk COUP 21, 3. Auflage, Nürnberg, 2004
- [40] Kämpfert, Marco: “Area-Array-Bauelemente – Popcorn-Effekt inspizieren”, TechnoLab GmbH, Fachveröffentlichung: QZ, Jahrgang 49, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [41] Katalyse (Hrsg.): „Umweltlexikon“, Institut für angewandte Umweltforschung in Kooperation mit oekoserve GmbH, Köln, 2005
- [42] Klemisch, H.: „Integrierte Produktpolitik und Umweltmanagement – Wege zu Umweltschutz und Produktverantwortung?“, Beitrag für uwf Schwerpunktheft „Konzepte für integrierte Produkt- und Dienstleistungssysteme“, März 2004
- [43] Kreis W.: „KOMTEG – Modulares System zur Kreislaufführung komplexer technischer Gebrauchsgüter – Produktgruppe Pumpen und Verdichter, Forschungsbericht Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Lehrstuhl für Maschinenelemente, -gestaltung und Handhabungstechnik, Dortmund, 1998 – 2000
- [44] Kuttkat, B.: „Emag – Modernisierte Gebrauchtmachinesollen neuen Kundenkreis erschließen“, Artikel, MM MaschinenMarkt, Würzburg, 26.06.2003
- [45] Kuttkat, B.: „Ein zweites Leben für Maschinen“, Artikel, MM MaschinenMarkt, Würzburg, 04.09.2003
- [46] Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, München
- [47] Little, Arthur D.: „Wirtschaftliche Auswirkungen der EU-Stoffpolitik auf die Elektrotechnik- und Elektronikindustrie und ihre Wertschöpfungskette“, Bericht zum Forschungsprojekt, Wiesbaden, 18. November 2002
- [48] Meedt, O.: „Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechologien und optimierte Produktgestaltung“; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Reihe: Fertigungstechnik – Erlangen, Band 83, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998, ISBN 3-87525-108-3
- [49] Meerkamm, H., Rosemann, B., Steinmetzer H.-C.: „Integrated Product Policy in Bavaria and the Bavarian Network for the Development of Innovative Technologies (BENefiT)“, Conference “Electronics Goes Green 2000+“, Berlin, 11.-13.09.2000
- [50] N.N.: „320 Millionen Chinesen telefonieren mobil“, Artikel, Heise Medien Group, Hannover, 23.11.2004
- [51] N.N.: „JIM-Studien (Jugend, Information und (Multi-)Media)“, Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, Studien von 1998 bis 2004
- [52] N.N.: Arbeits- und Ergebnisbericht 1996 – 1998 des Teilprojektes A5, Sonderforschungsbereich 392: „Entwicklung umweltgerechter Produkte: Methoden, Arbeitsmittel und Instrumente“, TU Darmstadt, Februar 1998

-
- [53] N.N.: „BGA Reballing Instructions“, Produktinformation, Winslow Automation, Inc., Hillister, CA 95023, 2003
- [54] N.N.: Infoblatt, Bund Naturschutz in Bayern e.V., Bamberg
- [55] N.N.: „Ergebnisse des Pilotprojekts IPP in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) – Neue Wege für innovative KMU“, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), 1. Auflage, 2003
- [56] N.N.: „Ergebnisse des Pilotprojektes IPP in der Medizintechnik 2003 – Mehr Nutzen für Hochtechnologieprodukte“ Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), 1. Auflage, 2003
- [57] N.N.: “Fifth Environmental Action Programme – Towards Sustainability”, Official Journal of the European Community, No C 138/5, 17.05.1993
- [58] N.N.: “GaBi 4: Software-System and Databases for Life Cycle Engineering”, IKP, Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, April 2003
- [59] N.N.: „Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik“, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, KOM (2001) 68 endgültig, Brüssel, 07.02.2001
- [60] N.N.: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, KOM (2000) 469 endgültig, Brüssel, 26.07.2000
- [61] N.N.: „Integrierte Produktpolitik – Instrumente aus der Praxis am Beispiel Automobil“, IHK für München und Oberbayern, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2001
- [62] N.N.: „Lead Free Alloys in SolderQuick BGA Preforms“, Application Note, Winslow Automation, Inc., Hillister, CA 95023, 2003
- [63] N.N.: „Mitteilung [SEC (2004)1535] zu den europäischen Vorschriften zur elektronischen Kommunikation und Märkte 2004“, Europäische Kommission, Brüssel, 02.12.2004
- [64] N.N.: „Ökonomie sozialwirtschaftlicher Unternehmen“, Vorlesungsskript, Fachhochschule Nordhausen, Studiengang Sozialmanagement, Nordhausen, 12/2004
- [65] N.N.: „PACS – Refurbishment & Upgrade“, Provider Information, ABB, Spanien, 21.08.2003
- [66] N.N.: „Produktinformation Martin Hot-Jet-05“, Martin GmbH, Wessling, 2005
- [67] N.N.: „Produktinformation Reinigungsroboter RC 3000“, Alfred Kärcher GmbH, Wien, 2004
- [68] N.N.: „Produktinformation Reinigungsroboter Sensor Cruiser VSR 8000“, Siemens Elektrogeräte GmbH Deutschland, 2005

- [69] N.N.: "Refurbishment project for NEDL distribution substations reaches important milestone as ABB delivers first transformer", Provider Information, ABB, 02.05.2001
- [70] N.N.: „Scientists make phone that turns into a sunflower“, Reuters, Artikel vom 06.12.2004
- [71] N.N.: „Shelf Life of Solder Quick BGA Preforms“, Application Note, Winslow Automation, Inc., Hillister, CA 95023, 2003
- [72] N.N.: „Siemens Qualitätshandbuch“, Bereich Medical Solutions der Siemens AG, Version 1.0, Stand Mai 2001
- [73] N.N.: „Telekommunikation in der EU“, Pressemitteilung 20/2005, Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 07.02.2005
- [74] N.N.: „umberto“, www.umberto.de, Stand: Januar 2005
- [75] N.N.: "Japaner stellen Prototypen einer Brennstoffzelle für Handys vor", VDI-Nachrichten, Ausgabe Nr. 42, 15. Oktober 2004
- [76] N.N.: „Vertrag über die Europäischen Union“ (Konsolidierte Fassung 1997), Amtsblatt Nr. C 340 vom 10. November 1997
- [77] N.N.: „Säuren“, Wikipedia, freie Enzyklopädie, Wikimedia Foundation Inc., Florida, 2005
- [78] N.N.: „Weltweiter Handymarkt wuchs 2003 um 20,5 Prozent“, Artikel, Heise Medien Group, Hannover, 10.03.2004
- [79] N.N.: „Wo das alte Handy weiterlebt“, Gallileus, internetbasiertes Wissenschaftsportal, Berlin, 29.07.2003
- [80] N.N.: „www.capinc.org/capfone.htm“, Internetauftritt der Firma CAP Inc., Cleveland, Ohio, Stand Mai 2005
- [81] N.N.: „www.greenersolutions.de“, Internetauftritt der Firma Greener Solutions, München, Stand Mai 2005
- [82] N.N.: „www.recellular.net“, Internetauftritt der Firma Recellular Inc., Dexter, Michigan, Stand Mai 2005
- [83] N.N.: „www.sfb281.tu-berlin.de“, Internetauftritt des Sonderforschungsbereiches 281 „Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen“, Berlin, Stand Mai 2005
- [84] Pakalski, I.: „Weltweiter PDA-Markt bricht um 12 Prozent ein“, Golem.de, Zeitschrift für Soft- und Hardware, Internet, Telekommunikation und Entertainment, Berlin, 28.04.2004
- [85] Pearce, S.: „New life for old switchgear“, Provider information, ABB, South Africa 2005

- [86] PréConsultants: „SimaPro 6 – Introduction to LCA with SimaPro“, User Manual Version 3.0.1, Amersfoort, Holland, September 2004
- [87] Radtke, M.: „BAMOS-Baustruktureditor“, In: Birkhofer, H., Spath, D., Winzer, P., Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfadens für Entwicklung und Konstruktion“, Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, November 2001
- [88] Rose, C. M., Stevels, A., Ishii, K.: „A New Approach to End-of-Life Design Advisor (ELDA)“, Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium for Electronics and the Environment Conference, San Francisco, CA, Mai 2000
- [89] Rosemann, B., Meerkamm, H.: „Methodical framework and examples of an environmental innovative product development“, Proceedings of the CIRP 9th international seminar on Life Cycle Engineering, Integrated Product Policy – Chance and Challenge, Erlangen, Germany 09.-10.04.2002
- [90] Russel, E.: „Photonic soldering for rework applications“, In: SMTA-International: Proceedings of the Technical Program, San Jose, California, September 12.-16. 1999, S. 440-445
- [91] Saechtling, H.: Kunststoffaschenbuch, Hanser Verlag, München, Wien, 1992
- [92] SAFT, Präsentation „Technologies“, Nürnberg, 2000
- [93] SAFT, Datenblätter unterschiedlicher Akkumulatorsysteme, Nürnberg, 2000
- [94] Scheel, W.: „Baugruppentechologie der Elektronik / Montage“, Verlag Technik Berlin ISBN 3-341-01100-5, Eugen G. Leuze Verlag Saulgau, ISBN 3-87480-134-9, Berlin 1997
- [95] Scheller, H.: „Automatisierte Demontage und recyclinggerechte Gestaltung elektronischer Flachbaugruppen“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Reihe: Fertigungstechnik – Erlangen, Band 74, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997, ISBN 3-87525-099-0
- [96] Schlögl, M.: „Recycling von Elektro- und Elektronikschrott“, 1. Auflage, Vogel Verlag, ISBN 3-8023-1531-6, Würzburg, 1995
- [97] Schnappauf, W.: „Umweltschutz in Bayern? Zukunftsverantwortung für unsere Heimat“, Regierungserklärung, Manuskriptfassung, München, 03.04.2003
- [98] Schneider, B.: „Penthesilea – Die andere Kultur und Kunstgeschichte“, Bern, Zytglogge Verlag, 1999
- [99] Schwegler, T.: „E-PAC Referenzanwendungen“, Informationsmaterial der Firma DMT GmbH, Holzgerlingen, Mai 2000
- [100] Seilnacht, T.: „Didaktische Medien“, Lexikon für naturwissenschaftliches Arbeiten, Bern, 2005

- [101] Seliger, G.: „Global Sustainability - A Future Scenario“, In: Proceedings Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, Berlin, Germany, 29.09. - 01.10.2004, S. 29 - 35
- [102] Seliger, G.; Franke, C.; Ciupek, M.; Basdere, B.: “Process and Facility Planning for Mobile Phone Remanufacturing”, In: CIRP Annals 2004 Manufacturing Technology, Krakow, Polen, 22.08. - 28.08.2004, S. 9 -12
- [103] Siemens W., Vest H.: „Umwelt Handbuch – Verwertung und Beseitigung von Elektronikschrott“, Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, 1999
- [104] Specker, W.: „Prozeßüberwachung beim Schweißen mit Nd:YAG-Lasern“, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 614, VDI-Verlag, ISBN 3-18-361402-2, Düsseldorf, 2002
- [105] Steinmetzer, H.-Ch.: „Integrated Product Policy as a Tool in Environmental Protection – the Administrative Point of View“, Proceedings of the 9th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering: Integrated Product Policy – Chance and Challenge”, Meisenbach Verlag, ISBN 3-87525-167-9, Erlangen, April 2002
- [106] Stobbe, I., Schrank, K., Weickardt, C., Griese, H., Reichl, H.: „ReUse through In-House Repair – Quality Assured Disassembly of Electronic Boards and Components”, Proceedings of the Colloquium e-ecological Manufacturing, uni-edition GmbH, ISBN 3-937151-01-X, Berlin, März 2003
- [107] Tanskanen, P., Takala, R.: “Concept of a mobile terminal with an active disassembly mechanism”, International Electronics REycling Congress, Davos, January 2002
- [108] Theis-Berglmair, A. M.: „Organisationskommunikation – Theoretische Grundlagen und empirische Forschungen“, LIT Verlag, ISBN 3-8258-6855-9, Münster, 2003
- [109] Trautner, S.: „Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Reihe: Fertigungstechnik – Erlangen, Band 134, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002, ISBN 3-87525-177-6
- [110] Trueb, Lucien F., Rüetschi P.: „Batterien und Akkumulatoren – Mobile Energiequellen für heute und morgen“, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- [111] Umweltbundesamt, IFEU-Institut.: „Erfasste Abfallaufkommen an Elektrogeräten aus Abfallbilanzen der Bundesländer“, Zusammenstellung auf Basis von Angaben der Bundesländer, Berlin, 2004
- [112] Umweltbundesamt: „Was ist EcoDesign?“, Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung, Verlag form, Praxis-Reihe Bd. 7, ISBN 3-89802-025-8, 2000

- [113] Weber, J.: „Konzept eines rechnergestützten Assistenzsystems für die Entwicklung umweltgerechter Produkte“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 1997
- [114] Wulfert, F.-W.: „Stand und Entwicklung Pb-freier Anschlüsse und bei höheren Temperaturen verarbeitbarer Gehäuse“, Beitrag zum Hilpert Seminar „Bleifrei“, Baden-Dättwil, Schweiz, April 2004
- [115] Ziskoven, U.: „Naturschutz heute“, Naturschutzbund Deutschland (NABU), Ausgabe 04/2001, Bonn

Normen und Rechtsvorschriften

- [116] DIN EN ISO 14001: „Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2004), Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [117] DIN EN ISO 14040: „Umweltmanagement – Produkt-Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [118] DIN EN ISO 14041: „Umweltmanagement – Ökobilanz; Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [119] DIN EN ISO 14042: „Umweltmanagement – Ökobilanz; Wirkungsabschätzung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [120] DIN EN ISO 14043: „Umweltmanagement – Ökobilanz; Auswertung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [121] Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), 27 January 2003
- [122] Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS), 27 January 2003
- [123] Verordnung (EWG) Nr. 1836/93 des Rates vom 29. Juni 1993 über die freiwillige Beteiligung gewerblicher Unternehmen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS), Amtsblatt Nr. L 168 vom 10/07/1993 S. 0001 - 0018
- [124] Entwurf der DIN 48480, „Elektrotechnik; Gebrauchstauglichkeit und Qualität bei erneuter Verwendung von Teilen und Geräten, Anforderungen und Prüfungen“, September 2000
- [125] „Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten“, (ElektroG), Entwurf in der Fassung des Kabinettsbeschlusses vom 01.09.2004
- [126] „Gesetz zur Umsetzung von Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaften auf dem Gebiet der Energieeinsparung bei Geräten und Kraftfahrzeugen, EnVKG – Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz“, 30. Januar 2002 , BGBl. I vom 6.2. 2002 S. 570; 25.11.2003 S. 2304
- [127] „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)“, BGBl. Nr. 66 vom 06.10.1994 S. 2705 und BGBl. Nr. 4 vom 28.01.2004 S. 82

- [128] IPC/JEDEC J-STD-020C: „Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices”, Joint Industry Standard, July 2004
- [129] IPC/JEDEC J-STD-033A: „Handling, Packing, Shipping and Use of Moisture/Reflow Sensitive Surface Mount Devices”
- [130] JEP95-MS-034: „ Square Plastic Ball Grid Array Family (S-PBGA-B/PBGA)”, January 2003.
- [131] JEP95-MS-028: „Rectangular Plastic Ball Grid Array Family, 1.27, 1.00mm pitch (R-PBGA-B)”, May 2000.
- [132] JEP95-MO-156: „Square Ceramic Ball Grid Array Family, 1.00, 1.27 and 1.50mm pitch (CBGA-B)”, April 2000.
- [133] JEP95-MO-157: „Rectangular Ceramic Ball Grid Array Family, 1.00, 1.27 and 1.50mm pitch (CBGA-B)”, April 2000.
- [134] JEP95-MO-192: „Low profile square Ball Grid Array Family (S-LBGA-B/LBGA)”, August 2003.
- [135] JEP95-MO-234: „Low profile rectangular Ball Grid Array Family (R-LBGA-B)”, February 2002.
- [136] JEP95-MO-205: „Low profile, Fine Pitch Ball Grid Array Family, 0.80mm pitch (SQ, & Rect.), (LF-XBGA)”, April 2003.
- [137] JEP95-MO-195: „Thin, Fine Pitch Ball Grid Array Family, 0.5mm pitch (TF-XBGA)”, April 2003.
- [138] JEP95-MO-246: „Rectangular, Fine Pitch Thin Ball Grid Array Family, 0.65mm pitch (TFR-XBGA)”, September 2003.
- [139] JEP95-MO-228: „Thin, Fine Pitch Ball Grid Array Family, Dual Pitch (Square) (TF-XBGA)”, March 2001.
- [140] JEP95-MO-225: „Very Thin profile, Fine Pitch Ball Grid Array Family, 0.50/0.65mm pitch (SQ/Rect.), (VF-XBGA)”, November 2000.
- [141] JEP95-MO-207: „Square & Rectangular Die-Size Ball Grid Array Family (X-DSBGA)”, April 2004.
- [142] JEP95-MO-211: „Die-Size Ball Grid Array, Fine Pitch, Thin/Very Thin/ Extremely thin Profile (X-DSBGA)”, June 2004.
- [143] JEP95-MO-233: „Rectangular Die-Size, Fine dual pitch Ball Grid Array Family (TFR-XBGA-N)”, February 2003.
- [144] JEP95-MO-242: “Rectangular Die-Size, stacked Ball Grid Array Family, 0.80mm pitch (X-DSBGA)”, April 2003
- [145] JEP95-MO-149: “Tape Ball Grid Array Family (XBGA-B/TBGA)”, October 2003

- [146] „Gesetz über Medizinprodukte“ (Medizinproduktegesetz – MPG) vom 02. August 1994 (BGBl. I S. 1963 vom 09. August 1994), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 13. Dezember 2001 (BGBl. I S. 2586)
- [147] „Verordnung über die Kennzeichnung von Haushaltsgeräten mit Angaben über den Verbrauch an Energie und anderen wichtigen Ressourcen“, 92/75/EWG, BGBl I 1997, 2616, 30.10.1997
- [148] „Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency and amending Directive 1999/45/EC and Regulation (EC) {on Persistent Organic Pollutants}“, COM(2003) 644, Brussels, 29.10.2003
- [149] „Proposal for a directive of the European Parliament and of the council on establishing a framework for the setting of Eco-design requirements for Energy-Using Products and amending Council Directive 92/42/EEC“, COM(2003) 453 final, Brussels, 01.08.2003
- [150] „Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle“, Amtsblatt Nr. L 194 vom 25.07.1975, S. 39
- [151] „Richtlinie 96/57/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 03. September 1996 über Anforderungen im Hinblick auf die Energieeffizienz von elektrischen Haushaltskühl- und Gefriergeräten und entsprechenden Kombinationen“, Amtsblatt Nr. L 236 vom 18.09.1996, S. 0036 – 0043
- [152] „Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren“ (Batterieverordnung – BattV), BGBl. Teil 1 Nr. 20, 1998, S. 658
- [153] „Vorschlag für eine Entscheidung des Rates zur Änderung des Anhangs der Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zwecks Festlegung von Konzentrationshöchstwerten für bestimmte gefährliche Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“, KOM(2004) 606, 23.09.2004, Brüssel
- [154] „Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen“, (Biostoffverordnung – BioStoffV) BGBl. I 1999, S. 50, letzte Änderung durch Art. 2, Nr. 9 der V vom 18.10.1999, BGBl. I 1999, S. 2059
- [155] „Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen“, Neufassung der Gefahrstoffverordnung, 15. November 1999, BGBl. I, S. 2233

Glossar

AOC	Lehrstuhl für anorganische und analytische Chemie
B2B	Business to Business
BeCAP	Berlin Center for Advanced Packaging
BenefiT	Bayerisches Entwicklungsnetz für innovative Technologien
BGA	Ball-Grid-Array
BITCOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
EAR	Elektro-Altgeräte Register
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
ElektroG	Elektro- und Elektronikgeräte Gesetz
Entlas	Engineering Technology for long-lasting advanced systems
EnVKG	Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz
E-PAC	Electronic Packaging and Assembly Concept
EPP	Expandiertes Polypropylen
ESD	Electro Static Discharge
EUP	Energy Using Products
Fraunhofer IZM	Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration
G-Ware	Gebrauchtware
GRS-Batterien	Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HCl	Salzsäure (Chlorwasserstoff)
HNO ₃	Salpetersäure
IPP	Integrierte Produktpolitik
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council
JIM	Jugend, Information und (Multi-)Media
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschaft-/Abfallgesetz

Li-Ion	Lithium-Ionen
μRFA	Mikrostrahlröntgenfluoreszenzanalyse
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MPFS	Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest
MPG	Medizinproduktegesetz
MSL	Moisture Sensitivity Level
NAFTA	North American Free Trade Agreement
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat (Festkörperlaser)
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-MH	Nickel-Metallhydrid
ÖRE	Öffentlich Rechtliche Entsorger
PBB	Polybromiertes Biphenyl
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PBGA	Plastic-Ball-Grid-Array
PC	Polycarbonat
PDA	Personal Digital Assistent
PMMA	Polymethylmethacrylat
PRT	Peak Reflow Temperature
PS	Polystyrol
QFP	Quad Flat Package
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RH	Relative Luftfeuchte
RoHS	Restriction of the Use of Certain hazardous Substances in Electric- and Electronic Equipment
SIM-Karte	Subscriber Identity Module
SMD	Surface Mounted Device
SMT	Surface Mounted Technology (Oberflächenmontage)
SO	Small outline Bauelemente
THT	Trough Hole Technology
WEEE	Waste of Electric- and Electronic Equipment
WKP	Warenförmiges Kuppelprodukt
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie

Summary

The product-life-cycle includes a multiplicity of individual process-steps, as well as several responsible institutions, taking influence on the environmental burden in a direct or indirect manner. Within the life-cycle the product-development represents the phase of highest importance, since approximately 80% of the occurring energy-consumption is predefined during the design-phase [112]. But for the development of holistic products it is essential, to take the manufacturing, utilization and disposal into consideration.

Political activities of the European Union support holistic product development by establishing guidelines concerning the waste of electric and electronic equipment as well as the restriction to use certain hazardous substances in new products. Furthermore, declarations are requested in the field of chemical-usage and the generation of environmental product profiles leads to a higher transparency of environment-related data.

In the first part of this paper the implementation of European environmental law into national legislation concerning the electro- and electronic-industry was discussed. Basically, the responsibility of the manufacturer for the disposal was accentuated, since this influences the entire product-life-cycle, especially the dismantling- and recycling-compatible product-development. Based on the German law "ElektroG", the Integrated Product Policy (IPP), representing a voluntary measure of industry, was introduced, reinforcing the thought of integrating sustainability into industrial processes.

The implementation of IPP in business processes can only successfully be implemented, if besides the manufacturer, both, the consumer and the recycling company have full responsibility. As their interests are very heterogeneous, the importance of interdisciplinary communication along the entire product-life-cycle was presented. Integrated Product Policy represents a strategy not following a strict demand except for ecological and economical optimisation along the entire product life-cycle. The related product-categories were identified, showing a special suitability of their characteristics to product and process improvement.

Classical mass goods are characterised by their low weight, their high material-variety and low costs. Typically their energy-consumption primarily takes place during use. Thus, a complete product development has been worked out as a target for the realisation of IPP. On the basis of a "vacuum cleaner" the high optimisation-potential of this already 100 years old household-appliance has been demonstrated.

In the field of high-level investment goods, the creation of values mainly takes place during manufacturing, since the production of this Business-to-Business equipment is characterised by high material and energy consumption.

Regarding rising quality requirements and a continuous improvement of the technological process development, these systems show quite short innovation-cycles. Furthermore, they are designed in a modular manner, ensuring the possibility of separating complete systems into single components.

The extension of the utilisation phase proves that the refurbishing process represents the most meaningful strategy for this product-category regarding the conservation of material and energy resources.

Besides the reuse of complete systems and components, the supply of spare parts and finally the recycling were presented as further refurbishing related measures. Medical (angiography-) systems have high quality and security requirements due to their use for humans. The refurbishing of these investment-goods showed that the number of image acquisitions increased by 50 percent during a second product life cycle causing total energy-savings comparably with the energy-consumption of a three-person-household over a time period of 5 years.

Design for effective recycling, whose meaning was shown on the basis of modern fast moving mass-products, represents an essential aspect of holistic product-development. The appliances of the modern information-era show extremely short innovation-cycles. Considering the rapid technological development they are replaced after a short utilization-phase by new devices. The demand of the EU-guideline WEEE for removing the printed circuit board (PCB) from mobile phones motivated to examine existing products concerning their dismantling compatible design. The analysis showed that the manufacturers are not yet prepared to fulfil the requirements of the guideline. The potential of mobile phones regarding the holistic product development is not practised yet.

As the WEEE requests to remove the PCB from mobile phones, the ReUse of high-integrated electronic components was considered. Thereby, Ball-Grid-Arrays, characterised by their solder joints at the bottom of the component, were evaluated. The difficult accessibility of the solder joints required a selective-procedure in order to remove the BGA from the PCB.

Integrated Product Policy focuses on ecological and economical aspects within its philosophy, thus, alternative processes to the cost-intensive selective remanufacturing process were examined as laser technology, the use of acids and liquid nitrogen. The three examined methods showed good results removing the BGA from the PCB without damage. Continuative examinations regarding the influence on the lifespan of each single method could not be carried out. Thus, the presented results have to be understood as fundamental research for further development regarding the ReUse of electronic components.

Finally this paper demonstrates the flexibility of Integrated Product Policy, representing a promising approach, being applicable for all kinds of product-categories. Further on, it was clarified that established products still obtain a high optimisation potential from a holistic point of view. Additionally it became obvious that ecology and economy are consistent. Integrated Product Policy represents a valuable instrument for future industrial processes that increasingly gains importance.

Lebenslauf

Katrin MELZER

Geboren am 08. Juli 1971 in Solingen

Ledig

09/78 – 08/82	Grundschule Klauberg Solingen
09/82 – 05/91	Gymnasium Schwertstraße Solingen
10/91 – 01/00	Studium der Elektrotechnik Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)
04/00 – 03/05	Wissenschaftliche Angestellte Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktions- systematik Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann