

# Grundlagen zur Bewertung kreislaufgerechter, nachhaltiger Baustoffe, Bauteile und Bauwerke

Prof.Dr. Niklaus Kohler,  
Institut für Industrielle Bauproduktion (ifib)  
Universität Karlsruhe (TH)

## Zusammenfassung

Die Grundlage der ökologischen Bewertung von Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken besteht in einer möglichst umfassenden und nachvollziehbaren Bilanzierung der Energie- und Stoffflüsse. Die Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA) wurde durch die Wahl geeigneter Systemgrenzen und Allokationsregeln an den Baubereich angepaßt. Für Baustoffe werden kumulierte Sachbilanzen (unter Berücksichtigung der Vorstufen) erstellt. Bauwerke werden aufgebaut aus Bauwerksteilen im Sinne der Elementkostenplanung. Elemente werden ihrerseits aus Baustoffen und Bauprozessen zusammengesetzt. Dadurch wird eine gleichzeitige Berechnung von Stoffflüssen (Ressourcenentnahme und Emissionen) Energieflüssen und Baukosten ermöglicht und die Grundlagen für eine umfassende Bewertung im Bereich der Entwicklung von Baustoffe und Bauwerksteile, der Planung und Nutzung von Bauwerken und der Bewirtschaftung von Beständen gebildet.

## 1. Einleitung

Im Anschluß an die Passivsolar- und Niedrigenergiegebäudeforschung wurden die vergegenständlichte Energie und der Primärenergieaufwand von Gebäuden untersucht und erweitert auf die energiebedingten Emissionen [KOH87] , [KOH87a]. Es zeigte sich, dass diese Verfahren erweitert werden mußten auf die Betrachtung der gesamten Umweltbelastung durch den Bauprozess. Dazu wurden die Methoden der wissenschaftlichen Ökologie auf den Betrachtungsgegenstand Bauwerk angewendet. Die dabei eingesetzten Energie- und Stoffflussbilanzierungsverfahren stammen aus der Verfahrenstechnik und aus der Systemökologie [ODU83], die ein Teil der Ökologie als "Wissenschaft von den Beziehungen des Organismus zur umgebenden Außenwelt " [E.Haeckel] darstellt . Die Umwelt kann nach H. Odum [ODU71] als "Organismen, chemischen Zyklen, Wasser, Luft, Menschen, Maschinen, Boden, Städte, Wälder, Seen, Flüsse, Teiche, Ozeane; alle verbunden durch Energieflüsse die Stoff- und Informationsflüsse " definiert werden. Sie kann mit einer Systemsprache beschrieben werden, die im wesentlichen auf Energieflüssen beruht. Dadurch können alle Zustandsänderungen, die von Energieumwandlungen begleitet werden, dargestellt werden. Der Ansatz wurde später von Odum und anderen auf Geld- und Informationsflüsse erweitert .

Es besteht heute eine ausführliche Forschungsaktivität auf dem Gebiet der Stoffflüsse [BAC91],[BAC96]. Umweltbelastung durch den Bauprozess beruhen letztlich immer auf Ursache-Wirkungszusammenhängen, die über Energie- und Stoffflüsse verbunden werden. Da die Modellierung dieser Vorgänge im Falle von Gebäuden während ihrer Lebensdauer sehr aufwendig ist, beschränken sich die vorliegenden Planungshilfsmittel (Labels, Empfehlungen, Positiv- und Negativlisten, Deklarationsraster u.a.) auf qualitative Aspekte, deren Grundlagen und Systemgrenzen oft nicht mehr nachvollziehbar sind. Die Entwicklung von Baustoffen und Recyclingverfahren stößt ihrerseits an Grenzen der Bewertbarkeit. Zu eng gefaßte Systemgrenzen können zu gesamthaft gesehen suboptimalen Lösungen führen. Die Modellierung von Energie- und Stoffflüssen von Gebäuden während ihrer Lebensdauer hat in den letzten Jahren beträchtliche Fortschritte gemacht [KOH91][KOH96]. Die Grundlagen dieser Modellierung werden im folgenden beschrieben.

## 2. Umweltbelastung

Bau- und Nutzungsprozesse belasten die Umwelt in zwei Arten: durch die Entnahme von Ressourcen aus der Natur und durch die Rückführung von Emissionen in die Natur. Beide Vorgänge sind nur beschränkt in wirtschaftliche Marktmechanismen eingebunden. Die dabei entstehenden Schäden werden zum großen Teil sozialisiert und bilden die sog. externen oder sozialen Kosten [OTT96]. Die Modellierung dieser Vorgänge ist die Voraussetzung für die Minimierung der Entnahme von Ressourcen und von Emissionen und der direkten Rückführung von Energie- und Stoffflüssen. Eine wesentliche Randbedingung ist dabei die Erhaltung und Erhöhung der Gebäudequalität an sich (Anlagen und Behaglichkeit). Die Abbildung dieser Flüsse und die Ermittlung der Auswirkungen auf die Umwelt und die Menschen wird auch als Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse (LCA-lifecycle analysis oder life cycle assessment) bezeichnet. Die wesentlichen Schritte sind das Festlegen der Systemgrenzen, die Prozessmodellierung, die Zuordnung der Effekte zu den Referenzgrößen, den funktionalen Einheiten und die Gesamtbewertung. Das Vorgehen ist heute weitgehend definiert durch die Publikationen der SETAC [SET93],[SET94]. und seit kurzem auch normativ geregelt [ISO95], [ISO97]. Eine Lebenszyklusanalyse besteht aus 4 Schritten :

- A - Festlegen des Bilanzierungsziels (Goal definition)
- B - Sachbilanz (Life cycle inventory)
- C - Wirkungsbilanz (Classification)
- D - Bilanzbewertung (Evaluation)

Die Schritte C und D werden auch als "Life cycle impact analysis" (LCIA) bezeichnet.

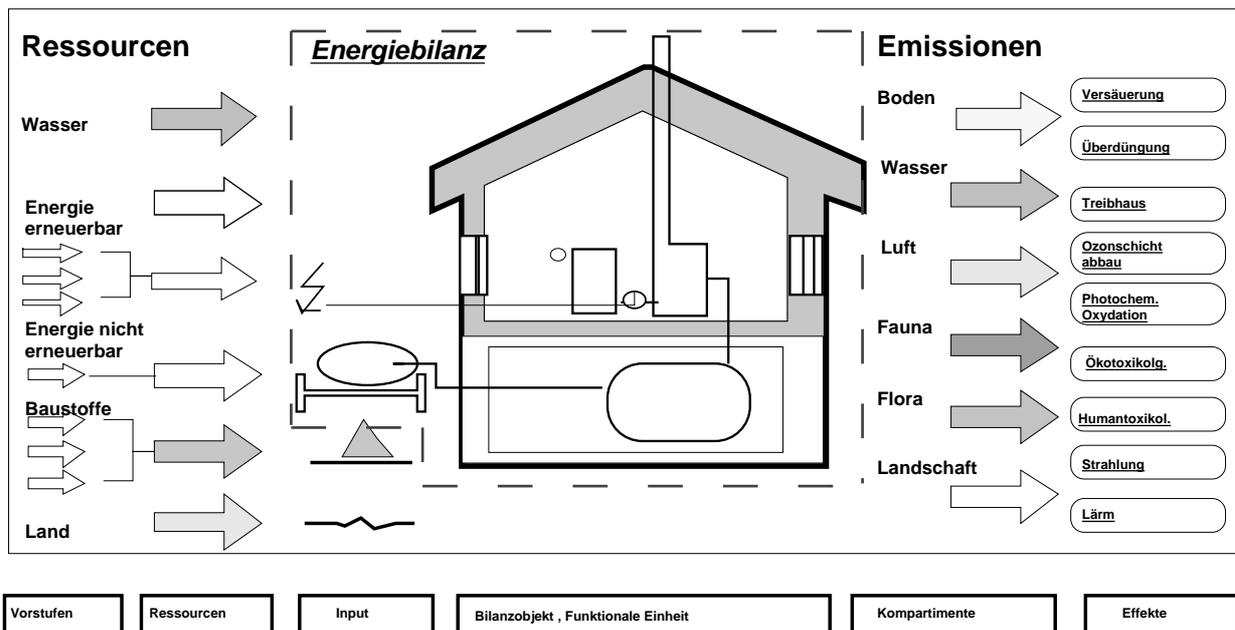


Abb. 1 : Von der Energiebilanz zur Ökobilanz

Dieses Vorgehen wurde übernommen und auf Gebäude angewandt [BEW92], [HEI95]. Die Umwelteinwirkungen eines Gebäudes können in drei Bereiche aufgeteilt werden :

a) Ressourcenentnahme aus der Umwelt

Dabei entstehen einerseits Umwelteinwirkungen durch Emissionen für die Deckung des Energiebedarfs von Prozessen aller Art (Transport, Abbau, Energieumwandlung etc.), andererseits entstehen auch direkte Auswirkungen wie Erosion und Landumwandlung (Flächenbedarf). Die Verknappung der Ressourcen kann sich auf verschiedene Gebiete beziehen :

- Stoffe: biotische (nachwachsbar, erneuerbar), abiotische

- Wasser: ein räumlich-zeitliches Problem, die Wassermenge im System ist konstant
- Flächen : Flächennutzung bedeutet Umwandlung von Flächen mit hoher Biodiversität in solche mit niedrigerer Biodiversität .
- Arten: Verringerung der Biodiversität durch Ausrotten von Pflanzen- oder Tierarten)

b) Auswirkungen auf die Umwelt durch Bauprozesse, Nutzung und Entsorgung

Es entstehen Umwelteinwirkungen durch Emissionen (z.B. durch Verbrennungsprozesse) sowie Veränderung der Umwelt durch Gebäude an sich (Versiegelung beeinflusst das Mikroklima, Zerstörung von Biotopen)

c) Die direkte Rückführung von Stoffflüssen (Wärme und Wasserrückgewinnung, Weiternutzung, Umnutzung, z.T. Recycling) sowie die Verlängerung der Verweilzeit von Elementen und Komponenten können die Stoffflüsse reduzieren. Im weiteren können positive Effekte durch ökologische Ausgleichsmassnahmen erreicht werden.

### 3 Der Lebenszyklus von Gebäuden

Die Lebenszyklusproblematik wurde zuerst anhand der Gesamtkosten eines Objektes oder einer Dienstleistung während seiner Lebensdauer (Investitionskosten, laufende Kosten und Entsorgungskosten) untersucht. [DHIL89]. Der Einbezug der Umweltproblematik hat zu einer räumlichen und zeitlichen Erweiterung der Systemgrenzen geführt. Die Energie- und Stoffflüsse eines Gebäudes können verschiedenen zeitlichen Phasen und funktionalen Prozessen zugeordnet werden. Die Prozesse und Phasen werden durch Systemgrenzen bestimmt, die später erlauben, Auswirkungen bestimmten Phasen oder Prozessen zuzuordnen. Das Energie- und Stoffflussmodell wurde erweitert durch die Überlagerung von monetären Flüssen und Informationsflüssen. Der Planungsprozess als solcher kann als Informationsfluss abgebildet werden. Diese Flüsse sind stark redundant und vernetzt. Die gleichzeitige Modellierung erlaubt die Auswirkungen von Einzelmassnahmen auf verschiedenen Ebenen und über mehrere Stufen abzubilden und damit im Planungsprozess einzusetzen.

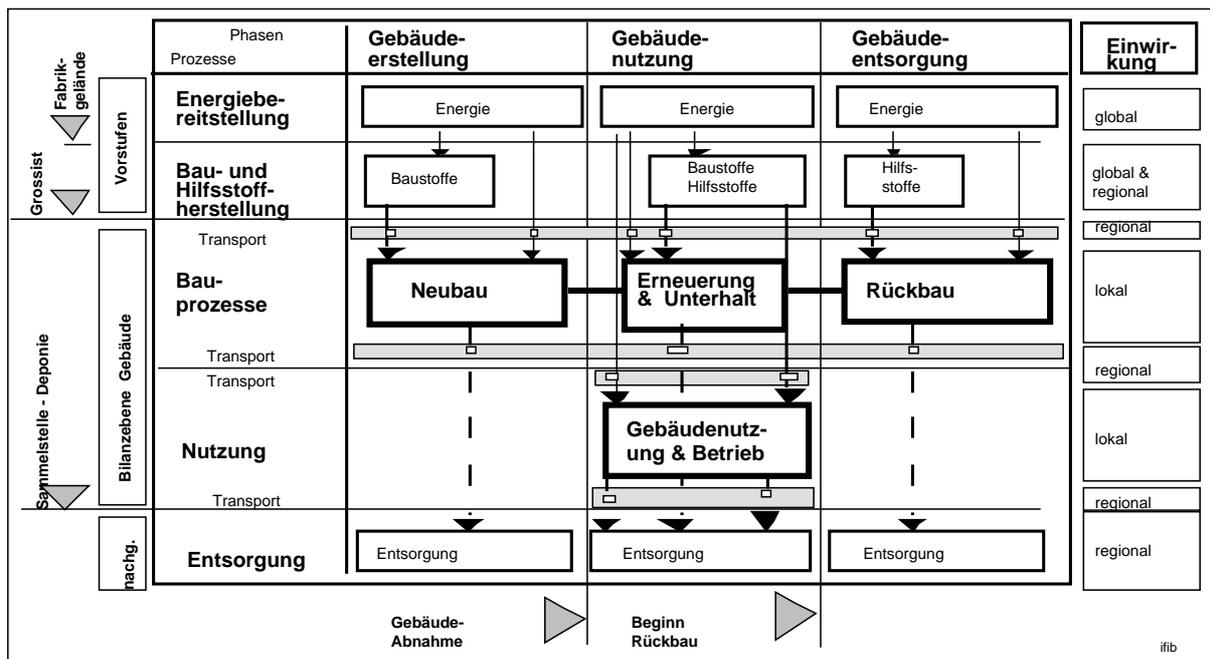


Abb. 2 : Lebenszyklusmodell eines Gebäudes

Die Anwendung von vollständigen Energie- und Stoffflussbilanzen ist bis jetzt auf die Forschung beschränkt u.a. durch den großen Aufwand für den Gebäudebeschrieb d.h. für die Datenerfassung im Falle der Anwendung von elektronischen Planungshilfsmitteln. Die Versuche der direkten Koppelung an elektronische Zeichensysteme waren bisher nicht erfolgreich, weil aus Zeichnungen vor allem Mengen, nicht aber Eigenschaften von Bauteilen ermittelt werden konnten [BJÖ92]. Es zeigt sich, dass der (semantische) Leistungsbeschrieb eines Gebäudes eine viel größere Anzahl von Informationen enthält. Es lag deshalb schon vom kombinierten Ansatz (Energie- Stoff-Kosten-Informationsfluss) nahe, von der Gliederung und dem Beschrieb der Kosten- und Ausführungsplanung auszugehen und die dabei verwendeten Daten in einer möglichst neutralen Weise zu modellieren und die Verbindung zu CAD und AVA Planungswerkzeugen über Schnittstellen zu verwirklichen. [KOH97].

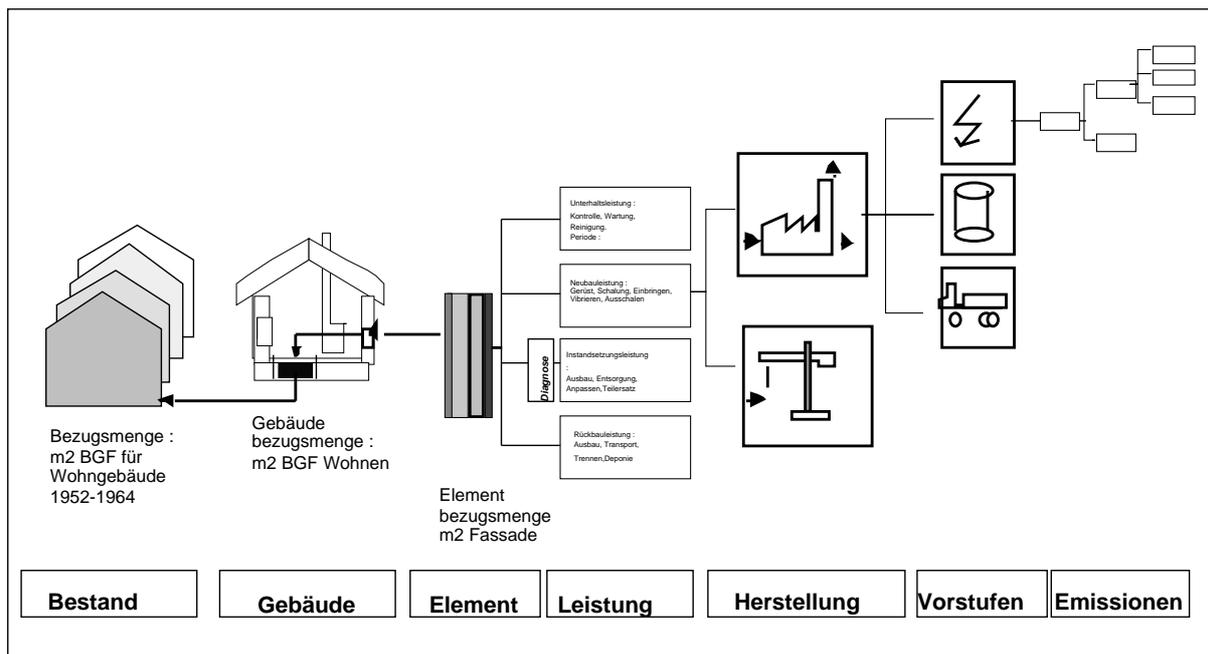


Abb. 3 Verknüpfung von Elementgliederung, Bauleistungen sowie Energie- und Stoffflussbilanzierung

Die Implementierung beruht auf vordefinierten Komponenten auf Stufe von bauleistungsbeschrieben die Material-, Prozeß- und Strukturinformationen beinhalten. Mit Hilfe dieser Komponenten können Gebäude in einheitlicher Art und Weise auf verschiedenen Aggregationsstufen (Vorstufen bis Gebäudebestände) und für verschiedene Sichten (Kosten, Stoffflüsse, Energie etc.) zusammengestellt werden. Diese Informationen werden in einer Datenbank abgelegt. Ausgangspunkt sind Bauleistungen wie sie verschiedene Anbieter erstellt haben, z.B. SirAdos. Mit Hilfe einer normalisierten Gliederung DIN 276 [DIN95] mit Zusätzen werden Element (z.B. 1 m2 Beton Außenwand, Dämmung und Putz mit allen prorata Anschlüssen sowie provisorischen Teilen wie Schalung, Gerüst, Verkleidung) aus Bauleistungen aufgebaut. Im Durchschnitt enthält ein Element zwischen 10 und 20 Leistungspositionen. Der Text einer Leistungsposition muss zuerst halbautomatisch in seine energie- und stoffflussrelevanten Bestandteile wie Baustoffe (z.B. Baugips), Bauprozesse (Mörtelapplikation mit Putzmaschine), Bauprodukte (Stahlprofile), Mengen (m2, kg, Maschinen Laufzeit etc.), Form (z.B. Platte) sowie Verbindungsarten (z.B. geklebt, geschraubt), Zustand (wenn es sich um bestehende Teile die erneuert werden sollen handelt) zerlegt werden. Es bestehen vordefinierte Datenbanken für Sachbilanzen von Baustoffen und Bau-

prozessen. Im weiteren gibt es Datenbanken für Baumaschinen, Profillisten, Schraubenarten, Sanitär- und Elektrobestandteile etc.

#### 4. Teilmodelle und Allokationsregeln

Es gibt innerhalb der Gesamtmodellierung der Stoffströme im Bauprozess auch spezifische Teilmodelle für besondere Sichten.

##### 4.1 Regionale Stoffflüsse :

In der aktuellen Diskussion um Stoffstrommodelle stehen sich zwei Verfahren gegenüber :

- Die Stoffflussanalyse (SFA) und
- Die Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die SFA untersucht alle Stoffflüsse in einem bestimmten Raum während eines bestimmten Zeitraums (funktionale Einheit). Sie verwendet dazu sowohl Input/output als auch Prozessketten Techniken [BER95]. Der Raum kann dabei eine Region, ein Land oder aber auch eine Betriebseinheit sein [BAC91],[BAC96].

Die LCA untersucht alle für die Bereitstellung eines Produktes oder Dienstleistung (funktionale Einheit) notwendigen Stoffflüsse unabhängig von ihren räumlichen und zeitlichen Eigenschaften [SET93]. Sie verwendet dazu Prozesskettenanalysen und hybride Ansätze, die nach Abschluss von Prozesskettenanalysen bei Erreichen der Systemgrenze die abgeschnitten Flüsse über makroökonomische Verfahren (Input/output Matrizen) ergänzen.

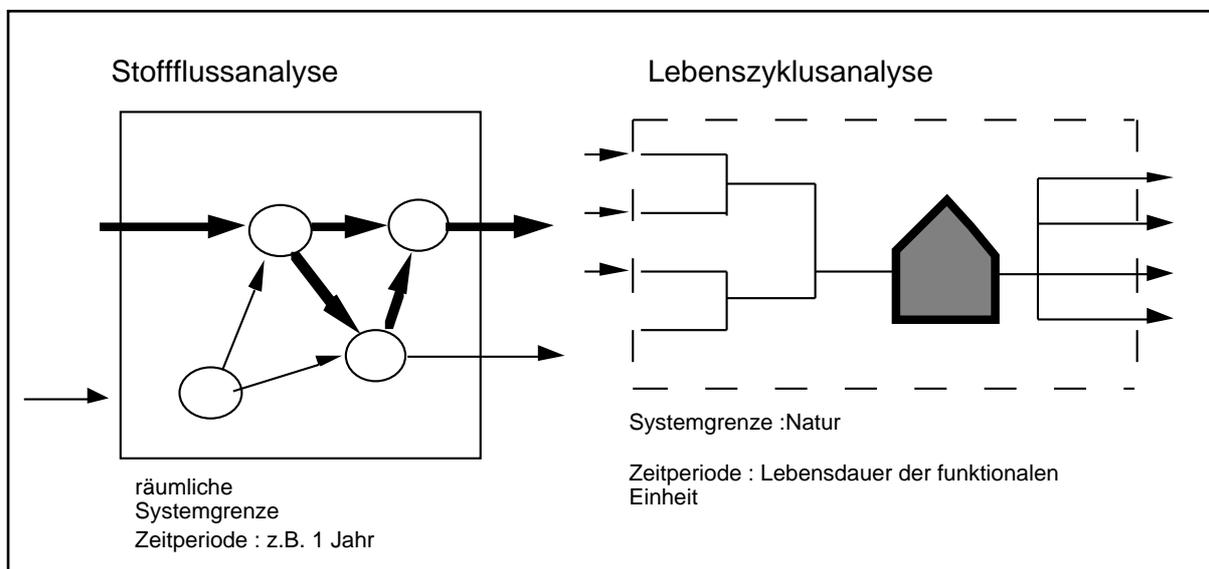


Abb.4 : Stoffflussanalyse (SFA) und Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die materielle (Erfassungs-) Grundlage beider Verfahren ist identisch. Sie unterscheiden sich durch die funktionale Einheit (d.h. die Intention des Modellerstellers) und die Form der Systemgrenzen.

Die klassischen Anwendungen der SFA sind regionale Stoffflussuntersuchungen die dazu dienen, die Stoffflüsse einer Region zu identifizieren und die Entwicklung (Trends) oder Auswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen abzuschätzen.

Die Technik der SFA kann aber auch innerhalb einer Produktionseinheit verwendet werden.

Die klassischen Anwendungen der LCA sind die Ermittlung der Umweltbelastung die durch ein Produkt oder eine Dienstleistung über einen langen Zeitraum verursacht werden. Sie dienen der Optimierung oder dem Vergleich von Produkten und Dienstleistungen.

Für die Untersuchung einzelner Bauwerke während ihrer Lebensdauer werden die LCA Methoden eingesetzt. Allerdings handelt es sich bei Gebäuden um wesentlich komplexere und langlebigere Produkte als z.B. Verpackungen. Viele Belastungen während der Nutzungsphase sind größer als während der Erstellungsphase. Man könnte eher von Produkt-Systemen sprechen. Für die Untersuchung eines Gebäudebestandes (der eine räumlich begrenzte Ausdehnung hat) werden SFA verwendet. Es ist nicht möglich über SFA Entwicklungsszenarios für Gebäudebestände zu ermitteln auf Grund ihrer Zusammensetzung aus komplexen Produkten mit hohen Zeitkonstanten. Es muss deshalb eine Kombination von SFA (Bestand) und LCA (Einzelgebäude) gesucht werden.

Das in der Studie für die Enquete Kommission vorgeschlagene Vorgehen das top-down und bottom-up Ansätze verbindet, erlaubt dies. Es handelt sich nach unseren Kenntnissen um die erste Studie dieser Art [ENQ96].

#### **4.2 Verfügbarkeit der Ressourcen :**

Diese Modelle betreffen vor allem den Bereich Kies, Sand und Naturstein. Ziel ist es zu ermitteln, wie gross die verfügbaren Reserven sind, wo sie liegen und unter welchen ökonomischen, technischen, planerischen etc. Bedingungen sie abgebaut werden können. Die Voraussage wie lange diese Reserven ausreichen, hängt vom Modell der Entwicklung des Bestandes (und der Infrastruktur) ab. [FLEK98]

#### **4.3 Bauschutttaufkommen :**

Modelle die das Ausmaß des zukünftigen Bauschutts abschätzen beruhen auf Bestandsmodellen. Das Schutttaufkommen hängt ab von :

- Einschätzung des Stofflagers im Bestand
- Neubauraten, Erneuerungs- und Abrissraten
- Spezifischen Abfallflüssen für diese Tätigkeit
- Management der Abfälle (Trennung, Zuordnung etc.)
- Weiterverwendung, Recycling, thermische Verwertungsanteile

Diese Modell müssen somit alle Anforderungen an Bestandsmodelle erfüllen. Sie interessieren sich z.Z. nicht für die Umweltbelastungen i.A., die Input Stoffflüsse und die Nutzung der Gebäude [GOE96].

#### **4.4 Allokationsregeln für die Weiterverwendung von Baustoffen und Bauteilen .**

Die Allokationsregeln stellen die Weiterverwendung, bez. das Recycling von Baustoffen in einen größeren Zusammenhang. Es zeigt sich, dass im Rahmen dieser Betrachtungsweise das Hauptgewicht auf der effektiven Verwendung von schon im Kreislauf befindlichen Stoffen und Teilen liegt. Die damit erzielte Ressourceneinsparung und die nicht anfallenden Emissionen für die Herstellung von neuen Teilen und Baustoffen kann genau bestimmt werden. Alle Angaben zu einem möglichen Recycling am Ende der Lebensdauer sind zwar nützliche Informationen und zusätzliche Entscheidungsgrundlagen, sie können aber nicht bilan-

ziert werden. Der Versuch diese Prozesse im Voraus zu bilanzieren in Form von Gutschriften, Bonus, Feedstock - energy etc. führt zu inkonsistenten Modellen und wird nicht mehr weiterverfolgt.

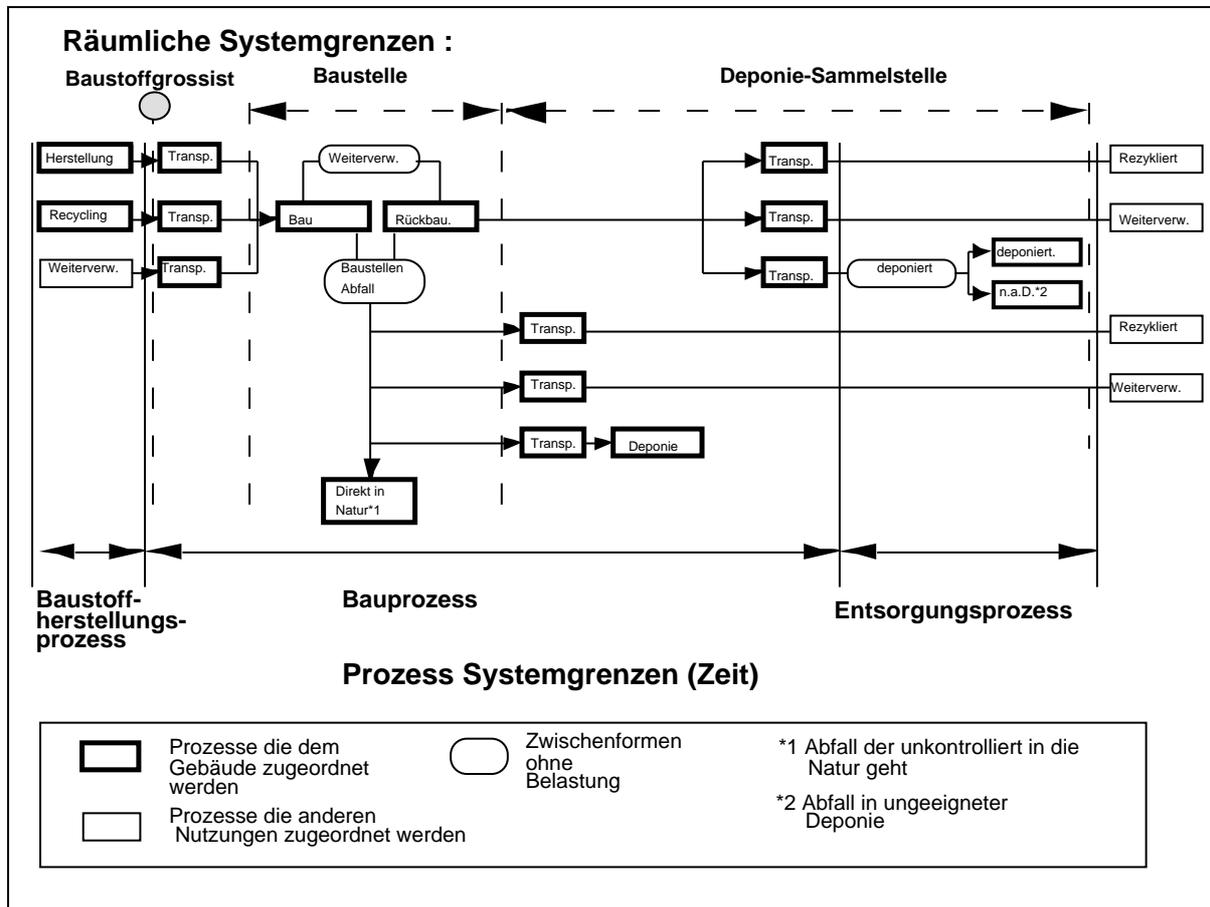


Abb.5: Zuordnung von downstream Stoffflüssen für die Bewertung [REG97]

### Downstream Modelle und Transferrfunktionen :

In den existierenden Modellen werden downstream Stoffflüsse wie folgt erfasst :

- Weiterverwendung (nur Transport für neue Verwendung)
- Thermische Verwertung (Emissionen pro produzierte Energieeinheit)
- Deponie (Emissionen pro Deponietyp)

Für Recycling (Transport und Aufbereitung für neue Verwendung) müssten eigentlich Transferrfunktionen pro Baustoff (z.B. Glaswolle, Fensterglas) oder Bauprodukte (z.B. PVC Fenster, Heizkesseln etc.) vorliegen. Erste Datensätze liegen vor [SUT96]

## 5 Datengrundlage

Neben der aufwendigen Modellierung der verschiedenen Flüsse und Gebäude wurden die Entwicklung und Anwendung von LCA Techniken lange durch eine fehlende oder inkonsi-

stente Datengrundlagen behindert. Die meist mangelhaften Angaben zu Systemgrenzen verunmöglichten die Verwendung von Literaturdaten zur vergegenständlichten Energie. Das Interesse der Industrie an Ökobilanzierung und Ökocontrolling haben in den letzten Jahren zu einer guten Zusammenarbeit zwischen Forschung, Industrie und Umweltberater geführt. Es entstanden Prozessanalysen zu Energiesystemen, Transportsystemen und z.T. Entsorgungsprozessen. Auf dieser Grundlagen konnten dann konsistente Sachbilanzen für die meisten wichtigen Baustoffe erstellt werden.

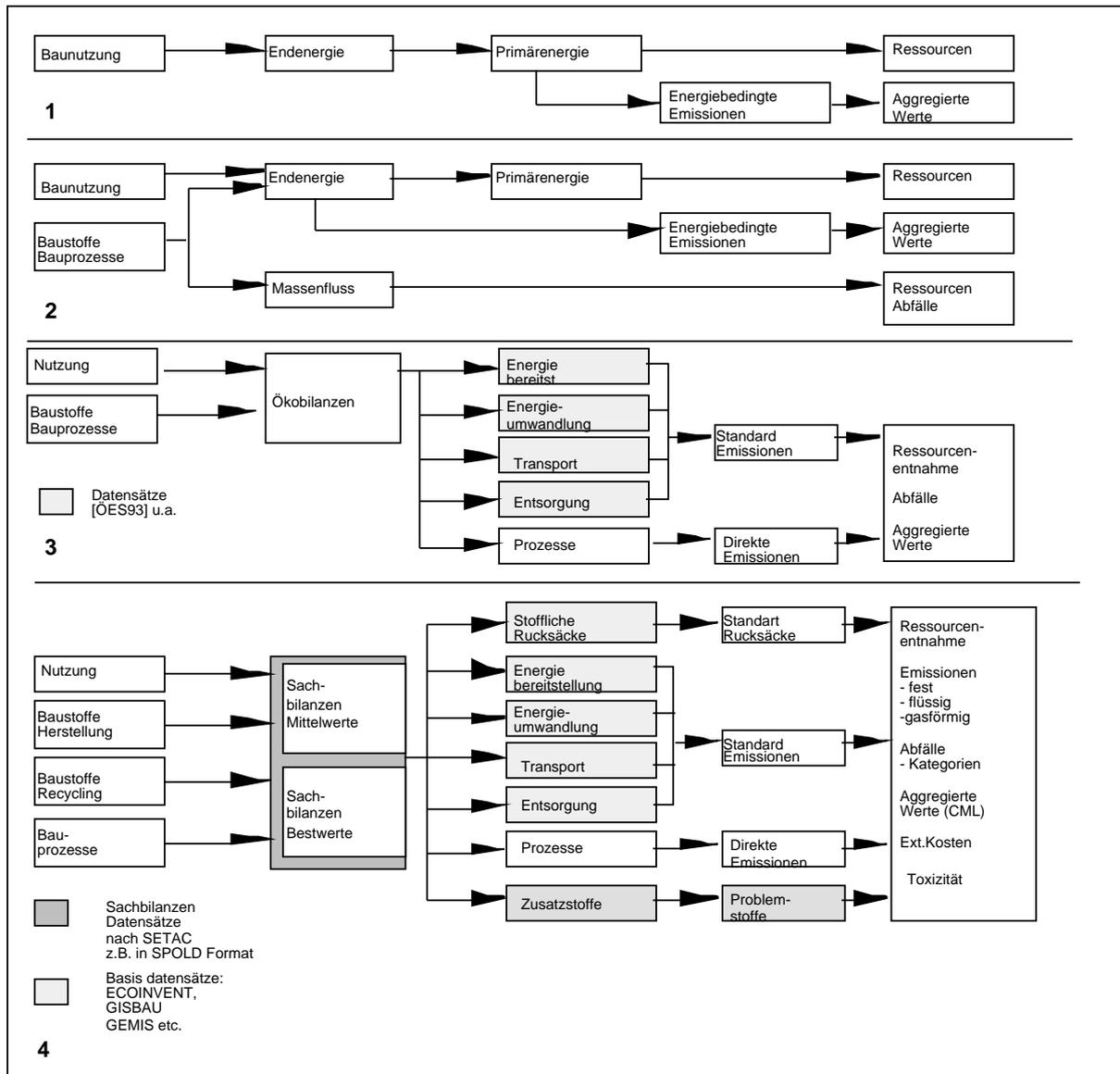


Abb.6: Entwicklung und Differenzierung der Baustoffherstellungsprozesse und Nutzungsprozesse.

Man kann davon ausgehen, dass die von der ETH- Zürich initiierten ÖKOINVENTARE für Energiesysteme (ECOINVENT Datenbank) [FRI95] und die darauf aufbauenden Baustoffökoinventare für ca. 150 Baustoffe, die in Zusammenarbeit mit der Industrie durch die HAB Weimar, das ifib Universität Karlsruhe und die ETHZ - ESU erstellt wurden, heute eine konsistente und aktuelle Datengrundlage darstellen [ÖIB95]. Austauschformate für zukünftige Sachbilanzen werden durch SPOLD [SPO96] geliefert. Dadurch wird es möglich modular neue Materialien aus anderen Materialien und Prozessen aufzubauen und kumulierte Bilanzen zu erstellen. Jedem Baustoff werden so ca. 450 Ressourcen oder Emissionen zugeordnet auf

deren Grundlage sich eine Vielzahl von aggregierten Bewertungskoeffizienten berechnen läßt. Im weiteren können diesen chemisch und verfahrenstechnisch definierten Baustoffen eine beliebige Anzahl von weiteren Eigenschaften (bauphysikalisch, toxikologisch etc.) zugeordnet werden. Erweiterungen in Richtung der beliebigen Wahl von Vorstufendatensätzen z.B. die GEMIS Vorstufen [GEM97] sowie des Einbezugs von Zusatzstoffen über Standardrezepturen sind in Vorbereitung [BUW95],[GIS91].

Bauleistungen und Bauelemente können sowohl von Herstellern als auch von Institutionen die Bauleistungen (Bauleistungskataloge) definieren mit geeigneten Programmen erstellt werden. Sie werden den Anwendern dann im Rahmen von existierenden und neuen Planungshilfsmitteln zur Verfügung gestellt [REG97], [KLI96].

Die Abb.4 zeigt die Entwicklung und der Differenzierung der Baustoffherstellungsprozesse und Nutzungsprozesse. Auf Stufe 1 wurde die nutzungsbedingte Endenergie mittels Koeffizienten in Primärenergie und Emissionen. Auf Stufe 2 wurden Stoffflüsse als Bewertung angefügt. Auf Stufe 3 wurde von modularen Ökobilanzen für Nutzungs- und Herstellungsprozesse ausgegangen. Zur Zeit werden Verfahren der Stufe 4 implementiert indem zwischen Mittelwert und Bestwerten unterschieden wird und die prozessbedingten Emissionen über Zusatzstoffe und Standardrezepturen mit Angaben zu Problemstoffen ergänzt werden.

## 6 Bewertungsmethoden

In den LCA Schritten Wirkungsbilanz und Bewertung kommen eine größere Anzahl von Bewertungsverfahren zum Einsatz. Es kann unterschieden werden zwischen effektorientierten Kriterien und Vollaggregationen (Ressourcen, Emissionen und Risiko) sowie zwischen reinen Stoffflussindikatoren [IÖW96]. Die Frage, wie weit die Aggregation sinnvoll ist, läßt sich nicht anwendungsunabhängig bestimmen.

<p><b>Ressourcenentnahme :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stofffluss (kg)</li> <li>- Nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand (MJ)</li> <li>- Erneuerbarer Primärenergieaufwand (MJ)</li> <li>- Landinanspruchnahme nach Flächenkat. (m<sup>2</sup>)</li> </ul> <p><b>Emissionen :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Treibhauseffekt (CO<sub>2</sub> Äquivalent)</li> <li>- Säurebildung (SO<sub>2</sub> Äquivalent)</li> <li>- Ozonschichtabbau (CFC1 Äquivalent)</li> <li>- Überdüngung (kg Phosphat)</li> <li>- Photochemische Oxydation (kg Ethylen)</li> <li>- Humantoxikologische Belastung (Körpergewicht)</li> <li>- Ökotoxikologische Belastung (m<sup>3</sup> Wasser)</li> </ul>	<p><b>Direkte Umwelteinwirkungen an Ort :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abflussbeiwert der gesamten Parzelle ( )</li> <li>- Vegetationsfaktor ( )</li> </ul> <p><b>Humantoxikologische Einwirkungen in Innenräumen und im Arbeitsprozess :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Totale VOC Komponenten</li> <li>- Gefahrstoffe nach Arbeitsschutz</li> </ul> <p><b>Direkte und externe Kosten :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Investitionskosten (DM)</li> <li>- Erneuerungskosten (DM)</li> <li>- Unterhaltskosten (DM)</li> <li>- Betriebskosten (DM)</li> </ul>
--	--

Abb.7 : Bewertungskriterien

Die Spezifität der Gebäude führt nach Ansicht der Verfasser dazu, dass eine größere Anzahl von Bewertungskriterien in bauspezifischen Bewertungsprozessen parallel eingesetzt werden müssen. In Frage kommen dabei sowohl die effektorientierten CML Kriterien (sowie Risiko) sowie zwischen reinen Stoffflussindikatoren [IÖW96]. Die Frage, wie weit die Aggregation sinnvoll ist, läßt sich nicht anwendungsunabhängig bestimmen. Die Spezifität der Gebäude führt nach Ansicht der Verfasser dazu, dass eine größere Anzahl von Bewertungskriterien in bauspezifischen Bewertungsprozessen parallel eingesetzt werden können. In Frage kommen dabei sowohl die effektorientierten CML Kriterien [HEJ92] als auch spezifische Ressourcen- und Recyclingorientierte Kriterien. Ein n-dimensionaler Lösungsraum wird

durch extern festgelegten Zielwerte gebildet. Eine Lösung ist dann akzeptabel, wenn sie sich innerhalb dieses Lösungsraumes befindet.

## 8 Diskussion

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Methoden und die Datengrundlage für eine kombinierte Berechnung von Umweltbelastung, Energiebedarfsberechnung und Kostenberechnung existieren. Sie können als Grundlage für die Entwicklung von Baustoffen, und Bauwerksteilen und integrierte Planungshilfsmitteln verwendet werden. Im weiteren dienen sie zur Simulation von Gebäudebeständen [EQK96],[SCH97]. Die wesentlichen Forschungslücken bestehen nach Ansicht des Verfassers zur Zeit im Bereich der Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen sowie der Simulation einer größeren Anzahl von Gebäuden zur Ermittlung von Referenzwerten. Im weiteren sollten die Baustoffsachbilanzen ausgebaut werden, um zusätzlich zu mittleren Industriewerten noch Bestwerte festzulegen. Die mittelfristigen Bestrebungen gehen in Richtung der Modellierung von Stoffflüssen von (nationalen) Gebäudebeständen sowie von Untersuchungen der Erneuerungszyklen und der zukünftigen Wiederverwendbarkeit von großen Baustoffmengen. Es ist anzunehmen, dass sich die Gebiete Ökobilanzierung, Ökocontrolling, (Umwelt)Qualitätsmanagement, Arbeitsschutz und Innenluftqualität stark annähern werden durch die Verwendung von gemeinsamen Datenbanken.

## Bibliographie :

- [BAC91] BACCINI, P., BRUNNER P.H. : "Metabolism of the Anthroposphere"; Springer-Verlag, Berlin, 1991
- [BAC96] BACCINI, P.; BADER, H-P: Regionaler Stoffhaushalt. Spektrum Verlag Berlin 1996.
- [BER95] BEHRENSMEIER, R. ; BRINGEZU, S.: Zur Methodik der volkswirtschaftlichen Material-Intensitäts-Analyse: Ein quantitativer Vergleich des Umweltverbrauchs der bundesdeutschen Produktionssektoren. Wuppertal Papers Nr. 34, 1995
- [BEW92] Bundesamt für Energiewirtschaft. Handbuch: Methodische Grundlagen für Energie- und Stoffflussanalysen 1992
- [BJOR92] BJÖRK, B.-C. A Unified Approach for Modelling Construction Information . Building and Environment, special issue on databases for project integration, 1992.
- [BUW95] BUNDESAMT FÜR UMWELT : Bauprodukte und Zusatzstoffe in der Schweiz. BUWAL Schriftenreihe 254. 1995
- [CEN92] EN 832: 1992 Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs. 1992
- [DHIL89] DHILLON B.S. Life cycle costing, New York 1989
- [DIN95] DIN 276: Kosten von Hochbauten. 1995
- [EQK96] ITAS, IFIB, IWU, Uni. Dortmund, Fachhochschule Kiel : Stoffströme und Kosten im Bereich Bauen und Wohnen. Studie im Auftrag der Enquete Kommission zum Schutz von Mensch und Umwelt des deutschen Bundestages. Karlsruhe. 1996.
- [FLEK98] Fleckenstein K., K. Hochstrate und A. Knoll: Prognose der langfristigen Nachfrage nach mineralischen Baurohstoffen als Grundlage für ein Rohstoffsicherungskonzept. Endbericht. Studie im Auftrag der BfLR Bonn-Bad Godesberg, in Druck
- [FRI95] FRISCHKNECHT, R et al : ÖKOINVENTARE für Energiesysteme. ETHZ. Bern 1995.
- [GEM95] ÖKO-INSTITUT: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2. i.A. Darmstadt/Berlin/Kassel (1995)
- [GEO96] GOERG, H.: Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein für Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Diss. Th Darmstadt. Darmstadt 1996.
- [GIS95] GISBAU, 1995: Gefahrstoffe beim Bauen, Renovieren und Reinigen. Berufsgenossenschaften der Bauwirtschaft, Frankfurt/Main, 1995
- [HEI95] Heitz, S; Barth, B; Eiermann, O; Hermann, M; Kukull, E: Life cycle models of buildings. In EuropIA'95. Paris 1995.
- [HEJ92] HEIJUNGS, R. ET AL (1992): "Environmental life cycle assessment of products; Guide and Backgrounds (Vol. I+II)"; National Reuse of Waste Research Progr. (NOH), CML, Leiden,
- [IÖW96] BRAUNSCHWEIG, A; FÖRSTER, R ; HOFSTETTER, P; MÜLLER-WENK, R : Developments in LCA Valuation. IÖW Diskussionsbeitrag Nr.32. St.Gallen 1996.

- [ISO95] ISO : ISO14001 Environmental Management System . Draft Standard. 1995
- [ISO97] ISO/TC207/SC5: Life cycle assessment - principles and guide lines (ISO CD 14 040.2) Draft 1997) .
- [KLI97] KLINGELE, M.; KOHLER,N; HEITZ, S.; HERMANN, M.: Simulation of energy and mass-flows of buildings during their life cycle. CIB Second international conference Buildings and the Environment Paris June, 9-12, 1997
- [KOH87] KOHLER N: Energy Consumption and Pollution of Building Construction. ICBEM87. Internat. Congress on Building Energy Management. EPFL-Lausanne 1987.
- [KOH87a] KOHLER, N : Global Energy Cost of Building Construction and Operation. IABSE Proceedings P-120/87. IABSE Periodica 4/1987, Zürich.
- [KOH96b] KOHLER,N: Ökobilanzen im Bauwesen. Stand der Forschung und Perspektiven. Der Architekt. BDA. März 1996
- [KOH96] KOHLER,N ; KLINGELE,M: Simulation von Energie- und Stoffflüssen von Gebäuden während ihrer Lebensdauer. International Symposium of the CIB -Wien1996.
- [KOH97a] KOHLER,N: Life Cycle Models Of Buildings - a new approach. CAAD Futures '97 - München. 1997
- [KOH97] KOHLER,N. : Stand der Ökobilanzierung von Gebäuden und Gebäudebeständen. Tagung des BMBAU. Bonn, 1997
- [ODU71] ODUM, E.P : Fundamentals of Ecology. Philadelphia, 1971
- [ODU83] ODUM H.T.: System Ecology, New York,1983
- [ÖIB95] IFIB-HAB Weimar-ETHZ ESU: Ökoinventare von Baustoffen. Universität Karlsruhe -1995
- [OTT96] OTT,W, LEDERGERBER, E: Die vergessenen Milliarden. Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich. Verlag Haupt, Bern 1996
- [REG97] REGENER Regional Planning for the Development of Renewable Energies. Final report. APAS Projekt, EC-DG XIII, Contract RENA-CT94-0033. Edit. Ecole des Mines Paris 1997.
- [SCH97] SCHWAIGER B; BARTH, B; KOCH, M; KOHLER,N: Massflow, energy flow and costs of the German building stock. CIB Second international conference Buildings and the Environment Paris June, 9-12, 1997
- [SET93A] SETAC :A conceptual framework for Life-Cycle Assessment, Novem, 1993.
- [SET93] SETAC : A Technical Framework for Life Cycle Assessment, Novem. 1993
- [SPO96] SINGHOFEN, A et al: Introduction to a common format for life cycle inventory data. Spold status report 1996
- [SUT96] SUTER, P et al: Ökoinventare von Entsorgungsprozessen. BEW-Bern - 1996