

Rechnergestützte Systeme zur prospektiven ökologischen Beurteilung von Produkten

Alp Atik¹, Herbert Schulz¹, Christian Pütter³, Reiner Anderl²

Abstract

The incorporation of methods and tools for the development of environmentally sound products into design processes is frequently not sufficient. The authors present a solution that integrates a computer aided system into an usual design environment. Product and process data coming from a CAD System is aggregated to an ecological index-score using fuzzy sets. This index-score supports the designer as a simple and certain aid to decision-making accompanying to development process.

1. Einleitung und Problemstellung

Aufgrund des zunehmenden Umweltbewußtseins der Verbraucher sowie der sich stetig verschärfenden Umweltgesetzgebung gewinnt die Entwicklung umweltgerechter Produkte zunehmend an Bedeutung. So wird die präventive Berücksichtigung umweltrelevanter Aspekte bei der Produktentwicklung zunehmend als ein Wettbewerbsfaktor angesehen, mit der ein Beitrag zur langfristigen Sicherung von Marktanteilen geleistet werden kann (Zahn et al. 1996).

Produkte verursachen Umweltbeeinträchtigungen über ihren gesamten Lebensweg von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung über die Produktion und Nutzung bis zum Recycling und der Entsorgung. Gegenwärtig besteht internationaler Konsens darüber, daß sich zur ökologischen Beurteilung von Produkten die Ökobilanz-Methode (Life Cycle Assessment, LCA) eignet, deren Prinzipien und allgemeine Anforderungen in der DIN ISO 14040 festgeschrieben sind (DIN 1997). Die Anwendung der Ökobilanz ist jedoch, insbesondere bei der Beurteilung von komplexen technischen Produkten, mit methodischen und praktischen Problemen verbunden, so daß die Einbindung in den Konstruktionsalltag gegenwärtig kaum möglich erscheint. In diesem Zusammenhang müssen insbesondere folgende Probleme genannt werden:

- Die Erhebung des für die Beurteilung notwendigen Dateninventars (Sachbilanzdaten) ist zeit- und kostenintensiv,

¹ Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt, Petersenstr. 30, D-64285 Darmstadt, email: {atik; schulz}@ptw.tu-darmstadt.de

² Fachgebiet Datenverarbeitung in Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt, Petersenstr. 30, D-64285 Darmstadt, email: {pütter; anderl}@dik.maschinenbau.tu-darmstadt.de

- die Qualität der Sachbilanzdaten weist Unterschiede auf, da ihre Herkunft und ihre Erhebungsbedingungen stark variieren; diese Unschärfen werden jedoch bei der Durchführung von Ökobilanzen nicht berücksichtigt und
- die Durchführung von Ökobilanzen erfolgt nach abgeschlossener Produktentwicklung, so daß eine effiziente präventive Schwachstellenanalyse mit anschließender Optimierung nicht möglich ist.

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Ökobilanz-Methode sowie der zunehmenden Komplexität der Untersuchungen sind spezielle Software-Systeme auf den Markt gekommen, die das Ziel haben, den Anwender bei der Durchführung von Studien zu unterstützen. Die wachsende Zahl von Systemen macht deutlich, daß diesen eine große Bedeutung beigemessen (Rice 1996; Siegenthaler 1995; Umweltbundesamt 1997). Die Lösungen zeichnen sich durch zunehmend verbesserte graphische Benutzerschnittstellen und teilweise durch Möglichkeit zur Auswahl unterschiedlicher Bewertungsmodelle aus. Aus der Sicht des Konstrukteurs hingegen weisen die Software-Systeme folgende wesentliche Defizite auf:

- Die Systeme stellen "Stand-Alone-Lösungen" dar und sind nicht Bestandteil der gewohnten Konstruktionsumgebung,
- es können keine Beurteilungen an laufenden Entwicklungen vorgenommen werden, da keine Schnittstelle zur Konstruktionsumgebung, insb. zum CAD-System, vorliegt,
- die Systeme verarbeiten nur scharfe Daten (binäre Logik) und betrachten kein qualitatives Erfahrungswissen sowie unscharfe Daten, wie sie z.B. durch Bandbreiten und unscharfen Mengen (Fuzzy-Sets) beschrieben werden können.

2. Gesamtkonzept der Produktentwicklungsumgebung

2.1 Anforderungen an die Produktentwicklungsumgebung

Den Stand der Technik eines Produktentwicklungsarbeitsplatzes stellt heute eine rechnerintegrierte Produktentwicklungsumgebung bestehend aus CAD- und Produktdatenmanagementsystem dar, die durch traditionelle Büroanwendungen ergänzt wird. Diese Instrumente ermöglichen dem Produktentwickler im wesentlichen

- die Festlegung von Geometrie, Produktstruktur, Werkstoffdaten etc. (CAD-System) sowie
- die kohärente, konsistente und unternehmensweit redundanzfreie Verwaltung von konstruktionsbezogenen organisatorischen und administrativen Produktdaten (PDM-System).

Mit den genannten Systemen lassen sich allerdings keine Informationen über die Umweltauswirkungen, die das Produkt in den Phasen seines Lebenszyklus verursacht, ableiten, die eine richtungssichere ökologische Beurteilung von Produkten erlauben. Dies liegt insbesondere daran, daß keine Möglichkeit besteht effizient, d.h. kooperativ und bereichsübergreifend, Prozesse und Prozeßketten anzugeben und mit Produktparametern, wie beispielsweise Geometrie- oder Materialeigenschaften, in Beziehung zu setzen. Darüber hinaus werden keine Informationen bereitgestellt, die den Produktentwickler bei der Entwicklung umweltgerechter Produkte unterstützen oder ihm eine Entscheidungsgrundlage zur ökologischen Optimierung des Produktes liefern.

Die Anforderungen der umweltgerechten Produktentwicklung erfordern deshalb die Integration zusätzlicher Systeme in die Produktentwicklungsumgebung. Dazu zählen beispielsweise

- *ein Lebenslaufmodellierer*, mit dem kooperativ, durch Zuordnung von (teilweise vordefinierten) Prozessen zu den Produkt-Lebensphasen der Produkt-Lebenslauf spezifiziert wird und der somit die Grundlage für eine durchzuführende ökologische Beurteilung bildet,
- *ein Beurteilungssystem*, welches die ökologische Beurteilung des Produktes durchführt und die Ergebnisse speziell für den Produktentwickler aufbereitet, und die Identifikation von ökologischen Schwachstellen sowie Stellhebeln zur effizienten Optimierung ermöglicht,
- *ein Informationssystem*, das hypertextbasierte Informationen über umweltrelevante Standards oder Richtlinien zur Verfügung stellt sowie den Benutzer durch die Verwendung wissensbasierter Methoden bei der Entscheidungsfindung (z.B. bei der umweltgerechten Werkstoffauswahl) unterstützt und
- *ein objektorientiertes Datenbanksystem*, das neben den organisatorischen und administrativen Produktdaten zusätzlich die Möglichkeit bietet Fuzzy-Set basierte funktionale Zusammenhänge abzubilden, die zur Integration von Sachbilanzdaten in die Datenbank benötigt werden. Darüber hinaus werden Umweltinformationen für das Informationssystem integriert. Das objektorientierte Datenbankschema ist dabei auf der Grundlage eines Informationsmodells für die Entwicklung umweltgerechter Produkte definiert. Das Informationsmodell stellt dabei die Basis für die Repräsentation eines virtuellen Produktes in der Datenbank dar, anhand dessen Eigenschaften die Sach- und Wirkungsbilanz vorausschauend berechnet werden können (Anderl et al. 1997).

Im Forschungsprojekt SFB 392 wurde eine Produktentwicklungsumgebung realisiert, welche die genannten Anforderungen umsetzt (Abbildung 1).

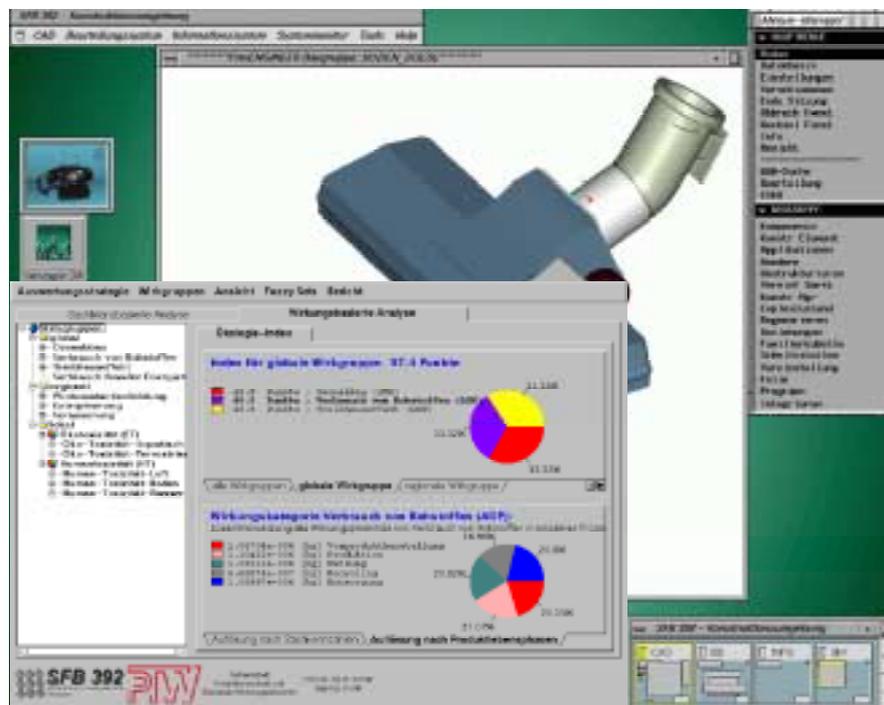


Abbildung 1
Screenshot der Produktentwicklungsumgebung

2.2 Integration der Systeme

Die Integration der Anwendungssysteme zur Produktentwicklungsumgebung erfordert nicht nur die Anbindung jedes einzelnen Systems an die Datenbank, sondern muß außerdem die Kommunikation der Anwendungssysteme untereinander realisieren bis hin zum Austausch von Systemfunktionalitäten in einer heterogenen Rechnerumgebung. Beispielsweise wäre es möglich bei der Festlegung eines Werkstoffs im CAD-System den Inferenzprozeß im wissensbasierten Informationssystem anzustoßen. Damit kann die Benutzung der Konstruktionumgebung im Gegensatz zu einer "losen" Kopplung der Systeme wesentlich vereinfacht werden und ermöglicht so erst den produktiven Einsatz. Darüber hinaus soll eine Konfiguration der Produktentwicklungsumgebung, also die Integration oder der Austausch von Anwendungssystemen, ermöglicht werden.

Eine Kommunikationsinfrastruktur mit der diese Anforderungen realisiert werden können ist die von der OMG (Object Management Group) in (OMG 1995) spezifizierte Common Object Request Broker Architectur (CORBA). Die Verwendung von CORBA impliziert die in Abbildung 2 dargestellte Architektur der Produktentwicklungsumgebung. Zur Realisierung einer durchgängigen Kommunikation ist demnach die Implementierung einer CORBA-basierten Schnittstellenbeschreibung mittels der Interface Definition Language (IDL) für alle zu integrierenden Applikationen nötig.

Produktentwicklungsumgebung:

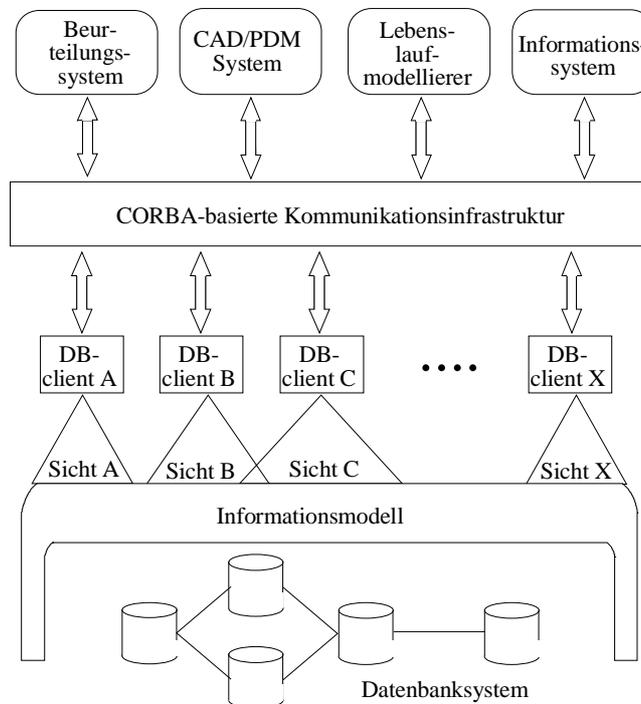


Abbildung 2
Systemarchitektur der Produktentwicklungsumgebung
Quelle: (Atik et al. 1998a)

Eine Besonderheit der realisierten Architektur stellt die Entkopplung der Applikationen von den verwendeten Datenbanken, insbesondere den Datenbank-Clients dar. Die Applikationen sind damit unabhängig von Änderungen oder Erweiterungen im Informationsmodell oder in der Struktur der Datenbanken. Dies wirkt sich beim Umgang mit den ständig zu modifizierenden umweltrelevanten Daten positiv aus.

Damit wurden die systemtechnischen Voraussetzungen zur Integration von Instrumenten zur umweltgerechten Produktentwicklung in die klassische Produktentwicklungsumgebung geschaffen. Bei dem Design dieser Instrumente, insbesondere des Beurteilungssystems muß allerdings sichergestellt werden, daß die Komplexität des Gesamtsystems vom Produktentwickler beherrschbar bleibt.

3. Ökologisches Bewertungsmodell

Für die Umsetzung des Beurteilungssystems wurde als Grundidee auf das ökologische Bewertungsmodell des Umweltbundesamtes (UBA) zurückgegriffen und an die im Rahmen des Gesamtkonzeptes vorliegenden konstruktionsbezogenen Anforderungen angepaßt. Das UBA-Modell wurde im Jahre 1995 durch die Fallstudie "Ökobilanz für Getränkeverpackungen" validiert (Umweltbundesamt 1995) und wird kontinuierlich weiterentwickelt (Umweltbundesamt 1997). Desweiteren wurden bei den methodischen Grundlagen des UBA-Modells die nationalen und internationalen Standardisierungsbemühungen berücksichtigt (DIN 1997; Neitzel 1997).

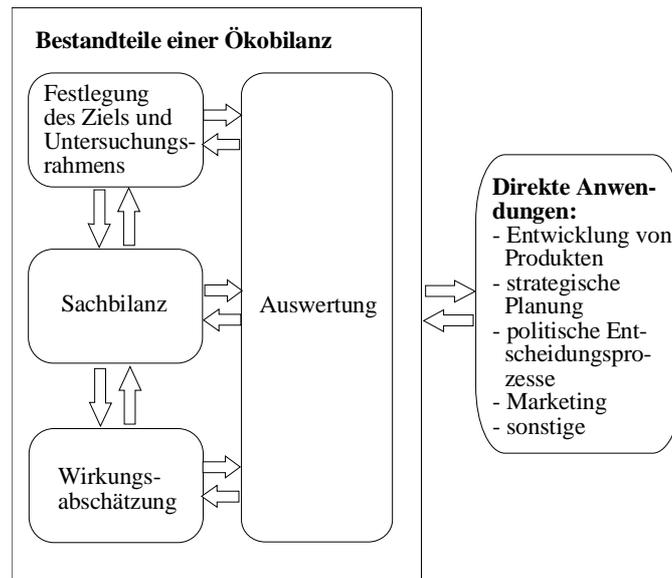


Abbildung 2
Bestandteile einer Ökobilanz nach ISO 14040
Quelle: (DIN 1997)

Den Kern der Ökobilanz stellt die *Sachbilanz* dar, in der sämtliche Input- und Outputgrößen (im folgenden als Sachkennzahlen bezeichnet) über den gesamten Produktlebensweg aufgeführt sind. Beispiele für Sachkennzahlen sind Angaben zu Emissionen in Luft, Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch oder Abfallmenge.

Im Rahmen der *Wirkungsabschätzung* werden zunächst die in der Sachbilanz ermittelten Sachkennzahlen den jeweiligen Wirkungskategorien, zu denen sie eine umweltbeeinträchtigende Wirkung haben zugeordnet (Schritt: Klassifikation). Durch deren Multiplikation mit den jeweiligen Äquivalenzfaktoren, welche die Tatsache zum Ausdruck bringen, daß verschiedene Stoffe unterschiedlich große Umweltbeeinträchtigungen bewirken, werden die sogenannten Effektbeiträge ermittelt, die jeweils als Einheit die Referenzsubstanz einer Wirkungskategorie haben (z.B. CO₂ bei Treibhauseffekt, vgl. (1)). Die Summation der Effektbeiträge einzelner Stoffe überführt diese zu den Wirkungspotentialien der einzelnen Wirkungskategorien (2).

$$\text{Effektbeitrag}_{i,\text{WK}} [\text{kg}] = m_i [\text{kg}] \cdot \text{ÄF}_{i,\text{WK}} [-] \quad (1)$$

$$\text{Wirkungspotential}_{\text{WK}} [\text{kg}] = \sum_i^n \text{Effektbeitrag}_{i,\text{WK}} [\text{kg}] \quad (2)$$

mit m_i : Masse-Sachkennzahl vom Typ i ; ÄF: Äquivalenzfaktor; WK: Wirkungskategorie

Im nächsten Schritt der Wirkungsabschätzung erfolgt die verbal-argumentative *Gewichtung* von Wirkungskategorien (früher *Bewertung* genannt). Hierzu werden zwei Größen herangezogen, aus denen die ökologische Gesamtbedeutung einer Wirkungskategorie abgeleitet wird:

- Der *spezifische Beitrag* einer Wirkungskategorie wird definiert als das Verhältnis des für das untersuchte Produkt ermittelten Wirkungspotentials zum jeweiligen Gesamt-Wirkungspotential eines Jahres für Deutschland. Hierdurch soll die Relevanz des Produktes bezüglich einer Wirkungskategorie berücksichtigt werden. Der spezifische Beitrag wird verbal mit „gering“, „gering-mittel“, „mittel“, „groß“ oder „sehr groß“ in einer fünfstufigen Skala eingestuft.
- Die *ökologische Bedeutung* einzelner Wirkungskategorien spiegelt deren umweltpolitische Prioritäten wieder. Diese wird ebenso in fünf verbalen Stufen von „gering“ bis „sehr groß“ angegeben, wobei die Zuordnung vom UBA vorgegeben ist.

Im letzten Schritt der Wirkungsabschätzung werden die ermittelten Größen spezifischer Beitrag und ökologische Bedeutung zusammengefaßt, um die *ökologische Gesamtbedeutung* einer Wirkungskategorie zu ermitteln. Die Zusammenfassung erfolgt dabei nach Tabelle 1.

ökologische Bedeutung	spezifischer Beitrag				
	sehr groß	groß	mittel	gering-mittel	gering
sehr groß	sehr groß	sehr groß	groß	groß	mittel
groß	sehr groß	groß	groß	mittel	mittel
mittel	groß	groß	mittel	mittel	gering-mittel
gering-mittel	groß	mittel	mittel	gering-mittel	gering-mittel
gering	mittel	mittel	gering-mittel	gering-mittel	gering

Tabelle 1
 Matrix für die Ermittlung der ökologischen Gesamtbedeutung einer Wirkungskategorie, Quelle: (Umweltbundesamt 1995)

Die als Ergebnis des UBA-Beurteilungsmodells ermittelte ökologische Gesamtbedeutung stellt ein verbales Maß für die durch das Produkt verursachte Umweltbeeinträchtigung dar. Die Angabe von bis zu zwölf einzelnen verbalen wirkungskategoriebezogenen Ergebnissen erscheint jedoch für den Konstrukteur, der einfach handhabbare Entscheidungsunterstützungen benötigt, nicht zweckmäßig. Insbesondere die praktische Vergleichbarkeit der Ergebnisse von mehreren Lösungsalternativen ist nicht gegeben. Daher wird im Rahmen des vorgestellten Konzeptes, abweichend vom Ansatz des UBA, eine weiterführende Aggregation zu einer zusammenfassenden Kennzahl vorgenommen.

Die Aggregation der Ergebnisse erfolgt dabei in zwei Stufen:

1. Aggregation der einzelnen Gesamtbedeutungen zu drei *Wirkgruppen-Indizes*, unterschieden nach deren regionaler Verteilung (lokale, regionale und globale Wirkgruppe)
2. Aggregation der Wirkgruppen-Indizes zu einem zusammenfassenden *Ökologie-Index*

Die methodische Vorgehensweise der ökologischen Beurteilung im SFB 392 wird in Abbildung 3 dargestellt:

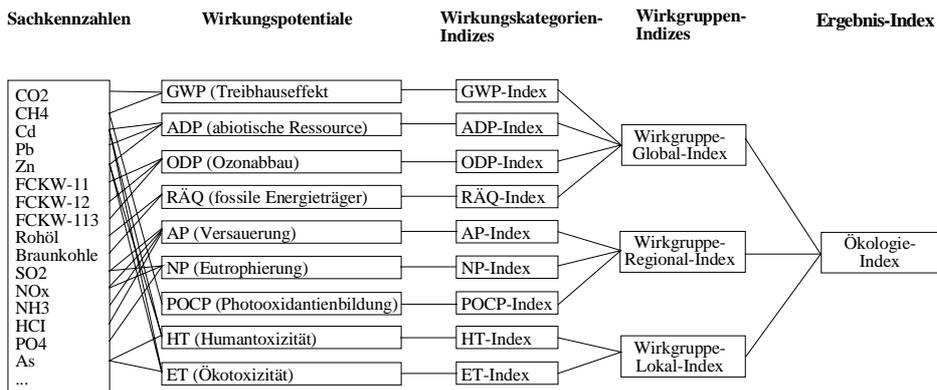


Abbildung 3
 Angewandte Methodik zur ökologischen Beurteilung
 Quelle: (Atik/Pant 1997)

4. Softwaretechnische Realisierung des Beurteilungssystems

4.1 Verarbeitung von unscharfen Sachkennzahlen im Beurteilungssystem

Ökologische Daten, die bei einer ökobilanzbasierten Beurteilung eingesetzt werden, können in Abhängigkeit von ihrer Art und ihren Erhebungsbedingungen sehr unterschiedliche Qualitäten aufweisen. Die in den Daten vorhandenen Unschärfen sind dabei auf ihre Unvollständigkeit, fehlende Präzision, unterschiedliche Erhebungsbedingungen, Meßfehler, Abschätzungen, etc. zurückzuführen (Salski 1993). Durch eine exakte Darstellung, wie bei Ökobilanzen i.d.R. der Fall, wird eine nicht vorhandene Genauigkeit suggeriert. Über den gesamten Produkt-Lebensweg betrachtet können die in den einzelnen Daten vorhandenen Unschärfen kumuliert zu großen Abweichungen der Endergebnisse einer Bilanz bzw. Beurteilung führen (Pohl/Roš 1996). Daher erscheint es als notwendig, vorliegende Datenunschärfen bei der ökologischen Beurteilung stets mitzuberücksichtigen. Hierdurch können dem Entscheidungsträger wichtige Hinweise bezüglich der Vertrauenswürdigkeit eines Ergebnisses gegeben werden.

In Abhängigkeit von der Modellierung von Unsicherheiten können im Beurteilungssystem exakte Zahlen, Bandbreiten und Fuzzy Sets verarbeitet werden. Da exakte Zahlen und Bandbreiten Sonderfälle der Fuzzy-Modellierung darstellen, kann mit der Fuzzy-Theorie eine konsistente Datenverarbeitung gewährleistet werden (Pant et al. 1998).

Fuzzy-Sets (unscharfe Mengen) unterscheiden sich von Bandbreiten insofern, als ihre Aussagen nicht ausschließlich dem Wahrheitsgrad "1" (100 % wahr) bzw. "0" (100% unwahr) entsprechen müssen. Vielmehr können ihre Zugehörigkeiten zu einer getroffenen Aussage fließend dargestellt werden, d.h. nur zu einem bestimmten Prozentsatz (Zugehörigkeitsgrad) wahr sein. Diese fließende Darstellungsweise bildet die menschliche Intuition wesentlich besser ab, als bspw. Bandbreiten (Altrock, v./Zimmermann 1993).

Für die Aggregation der Sachkennzahlen bis zur Wirkungsabschätzung werden ausschließlich arithmetische Rechenoperationen durchgeführt (Abbildung 3). Hierbei wird als eine geeignete Methode das Erweiterungsprinzip der Fuzzy-Logic, die Fuzzy-Arithmetic, eingesetzt (Kaiser 1998, Kaufmann/Gupta 1991).

In einem weiteren Schritt werden die Wirkungskategorien, basierend auf ihren Wirkungspotentialen, gewichtet und so hinsichtlich ihren ökologischen Relevanzen bewertet. Als Verarbeitungsmethode für die Inferenz wird dabei die Fuzzy-Logic eingesetzt, die sich besonders gut für regelbasierte Bewertungen eignet. Die Implikation erfolgt mit sog. "WENN-DANN"-Regeln wie folgt:

$$\begin{array}{l} \text{WENN } \{ \text{Bedingung 1} \} \text{ OPERATOR (UND/ODER) } \{ \text{Bedingung 2} \} \\ \text{DANN } \{ \text{Schlußfolgerung} \} \end{array} \quad (3)$$

Da der Schluß in linguistischer Form vorliegt, muß er zwecks weiterer Verarbeitbarkeit im System in eine exakte Zahl umgewandelt werden. Dies erfolgt im Rahmen der Fuzzy Logic mit Hilfe der "Defuzzifizierung", bei der über die Fläche des Fuzzy-Sets integriert und anschließend der Flächenschwerpunkt ermittelt wird. Als Ergebnis erhält man eine Zahl zwischen 1 und 100, welche die ökologische Gesamtbedeutung der Wirkungskategorie widerspiegelt, z.B. der Treibhauseffekt-Index. Dabei gilt: Je größer der Index, desto größer die Umweltbeeinträchtigung und somit die ökologische Gesamtbedeutung der Wirkungskategorie (Abbildung 3).

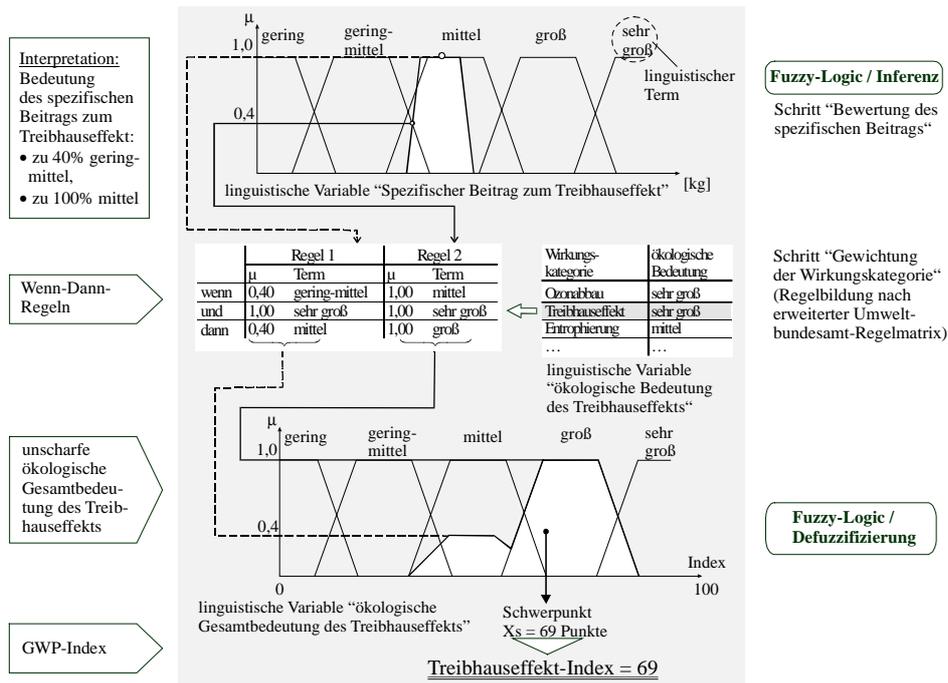


Abbildung 3
Gewichtung von Wirkungskategorien am Beispiel des Treibhauseffekts
Quelle: (Pant et al. 1998)

4.2 Entwicklungsbegleitender Einsatz des Beurteilungssystems

Um eine lebenszyklusweite ökologische Beurteilung durchführen zu können, ist es notwendig, den Lebenslauf des Produktes zu modellieren. Hierfür ist im Rahmen der SFB-Produktentwicklungsumgebung der Lebenslaufmodellierer vorgesehen. Aufgabe des Lebenslaufmodellierers ist es, durch schnelle und einfache Zuordnung von Prozessen zu Produkt-Lebensphasen den Produktlebenslauf zu spezifizieren und somit die Grundlage für die ökologische Beurteilung zu liefern (Schott et al. 1997). Durch die Übergabe der lebenslaufbeschreibenden Prozeßinformationen (Lebenslaufmodellierer) und den produktbeschreibenden Gestaltinformationen (CAD-System) an die objektorientierte Datenbank können die spezifischen Sachkennzahlen basierend auf dem Informationsmodell dynamisch generiert werden. Die generierten Sachkennzahlen stellen die Eingangsdaten des Beurteilungssystems dar (Abbildung 4).

Durch den Einsatz des Beurteilungssystems hat der Konstrukteur die Möglichkeit, eine produktentwicklungsbegleitende vergleichende ökologische Beurteilung von Lösungsalternativen durchzuführen. Dabei hat der Anwender zunächst die Möglichkeit, die Alternativen vergleichend zu beurteilen, und die Ergebnisse in Form von aggregierten Indizes präsentiert zu bekommen. Hierdurch wird dem Produktentwickler eine schnelle, einfach zu handhabende und richtungssichere Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Umweltgerechtigkeit der betrachteten Lösungsalternativen geliefert (Abbildung 4).

Abbildung 4
Ablauf der ökologischen Beurteilung in der Produktentwicklungsumgebung
Quelle: (Pant et al. 1998)

In einem zweiten Schritt kann der Anwender ausgehend von dem Ergebnis auf die Ursachen der Umweltbeeinträchtigungen schließen. Die Möglichkeit, Ergebnisse systematisch rückverfolgen zu können, trägt zur Transparenz der durchgeführten Beurteilung bei. Ferner können konkrete Schwachstellen ermittelt werden, die es zu verbessern gilt. Für die Ursachenforschung stehen grundsätzlich zwei Strategien zur Verfügung: sachbilanzbasierte Analysen und wirkungsbasierte Analysen.

Sachbilanzbasierte Analysen dienen der strukturierten Darstellung und Analyse der erfaßten Sachkennzahlen. Dabei werden alle Input- und Outputströme, unterteilt nach Typen (z.B. Ressourcen, Emissionen, etc.) aufgezeigt. Desweiteren

können Informationen zu deren Entstehungen in den einzelnen Produkt-Lebensphasen abgefragt werden.

Wirkungsbasierte Analysen liefern, im Gegensatz zu sachbilanzbasierten Analysen, keine Sachkennzahlen, sondern deren potentielle Wirkungen auf die Umwelt. Da unterschiedliche Stoffe i.d.R. unterschiedlich große Wirkungen auf die Umwelt ausüben, ist die wirkungsorientierte Betrachtungsweise für eine ökologische Beurteilung unabdingbar.

Abbildung 5
Systematische wirkungsbasierte Ursachenforschung mit dem Beurteilungssystem

Ausgehend von dem Endergebnis Ökologie-Index (Ebene 0, vgl. Abbildung 5) hat der Anwender die Möglichkeit, stufenweise die verursachenden Wirkungskategorien, Sachkennzahlen und Produkt-Lebensphasen zu ermitteln. Die Relativanteile werden mit Kuchendiagrammen visualisiert, wobei die einzelnen Kuchenanteile per Mausklick direkt aktiviert werden können. Durch die farbliche Kenntlichmachung des jeweils größten Anteils wird dem Anwender die schnelle Identifikation relevanter Aspekte ermöglicht. Die Aktivierung dieser Anteile führt stets zur nächstniedrigeren Ebene, so daß die Ursachen für die Entstehung der jeweiligen Kennzahl transparent werden.

Das ökologische Beurteilungssystem erlaubt über die kennzahlenförmige Ergebnisausgabe hinaus die optionale Visualisierung von Zwischenergebnissen, z.B. die Ermittlung des Wirkungskategorien-Index, in unscharfer Form. Durch die

Darstellung von Zwischenergebnissen in Form von Fuzzy-Sets können Aussagen über deren Unschärfe gewonnen werden.

6. Diskussion und Ausblick

Durch die vorgestellte systematische Ursachenforschung können die Schwachstellen des Produktes ermittelt werden; für eine präventive Produktentwicklung erscheinen ebenso konkrete Stellhebel für Produktoptimierungen als sinnvoll. Gegenwärtig wird das vorgestellte Beurteilungssystem weiterentwickelt, um aus den identifizierten ökologisch relevanten Stoffen bzw. Produkt-Lebensphasen auf die „Öko-Treiber“, d.h. entsprechenden Bauteile und Prozesse überzugehen. So kann auf einem Blick dargestellt werden, welche einzelne Prozesse für die verursachten Umweltbeeinträchtigungen verantwortlich sind. Ebenso kann identifiziert werden, welche einzelnen Bauteile bzw. Bearbeitungselemente innerhalb einer Baugruppe unter ökologischen Gesichtspunkten kritisch sind (Abbildung 6).

Bei der Identifikation von ökologisch relevanten Prozessen werden nicht nur die betriebsinternen Prozesse, z.B. Fertigungsprozesse, sondern alle betroffenen Prozesse aus dem gesamten Produkt-Lebenszyklus angezeigt. Hierdurch wird dem Produktentwickler verdeutlicht, an welchen Prozessen eine effiziente ökologische Verbesserung angesetzt werden kann. Zur Unterstützung der gezielten Identifikation von möglichen Stellhebeln werden dem Produktentwickler Informationen zu den relevanten Prozessen geliefert. So werden auf einer "Prozeßkarte" alle Größen angegeben, die einen Einfluß auf die Umweltgerechtigkeit des Prozesses haben. Hierzu gehören vor allem Prozeßführungsparameter (z.B. technologischer Art), prozeßbeeinflussende Produktparameter (z.B. gestaltbezogener Art) sowie Sachkennzahlen (z.B. Stoff- und Energieströme), die mit dem untersuchten Prozeß zusammenhängen. Durch das von den Prozeßanalytikern des SFB 392 bereitgestellte Umweltwissen (Stellhebel) werden dem Produktentwickler konkrete Hilfestellungen geliefert, um Prozesse ökologisch präventiv zu optimieren bzw. bei betriebsexternen Prozessen entsprechende Handlungsmaßnahmen einzuleiten (Abbildung 6). Auf die Darstellung theoretisch möglicher und technologisch-wirtschaftlich sinnvoller Optimierungspotentiale wird großer Wert gelegt.

Abbildung 6
 Identifikation von „Öko-Treibern“ und Stellhebeln für die ökologische Optimierung
 von Produkten, Quelle: (Atik et al. 1998b)

Literaturverzeichnis

- Altrock, C. von; Zimmermann, H.J. (Hrsg.) (1993): Fuzzy Logic Band 1: Technologie, München; Wien: Oldenbourg
- Anderl, R.; Daum, B.; John, H.; Pütter, Ch. (1997): Entwicklung einer Umweltdatenbank für eine rechnergestützte Konstruktionsumgebung, in: Geiger, W.; u.a. (Hrsg.): Umweltinformatik '97, Straßburg 1997, Marburg: Metropolis, S. 56-69
- Atik, A.; Pant, R. (1997): Datenerhebung und umweltbezogene Bewertung, in: Entwicklung umweltgerechter Produkte – Methoden, Arbeitsmittel und Instrumente, Expertenrunde des Sonderforschungsbereichs 392 am 4. Nov. 97, TU Darmstadt
- Atik, A.; Schulz, H.; Pant, R.; Jager, J. (1998b): Method and Computer Aided Software System for Ecological Evaluation of Products Accompanying to Development Process, in: Life Cycle Design '98, 5th International CIRP Seminar on Life Cycle Engineering, Stockholm
- Atik, A.; Schulz, H.; Pütter, Ch.; Anderl, R. (1998a): Konstruktionsbegleitende ökologische Beurteilung von Produkten mittels Fuzzy-Theorie, in: Konstruktion 50 (1998) 6

- DIN – Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (1997): Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen (DIN EN ISO 14040), Berlin: Beuth
- Kaiser, J. (1998): Qualitätsbewertung von Prozessen und Prozessergebnissen durch integrierten Einsatz von Fuzzy Logic und Fuzzy Arithmetic - Generierende Software zum Aufbau eines kennzahlenbasierten Qualitätsinformationssystems für die Kleinserien- und Einzelfertigung, Diss. TU Darmstadt, PTW, Aachen: Shaker
- Kaufmann, A.; Gupta, M. M. (1991): Introduction to Fuzzy Arithmetic – Theory and Applications, New York: Van Nostrand Reinhold
- Neitzel, H. (1997): Stand der Diskussion um Ökobilanzen im Rahmen der ISO- und DIN/NAGUS-Arbeiten zur Methodenentwicklung, in: FGU Berlin (Hrsg.): Produktbezogene Ökobilanzen V, UTECH Berlin '97, S. 15-23
- OMG (Hrsg.) (1995): The Common Object Request Broker: Architecture and Specification – Revision 2.0
- Pant, R.; Jager, J.; Atik, A.; Schulz, H. (1998): Methoden und Instrumente zur Einbindung einer vergleichenden ökologischen Beurteilung von Lösungsalternativen in den Produktentwicklungsprozeß, in: VDI (Hrsg.): Markt- und Kostenvorteile durch Entwicklung umweltverträglicher Produkte, Tagungsband, Tagung Fellbach 09./10.06.1998, Düsseldorf: VDI-Verlag,
- Pohl, Ch.; Roš, M. (1996): Sind Ökobilanzen zu präzise?, in: Ranze, C. (Hrsg.): Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen, 2. Bremer Klippingstworkshop, Marburg: Metropolis, S. 121-136
- Rice, G. (1996): LCA Software Review – A Review of Commercial LCA Software, with Specific Emphasis on European Industrial Applications, Centre for Environmental Strategy, University of Surrey
- Salski, A. (1993): Fuzzy-Sets-Anwendungen in der Umweltforschung, in: Reusch, B. (Hrsg.). Fuzzy-Logic – Theorie und Praxis, Heidelberg: Springer
- Schott, H.; Birkhofer, H.; Grüner, C.; Dannheim, F. (1997): Sustainable Life-Cycle Engineering – A Challenge for Design Science, in: Life Cycle Networks '97, 4th International CIRP Seminar on Life Cycle Engineering
- Siegenthaler, C.; et al. (Hrsg.) 1995: Ökobilanz-Software Marktübersicht 1995 – Eine Übersicht der PC-Programme zur Erstellung von Produkt- und Betriebsökobilanzen, Ö.B.U./A.S.I.E.G.E.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (1995): Ökobilanz für Getränkeverpackungen, Berlin (Texte 52/95)
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (1997): Materialien zu Ökobilanzen und Lebensweganalysen – Aktivitäten und Initiativen des Umweltbundeamtes, Berlin (Texte 26/97)
- Zahn, E.; Schmid, U.; Seebach, A. (1996): Zusammenspiel von Ökonomie und Ökologie, in: Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, Berlin; Heidelberg; New York: Springer, S. 65-90