Günter Fleischer

Produktionsintegrierter Umweltschutz

EF

EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH

Die Deutschen Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Produktionsintegrierter Umweltschutz / Günter Fleischer. -
Berlin : EF-Verl. für Energie- und Umwelttechnik, 1994
ISBN 3-924511-81-0
NE: Fleischer, Günter [Hrsg.]

ISBN 3-924511-81-0

Copyright: Professor Dr.-Ing. Karl Joachim Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten
Verlag: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH
Berlin 1994
Redaktion:Renate Klimke
Druck: E. Mühlthaler´s Buch- und Kunstdruckerei GmbH, München
Buchbinderische Verarbeitung: Conzella - Urban Meister, München

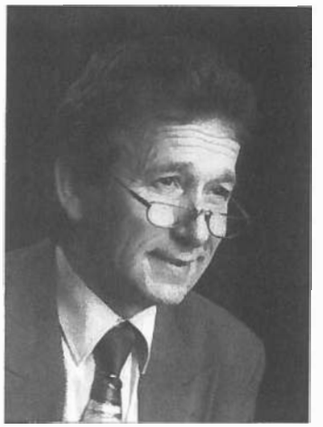
Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Kein Titel dieses Buches darf ohne die Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form -

durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendeines anderen Verfahren - reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Warenzeichen: Wenn Namen, die in der Bundesrepublik Deutschland als Warenzeichen eingetragen sind, in diesem Buch ohne besondere Kennzeichnung wiedergegeben werden, so berechtigt die fehlende Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß der Name nicht geschützt ist und von jedermann verwendet werden darf.

EF

EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH



Prof. Dr.-Ing.
Günter Fleischer

Vorwort

Integrierter Technischer Umweltschutz

Mit dem vorliegenden Buch wird der Tatsache Rechnung getragen, daß der in der Vergangenheit benutzte Titel „Vermeidung und Verwertung von Abfällen“ das tatsächliche Spektrum der Arbeitsbereiche, die innerhalb der vorsorgenden Abfallwirtschaft bearbeitet und erforscht werden, nicht umfassend widerspiegelt. Es handelt sich um die Summe der technischen und organisatorischen Maßnahmen, die zur nachhaltigen Entlastung der Umwelt führen und die mit dem neugewählten Buchtitel „Integrierter Technischer Umweltschutz“ zu beschreiben sind. Dazu gehören selbstverständlich die Vermeidung und Verwertung von Abfällen, aber auch die Vermeidung und Verringerung von Emissionen über den Luft- und Wasserpfad, die Senkung der Schädigungspotentiale der erzeugten Emissionen, die Erhöhung der Lebensdauer der Produkte, die Verbesserung der Kreislauffähigkeit derselben. Die technische Basis dieses integralen stoff- und prozeßbezogenen Ansatzes ist die Werkstoffkunde, die Verfahrens- und Fertigungstechnik sowie die Konstruktionstechnik.

Neben diesen technischen Aspekten des „Integrierten Technischen Umweltschutzes“, der sich in produkt-, produktions- und prozeßintegrierten Umweltschutz gliedert, sind die systemanalytischen Instrumente und Umweltmanagementsysteme zur objektiven Bestimmung, zur Minimierung und zur Überwachung der durch Produkte, Werkstoffe, Betriebe, Anlagen usw. verursachten Umweltbelastungen wesentlicher Bestandteil dieses Themenkreises. Diese Instrumente sind, abhängig von den gewählten Systemgrenzen, die ökologische Betriebsoptimierung, die gleichzeitig Basis für das Öko-Audit ist, das Öko-Audit und die Ökobilanz.

Mit der Einleitung wird das Feld des integerierten technischen Umweltschutzes sowie ein neues Förderkonzept des BMFT in diesem Bereich vorgestellt. Die Industrie nennt ihre Strategien zum produktionsintegrierten Umweltschutz. Die Mittel und Möglichkeiten werden an Beispielen der Werkstofforschung, der abfallvermeidenden Produktgestaltung, der Energieeinsparung bei der Herstellung von Stahlblechen und anderen Beispielen aus der Industrie dargestellt. Im Bereich der ökologischen Betriebsoptimierung werden Anwendungsfälle aus Betrieben der Lackherstellung, der kunststoffverarbeitenden Industrie sowie einer Aluminiumgießerei vorgestellt.

Aufbauend auf der ökologischen Betriebsoptimierung wird aus Wissenschaft und Praxis über den Stand der Entwicklung des mit der Verordnung vom 29.6.1993 von der EG geschaffene Öko-Audit-Systems wie über die praktischen Erfahrungen bei der Durchführung berichtet. Die heutigen Möglichkeiten und Grenzen auf diesem Gebiet genauso wie auf dem der Ökobilanzierung werden durch die Beiträge verdeutlicht und mit Praxisbeispielen unterlegt.

Berlin, Oktober 1994

Prof. Dr.-Ing. Günter Fleischer
Institut für Technischen Umweltschutz
- Fachgebiet Abfallwirtschaft -

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

Produktionsintegrierter Umweltschutz 7
Günter Fleischer

"Produktionsintegrierter Umweltschutz" Ein neues Förderkonzept des BMFT 31
Knut Jäger

Strategien der Industrie zum produktionsintegrierten Umweltschutz 37
Hans-Jürgen Schmidt

2 (Mittel) Möglichkeiten des produktionsintegrierten Umweltschutzes

Integrierte Werkstofforschung - Perspektiven und Konsequenzen 55
Martin Socher

Wege zur abfallvermeidenden Produktgestaltung 91
Sven Grieger, Andreas Wende

Ökonomische und ökologische Aspekte des produktionsintegrierten Umweltschutzes am Beispiel einer Brauerei 125
Horst Chmiel, Wulf Clemens, Martin Kaschek, Valko Mavrov

Herausforderungen des Umweltschutzes an den Werkstoff Stahl 135
Jürgen Philipp, Werner Theobald

Energieeinsparung durch endabmessungsnahe Herstellung von Stahlblechen 165
Wolfgang Bleck, Winfried Dahl, Peter Hamacher

Solarzellen - Stand der Entwicklung und Trends 181
Wolfgang Wettling

Die Reststoffsituation in Werften unter besonderer Berücksichtigung der Vermeidung und Verwertung von Strahlmitteln 201
Burkhard Beninger, Erwin Wolf

3 Anwendungsfälle der ökologischen Betriebsoptimierung

Optimierung der betrieblichen Entsorgung durch Abfallwirtschaftsberater/innen 217
Hans-Peter Obladen

Stoffflußanalyse in einem Betrieb der Lackherstellung 223
Burkhard Berninger

Die ökologische Betriebsoptimierung am Beispiel eines Fotogroßlabors 239
Günter Fleischer, Jürgen Ringe

Ökologische Betriebsoptimierung in einem Betrieb der Kunststoff-verarbeitenden Industrie 256
Jens Kretschmer

Optimierung des Aluminiumkreislaufs 265
Lutz-Peter Pape

Ökologische Betriebsoptimierung am Beispiel einer Aluminium-Gießerei 279
Roland Schilling

4 Umwelt-Audit

Das Umwelt-Audit aus der Sicht eines Umweltverbandes der Wirtschaft 297
Maximilian Gege

Prinzipien des Umwelt- und Qualitäts-Management 305
Wolfgang Dreger

Aufbau eines Umweltmanagementsystems für die MHKW-Neustadt .. 345
Johann Matcher, Hans-Joachim Berner

Erfahrungen bei der Durchführung des Umwelt-Audits 357
Werner Franke, Heinz Kottmann

Praxisbericht über betriebsinterne Umwelt-Audits bei der Firma Dr. August Oetker 371
Günter Larisch

Anforderung an Checklisten für Umwelt-Audits 373
Ernst-G. Zeschmann

5 Methoden und Anwendungsfälle der Ökobilanzierung

Aktuelle Diskussion zur Methodik der Wirkungs-Ökobilanzierung, ihr Einsatz in der Abfallwirtschaft 381
Monika Herrchen, Werner Klein

Ökobilanzen als betriebliches Planungsinstrument bei der Sonder-abfallbehandlung 403
Hilmar Brunn, Claudine Kippelen, Otto Rentz, Thomas Sprengler

Energie und Transport in Ökobilanzen 427
Volrad Wollny

Konzept einer ganzheitlichen Bewertung für industrielle Fragestellungen 437
Joachim Diener

Diskussion verschiedener Bewertungskonzepte für die Ökobilanz aus der Sicht der Chemischen Industrie 455
Franz Saykowski

Stoff- und Energieflußanalyse für die Aluminium-Dose 467
Paul-W. Gilgen, Robert Ackermann, Günter Fleischer,

1

Einführung

Integrierter Technischer Umweltschutz - Wege zum umweltfreundlichen Werkstoff und zur ökologischen Betriebsoptimierung -

Günter Fleischer

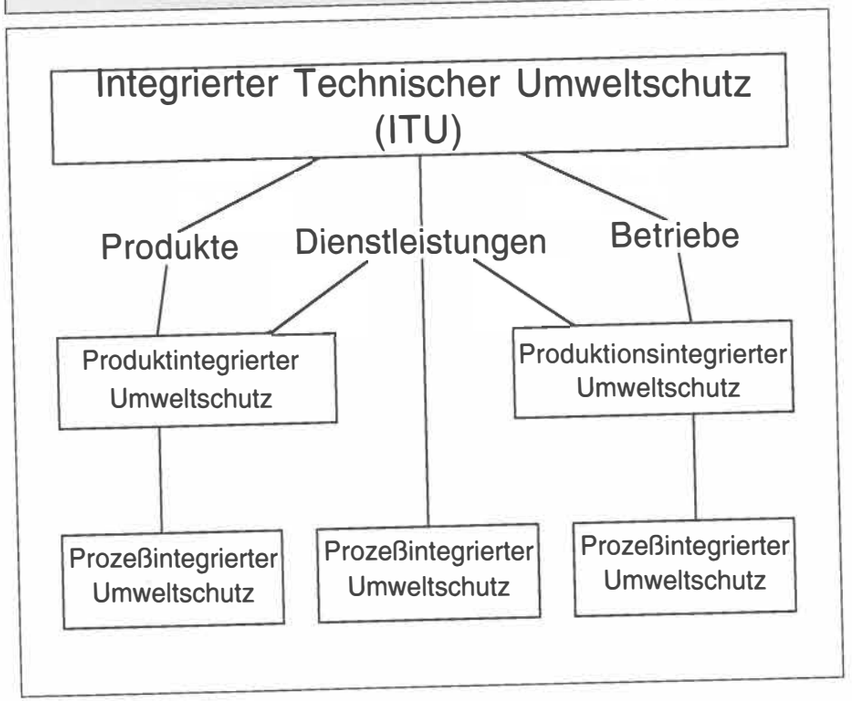
1. Einleitung ... 8
2. Werkstoffe im Integrierten Technischen Umweltschutz (ITU) ... 9
2.1. Der umweltfreundliche Werkstoff ... 10
2.1.1. Definition und Eingrenzung ... 10
2.1.2. Beeinflussung der Umweltbelastungen ... 14
2.1.3. Abhängigkeiten der Werkstoffe, der Technik und der Konstruktion untereinander ... 16
2.2. Wege zum umweltfreundlichen Werkstoff ... 19
2.2.1. Optimierung der Umweltverträglichkeit ... 19
2.2.2. Auswahl des umweltfreundlichen Werkstoffes ... 21
2.2.3. Entwicklung umweltfreundlicher Werkstoffe ... 22
2.3. Werkzeug zur Bestimmung der Umweltverträglichkeit eines Werkstoffes ... 23
3. Ökologische Betriebsoptimierung im produktionsintegrierten Umweltschutz ... 24
3.1. Ist-Analyse ... 24
3.1.1. Strukturanalyse ... 24
3.1.2. Festlegung der Systemgrenzen ... 25
3.1.3. Input-Output-Analyse ... 26
3.1.4. Prüfung der Einhaltung von Umweltstandards ... 26
3.1.5. Bestimmung des Schädigungspotentials ... 27
3.2. Identifizierung von Potentialen zur Umweltentlastung ... 27
3.3. Handlungsempfehlungen ... 27
3.4 Umsetzung der Empfehlungen und Soll-Ist-Vergleich ... 28
4. Zusammenfassung ... 28
5. Literatur ... 30

1. Einleitung

Der Integrierte Technische Umweltschutz (ITU) umfaßt alle technischen Maßnahmen und Methoden, die zur Minimierung der durch Produkte, Dienstleistungen, Betriebe und Prozesse verursachten Umweltbelastungen führen. Zu den jeweils innerhalb der entsprechenden Systemgrenzen in ihrer Gesamtheit nachhaltig zu minimierenden Umweltbelastungen gehören die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs, das heißt die Reduzierung des Ge- bzw. Verbrauchs von Stoffen und Energie sowie die Verringerung der erzeugten Abfälle und der anderen Emissionen in Quantität und Qualität (Schädigungspotential). Bei dem Integrierten Technischen Umweltschutz handelt es sich um einen ganzheitlichen systemanalytischen Ansatz, der auch die jeweiligen Wechselwirkungen, die aus den technischen Einzelmaßnahmen resultieren, berücksichtigt. Dies ist die Voraussetzung dafür, daß innerhalb des betrachteten Systems die Summe der Umweltbelastungen tatsächlich minimiert werden können.

Wie in Bild 1 dargestellt, kann der Integrierte Technische Umweltschutz entsprechend dem zu bearbeitenden System in produkt-, produktions- bzw. prozeßintegrierten Umweltschutz unterteilt werden.

Bild 1: Gliederung und Anwendungsbereiche des „Integrierten Technischen Umweltschutzes“



Der produktintegrierte Umweltschutz hat zum Ziel die nutzungsspezifischen Umweltbelastungen (NUB) über den gesamten Lebensweg des Produktes - cradle to grave - zu minimieren. Die Systemgrenzen liegen auf der einen Seite bei der Entnahme der Ressourcen aus der Erdkruste bzw. der Biosphäre und auf der anderen Seite bei der Eingliederung der Abfälle und der andere Emissionen in die natürliche Umwelt. Die Methode zur Bestimmung der nutzungsspezifischen Umweltbelastungen eines Produktes und damit das Instrumentarium zur Minimierung derselben ist die Produkt-Ökobilanz bzw. das LCA (Life Cycle Assessment). Gegenstand des produktintegrierten Umweltschutzes sind Produkte (Konsum- und Investitionsgüter sowie Infrastrukturen) und gegebenenfalls Dienstleistungen.

Der produktionsintegrierte Umweltschutz hat zum Ziel, die Summe der Umweltbelastungen innerhalb eines Betriebes bzw. eines Teilbereiches des Betriebes zu minimieren. Die Systemgrenzen sind in der Regel die Grenzen des Betriebes bzw. der Teile des Betriebes, die zu untersuchen sind. Im Gegensatz zum produktintegrierten Umweltschutz können innerhalb des Betriebes Prozeßketten für mehrere Produkte optimiert werden. Die Vorgehensweise, die unter anderem auf der Methode der Ökobilanzierung basiert, ist die sogenannte ökologische Betriebsoptimierung.

Der prozeßintegrierte Umweltschutz hat zum Ziel, die Summe der durch einen Prozeß erzeugten Umweltbelastungen zu minimieren. Die Systemgrenze ist in diesem Fall die Anlage bzw. der Apparat, dessen Stoff- und Energieströme im Ein- und Ausgang eindeutig bestimmbar und meßbar sind. Der prozeßintegrierte Umweltschutz ist sowohl Bestandteil des produkt- als auch des produktionsintegrierten Umweltschutzes und ist damit Bindeglied für beide Systembetrachtungen. Die Methode zur Minimierung der durch den Prozeß verursachten Umweltbelastungen ist die der Ökobilanzierung, angewendet auf das kleinste innerhalb der Ökobilanz zu berücksichtigende Modul.

Die drei wesentlichen Elemente des Integrierten Technischen Umweltschutzes sind die Werkstoffe (Stoffe), die Technik (Verfahrens-, Fertigungs- und Verarbeitungstechnik etc.) und die Konstruktion. Diese Elemente bestimmen nicht nur die Summe der Umweltbelastungen innerhalb der jeweiligen Systemgrenzen, sondern auch alle technisch möglichen Maßnahmen zur Minimierung dieser Belastungen. Jedes dieser Elemente steht in Wechselwirkungen mit den jeweils anderen. Deshalb werden in dieser Arbeit zwei verschiedene Beispiele des ITU, die produktbezogene Vorgehensweise für die Entwicklung sogenannter umweltfreundlicher Werkstoffe sowie die Vorgehensweise, die zum ökologisch optimierten Betrieb führt, dargestellt.

2. Werkstoffe im Integrierten Technischen Umweltschutz (ITU)

Der Integrierte Technische Umweltschutz kommt unter anderem den Forderungen nach der Verwendung von umweltfreundlichen bzw. umweltverträglichen Werkstoffen in Produkten nach. Zu den Produkten gehören Konsum- und Investitionsgüter sowie Infrastrukturen. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit besteht eine Wech-

selwirkung zwischen dem Produkt und den Werkstoffen, aus dem es besteht. Nur, wenn das Produkt umweltfreundlich zu nennen ist, gilt diese Aussage auch für die Werkstoffe, aus denen es besteht [1].

Ein Werkstoff kann mit dem relativen Attribut „umweltfreundlich" und derselbe Werkstoff ein anderes Mal mit „umweltunfreundlich" belegt werden, je nachdem in welchem Produkt er zur Anwendung kommt. Damit nun der Forderung nach der Verwendung von umweltverträglichen Werkstoffen nachgekommen werden kann, muß

- definiert werden, was ein umweltfreundlicher Werkstoff ist oder sein kann,
- geklärt werden, wovon es abhängt, daß ein Werkstoff dieses Attribut erhält,
- der Weg aufgezeigt werden, wie bestehende Werkstoffe zu umweltfreundlichen werden können,
- festgelegt werden, was bei der Auswahl der Werkstoffe zu berücksichtigen ist, damit das Produkt und damit auch die Werkstoffe selbst umweltfreundlich sein werden,
- die Systematik zur Entwicklung neuer Werkstoffe, die zu umweltfreundlichen Produkten führen, dargelegt werden.

2.1. Der umweltfreundliche Werkstoff

Häufig werden Stoffe als umweltfreundlich bezeichnet, die entweder mit geringem Energieverbrauch hergestellt wurden oder die gut recyclebar sind. Beides sind diesbezüglich wichtige Aspekte, die allein jedoch nicht ausreichen, einen Werkstoff so zu bezeichnen. Es ist vielmehr eine ganzheitliche Betrachtung des Lebensweges dieses Werkstoffes notwendig (produktintegrierter Umweltschutz).

2.1.1. Definition und Eingrenzung

Ein Werkstoff ist dann umweltfreundlich zu nennen, wenn die Summe der Umweltbelastungen (UB) über den gesamten Lebensweg, bezogen auf die vorgesehene Nutzung, einem relativen Minimum entspricht. Diese Definition sagt aus, daß

- nur mit Bezug auf die vorgesehene Nutzung des Werkstoffes, das heißt die Nutzung des Produktes eine diesbezügliche Aussage zu treffen ist,
- Umweltfreundlichkeit nur relativ und nicht absolut zu bestimmen ist,
- der gesamte Lebensweg zu berücksichtigen ist und nicht Teile desselben für eine entsprechende Aussage ausreichen.

Die Voraussetzung dafür, daß ein Werkstoff überhaupt als ökologisch charakterisiert werden kann, ist die Zuordnung desselben zu einem Endprodukt (Konsum- und Investitionsgüter, Infrastrukturen) mit eindeutig beschriebenem Anforderungsprofil. Das Anforderungsprofil des Produktes resultiert aus den zu erfüllenden Bedürfnissen und Funktionen sowie den notwendigen Eigenschaften und der Sicherheitsstandards.

Zumindest für Investitionsgüter und Infrastrukturen werden die Anforderungsprofile durch Pflichtenhefte detailliert vorgegeben [2]. Nur wenn mehrere Werkstoffe dem Anforderungsprofil des Bauteiles eines Produktes vollständig entsprechen, kann zwischen diesen Werkstoffen die Frage nach dem ökologisch günstigeren gestellt werden.

Produkte und damit auch Werkstoffe verursachen auf jeden Fall Belastungen der Umwelt. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 1 dargestellt. Darin bedeuten UB_{Pr} die Umweltbelastungen, die durch ein Produkt direkt oder indirekt über dessen gesamten Lebensweg von der Entnahme der Rohstoffe aus der Erdkruste bzw. Biosphäre (t_0) bis zur Wiedereinlagerung der Abfälle und Emissionen in die Umwelt (t_∞) entstehen. Es werden für jeden Stoff i der ökologisch gewichtete Primärressourcenverbrauch M_{PR} sowie die ökologisch gewichtete Masse der erzeugten Abfälle und Emissionen M_{AE} über den gesamten Lebensweg summiert.

Mit der ökologisch gewichteten Masse werden die unterschiedlichen Wirkungspotentiale auf die Umwelt durch den Verbrauch von Ressourcen sowie die Entstehung von Abfällen und Emissionen berücksichtigt. Die ökologisch gewichtete Masse M wird durch das Produkt aus dem Gewichtungsfaktor b mit der Masse m (Gleichung 2) gebildet. Der Gewichtungsfaktor b wird analog zu den Umweltwirkungen der Wirkungsbilanz gebildet und berücksichtigt beispielsweise den Unterschied eines nahezu umweltneutralen Abraums und den erheblich relevanteren cyanidischen Galvanikschlamm [3]. Mit der Energie ist analog zur Masse zu verfahren bzw. die Energie ist in ihre entsprechenden Massen zu konvertieren.

Ein absolut umweltfreundliches Produkt, das heißt ein Produkt, das die Umwelt nicht belastet, gibt es somit nicht. Wesentlich ist jedoch, daß die Summe der Belastungen für die Umwelt, das heißt letztendlich auch für den Menschen, so gering wie möglich ist. Liegt für ein Bauteil bzw. für ein Produkt mehr als ein Werkstoff vor, der dem Anforderungsprofil entspricht, so ist derjenige auszuwählen, der über den gesamten Lebensweg die geringsten Umweltbelastungen verursacht. Bei dem Vergleich von zwei in Frage kommenden Werkstoffen wäre der Werkstoff 1 in Gleichung 3 der ökologisch günstigere und damit der sogenannte umweltfreundliche Werkstoff, da die nutzungsspezifischen Umweltbelastungen NUB geringer sind als die des Werkstoffes 2. Im Gegensatz zu Gleichung 1, in der die Umweltbelastungen nur auf das Produkt bezogen werden, ist für die Bestimmung der ökologisch günstigeren Variante die Nutzungsdauer t_e-t_n bzw. die Häufigkeit der Funktionserfüllungen zu berücksichtigen (Gleichung 4). Wie auch aus Gleichung 3 hervorgeht, ist die Umweltbelastung nicht absolut zu bestimmen.

Es hängt zum einen mit dem sehr großen Arbeitsaufwand, der dazu notwendig wäre, zusammen und zum anderen damit, daß die absoluten Umweltbelastungen nicht in jedem Fall zu bestimmen sind. Daher kann nur die Differenz der nutzungsspezifischen Umweltbelastungen (NUB) zweier oder mehrerer Produkte bestimmt werden (Gleichung 5), um daraus abzuleiten, welches Produkt das ökologisch günstigere und damit das umweltfreundlichere Produkt ist. Das Attribut „umweltfreundlich" ist relativ und nicht absolut.

$$UB_{Pr} = \sum_{t_0}^{t_\infty}\sum_{i}(M_{PR} + M_{AE})_i \quad (1)$$

$$M_i = b_i \cdot m_i \quad (2)$$

$$NUB_1 < NUB_2 \quad (3)$$

$$NUB_{Pr} = \frac{UB_{Pr}}{t_e - t_n} \quad (4)$$

$$\Delta NUB = \left(\frac{UB_{Pr}}{t_e - t_n}\right)_1 - \left(\frac{UB_{Pr}}{t_e - t_n}\right)_2 \quad (5)$$

Zur Bestimmung des umweltfreundlichen Werkstoffes (UFW) ist im Bild 2 die ökologisch gewichtete Masse M, bezogen auf ein Produkt, als Funktion des Produktlebenszyklus schematisch dargestellt [4]. Im Zeitraum t_0 bis t_n wird mit n Prozeßschritten das Fertigprodukt hergestellt. Aus den in jedem Prozeßschritt eingesetzten Primärressourcen (PR) und Sekundärressourcen (SR) werden jeweils Prozeßprodukt (schraffiert) sowie Abfälle und Emissionen (weiß) erzeugt. Während der Produktlebensdauer wird anstelle von diskreten Verbrauchsmengen ein stetiger Verbrauch von Betriebsstoffen aus Primärressourcen angenommen. Die erzeugten Abfälle und Emissionen während der Produktlebensdauer fallen in dieser vereinfachten Darstellung erst nach dem Ende der Nutzungsdauer (t_e) an. Im Zeitraum t_e bis t_m werden zur Produktion von Sekundärrohstoffen (SR) m Prozeßschritte durchgeführt. Für das Recycling wie auch für die nachfolgende Abfallbehandlung und -ablagerung werden Primärressourcen verbraucht. Die Abfallbehandlung schließt die Maßnahmen zur Luft- und Wasserreinhaltung mit ein.

Wie im Bild 2 dargestellt, läßt sich der Lebensweg eines jeden Produktes in vier Bereiche unterteilen: die Herstellung (t_n-t_0), die Nutzung (t_e-t_n), ie Kreislaufführung (t_m-t_e) und die Abfallbehandlung und -ablagerung (t_∞-t_m). Jeder Abschnitt des Produktlebensweges trägt den in Gleichung 6 dargestellten Anteil an der Gesamtumweltbelastung UB_{Pr} bei. Für den Produktplaner bilden die einzelnen Glieder der Gleichung 6 die sogenannten „ökologischen Hypotheken" [3], die er kennen muß, um die Summe der Umweltbelastungen möglichst gering zu halten.

$$UB_{Pr} = UB_H + UB_N + UB_R + UB_E \quad (6)$$

Die ökologische Hypothek für die Herstellung (Gleichung 7):

$$UB_H = \sum_{t_0}^{t_n}\sum_{i}(M_{PR} + M_{AE})_i \quad (7)$$

Die ökologische Hypothek für die Nutzung (Gleichung 8):

$$UB_N = \sum_{t_n}^{t_e}\sum_{i}(M_{PR} + M_{AE})_i \quad (8)$$

Die ökologische Hypothek für die Kreislaufführung (Gleichung 9):

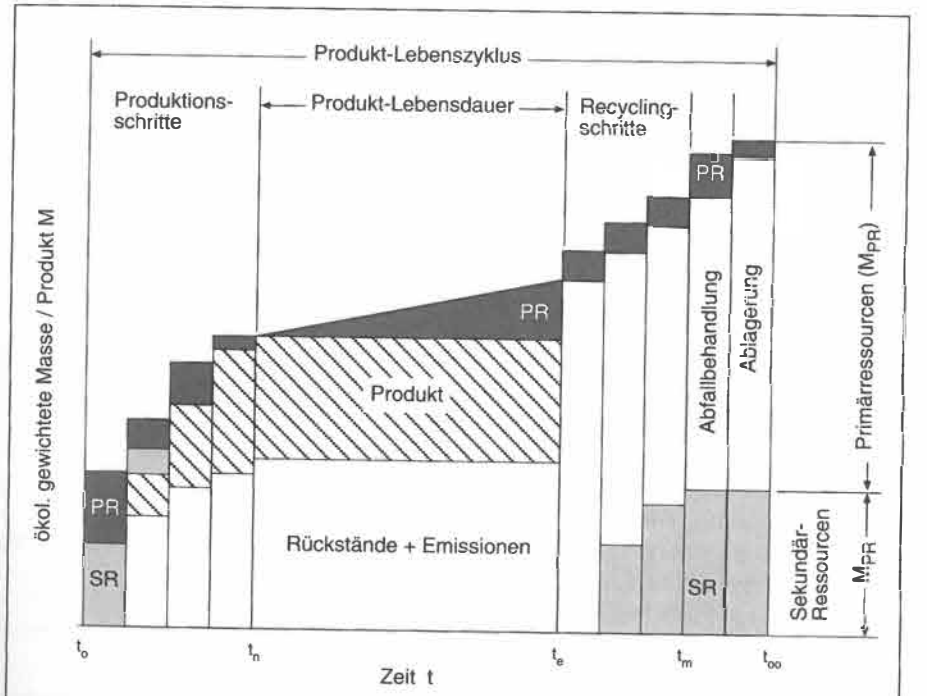
$$UB_R = \sum_{t_e}^{t_m}\sum_{i}(M_{PR} + M_{AE})_i \quad (9)$$

Die ökologische Hypothek für die Abfallbehandlung und -ablagerung (Gleichung 10):

$$UB_E = \sum_{t_m}^{t_\infty}\sum_{i}(M_{PR} + M_{AE})_i \quad (10)$$

Im Gegensatz zu den vier ökologischen Hypotheken wird von Braun [5] die Gesamtumweltbelastung in seinem Ansatz in drei Lastpakete aufgeteilt.

Bild 2: Schematische Darstellung der ökologisch gewichteten Massen M über den Lebensweg eines Produktes [4]



PR: Primärressourcen SR: Sekundärressourcen bzw. -rohstoffe