

# Neue Aussagequalitäten der Stoffflußanalyse durch die Kombination mit Szenariotechnik und Parametervariation

T. Volz<sup>1</sup>, H. Florin<sup>1</sup>, M. Wiedemann<sup>2</sup> und P. Eyerer<sup>1</sup>

## Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) in general and Life Cycle Engineering (LCE) in special are well-known and approved tools for the support of decisions in early design and development phases of products, systems or services. Based on a material flow analysis, LCE models the technical, economic and ecological consequences of a life cycle. Since these models include a huge amount of basic data, the use of computers and of special software systems is necessary.

Most of the currently available software systems for LCA at least have a graphical component for the capture of material flows, a database with functions for the data management and a component for the calculation and the presentation of balances. But as LCE is a young scientific discipline, there still is a strong demand for functions supporting newest methodological developments (e.g. data quality indicators).

The software tool GaBi 3 (IKP, University of Stuttgart and PE Product Engineering GmbH) is available since April 98 and takes this into account. Newest developments of GaBi 3 are the sankey-editor and the parametric process model including non-linear functions. These features are providing more flexibility of modeling and the possibility of parameter variation and scenario analysis.

## Einleitung

Die Ganzheitliche Bilanzierung (Eyerer 1996), deren Methodik seit 1989 am IKP (siehe Fußnoten 1) kontinuierlich weiterentwickelt und im Verbund mit der PE Product Engineering GmbH in industriellen Kooperationsprojekten auch angewendet wird, unterstützt nachhaltig sinnvolle Entscheidungen schon in frühen Designphasen. Die Entscheidungsunterstützung erfolgt dabei vor dreierlei Hintergrund - vor

---

<sup>1</sup> Dipl.-Inform. Thorsten Volz, Dipl.-Ing. Harald Florin und Prof. Dr.-Ing. Peter Eyerer, IKP (Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde), Universität Stuttgart, Böblinger Str. 78, 70199 Stuttgart, email: gabi@ikp2.uni-stuttgart.de, Internet: <http://www.ikp2.uni-stuttgart.de/gabi/>

<sup>2</sup> Dipl.-Ing. Michael Wiedemann, PE Product Engineering GmbH, Kirchheimer Str. 74/76, 73265 Dettingen/Teck, Email: [pe@pe-product.de](mailto:pe@pe-product.de), Internet: <http://www.pe-product.de>

technischem, vor wirtschaftlichem und vor umweltlichem. Dazu wird der Lebenszyklus eines Produkts, Verfahrens oder Systems mit Prozeßnetzen modelliert und in Stoffflußdiagrammen dargestellt, um dessen Auswirkungen auf die Umwelt, in technischem, wirtschaftlichem und umweltlichem Sinne, zu errechnen. Die Ergebnisse werden - nomen est omen - in Bilanzform aufbereitet.

Zwar ist der Aufwand für eine Studie, wie bei der verwandten LCA (Life Cycle Assessment, DIN ISO 1996/97), relativ groß, doch durch die Strukturierung eines Lebenszyklus mittels eigenständigen Modulen wird dem ein vergrößerter Nutzen gegenübergestellt, denn einmal erhobene Grundlagedaten können mehrfache Verwendung finden. Modellierter Lebenszyklen sind in der Regel komplex, ohne Computerunterstützung ist die Analyse der Modelle deshalb kaum vorstellbar. Wo zuerst allgemeine Applikationen, wie zum Beispiel Tabellenkalkulationen, angewendet wurden, kommen heute spezielle Systeme zum Einsatz, die detaillierte Funktionen für die Ganzheitliche Bilanzierung besitzen.

GaBi, das Software-Werkzeug zur Ganzheitlichen Bilanzierung, wurde am IKP entwickelt und ist in der dritten Version seit April 98 erhältlich. Motivation für die komplette Neuentwicklung GaBi 3 war, generell gesprochen, die Verbesserung des Nutzen-Aufwands-Verhältnisses bei der Durchführung von LCA-Studien. Neben allgemeinen Anforderungen, wie z.B. Performancesteigerung, wurde deshalb die Erweiterung der Funktionalität um Möglichkeiten von Szenariotechnik und Parametervariation angestrebt. Dieser Beitrag behandelt sowohl konzeptionelle Grundlagen zur Integration von Szenariomanagement und Parametermodellen in die Stoffflußanalyse, wie auch einige Aspekte der Implementierung und der Anwendung.

### **GaBi 3 gründet auf objektorientierter Basis**

Software-Systeme, deren Konzeption, Entwicklung und Implementierung, besitzen viele interessante Aspekte. Wesentlich für die Qualität eines Software-Systems ist zum Beispiel die Benutzerführung. Dieser Beitrag hat jedoch zum Ziel, aufzuzeigen, wie die Mächtigkeit der Ganzheitlichen Bilanzierung computerunterstützt erweitert und so das Nutzen-Aufwand-Verhältnis von LCA-Studien (i.A.) verbessert werden kann.

Wie schon die zweite Version des Software-Systems GaBi (IKP/PE 1996), basiert auch GaBi 3 auf einem objektorientierten Ansatz. Wichtige Objektklassen (im Text kursiv) von GaBi 3 sind *Einheiten*, *Größen* (stoffbezogene), *Flüsse* (Stoffe), *Prozesse*, *Prozeßpläne* und *Bilanzen*. Darüber hinaus gibt es Objektklassen für *Benutzer*, *Gewichtungsschlüssel*, *Datenqualitätsindizes* und *Projekte*. Die benutzerfreundliche Datenverwaltung ermöglicht der GaBi 3 - Datenbank-Manager (siehe Abb. 1), der analog zum MS-Explorer aufgebaut ist und entsprechend bedient wird.

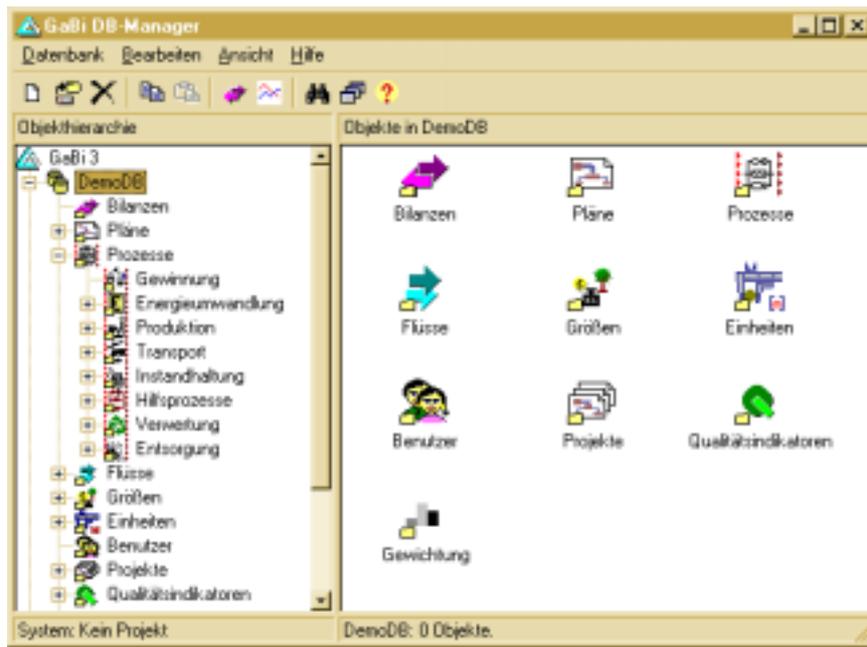


Abbildung 1: Der Datenbank-Manager des Systems GaBi 3

Jede Objektklasse des GaBi-Systems kann baumartig weiter strukturiert werden, so daß große Datenmengen übersichtlich verwaltet werden können. Jedes Objekt einer beliebigen Klasse wird durch einen Datensatz charakterisiert, auf den andere Objekte verweisen können. Als Beispiel soll hier der *GaBi-Fluß* 'Erdöl' dienen. Dieses Objekt gehört zur Klasse 'Fluß' und wird unter der Flußgruppe 'Ressourcen' bei den 'nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen' gefunden. Die Eigenschaften des Objekts 'Erdöl' können in einem speziellen GaBi-Fenster (siehe Abb. 2) bearbeitet werden.

Hier finden sich Felder für den Flußnamen, eine chemische Formel, Zusatzinformationen und eine Referenzgröße. Dabei besagt die Referenzgröße 'Masse' des *Flusses* 'Erdöl', daß die Menge des 'Erdöl's gewöhnlich durch die Masse angegeben wird. Zusätzlich können jedoch Umrechnungsfaktoren für beliebige, auch vom Benutzer neu angelegte *Größen* angegeben werden. Im Beispiel sind das 'Primärenergie nicht regenerativ', 'Energie' und 'Ressourcenverbrauchsindex (RI)'. Weitere Beispiele für *GaBi-Größen*, die ebenfalls als Objekt betrachtet werden, sind: 'Volumen', 'Preis', 'Treibhauspotential', u.a.. Der Zweck der Umrechnungsfaktoren liegt in der komfortableren Datenein- und -ausgabe. Eine 'Erdöl'-Menge kann also auch über die 'Energie' angegeben werden.

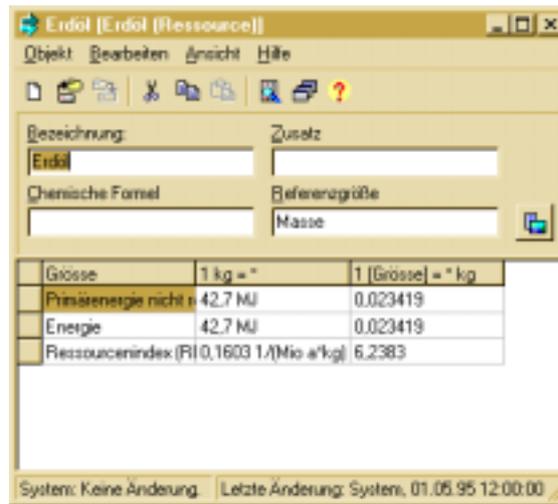


Abbildung 2: GaBi-Objektfenster *Fluß* am Beispiel 'Erdöl'

Automatisch werden bei jeder Änderung eines Objekts Datum und Uhrzeit des Änderungszeitpunkts sowie der entsprechende Benutzername gespeichert. Diese Angaben finden sich in der in der Statuszeile, unten in den Objektfenstern wieder. Zur Dokumentation können jedem GaBi-*Objekt* zusätzlich Verweise auf beliebige Text- und andere Dateien hinterlegt werden, so daß Transparenz auch hinsichtlich des Zustandekommens von Daten gewährleistet werden kann (De Haes 1997).

Durch die konsequente Implementierung und Ausschöpfung der verschiedenen Objektbeziehungen eröffnet GaBi 3 viele Auswerte- und Darstellungsmöglichkeiten. So kann beispielsweise in Bilanzen auf die Einheiten- und Größenumrechnung zurückgegriffen werden, um unterschiedliche *Bilanzen* (z.B. Masse, Energie, Marktwert, GWP, etc.) zu untersuchen. Auch für die Erfassung von Daten ist die Verbindung zu unterschiedlichen *Einheiten* und *Größen* wertvoll. Wie am Beispiel 'Erdöl' gezeigt, ist die Eingabe unterschiedlicher *Größen* möglich, die zusätzlich noch in beliebigen Einheiten angegeben werden können. Eine nicht-metrische Gewichtsangabe wird also automatisch in 'Kilogramm' umgerechnet.

Besonders anschaulich wird der Nutzen dieser Objektbeziehungen in Stoffflußdiagrammen. In der GaBi-Nomenklatur werden die in der Art von Sankey-Diagrammen dargestellten Graphen *Prozeßpläne* genannt. Die Vorteile der vernetzten Wissensrepräsentation auf objektorientierter Basis werden hier in Abb. 3 verdeutlicht. Nachdem ein Prozeßplan aufgebaut wurde, kann die visualisierte Flußgröße vom Anwender ausgewählt werden. Die Strichdicken, die im GaBi-*Prozeßplan* fließende Mengen repräsentieren, werden daraufhin vom System berechnet.

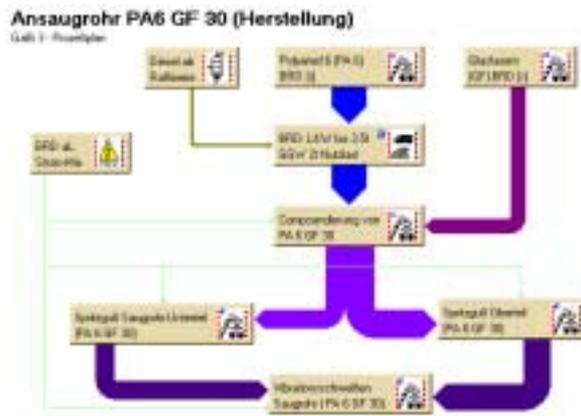


Abbildung 3: Sankey-Diagramm für den Massenfluß

Die in den Abbildungen 3 und 4 gezeigten *Prozeßpläne* demonstrieren den Unterschied von Massen- und Energiedarstellung eines Plans. Die Darstellung oben zeigt den Massenfluß im beispielhaft modellierten Produktionsweg eines Ansaugrohrs. Unten wird der unterschiedliche Bedarf einzelner Prozesse an elektrischer Energie veranschaulicht. Ebenso ist die Darstellung des Wertflusses möglich, vorausgesetzt den fließenden Stoffen (z.B. el. Strom) sind marktwirtschaftliche Preise zugeordnet. Das Instrument kann durch die Eingabe von weiteren Grundlagedaten (z.B. Bleigehalt, Schwefelgehalt etc.) auf einfache Art und Weise erweitert werden, und wird so zur flexibel einsetzbaren Analysegrundlage.

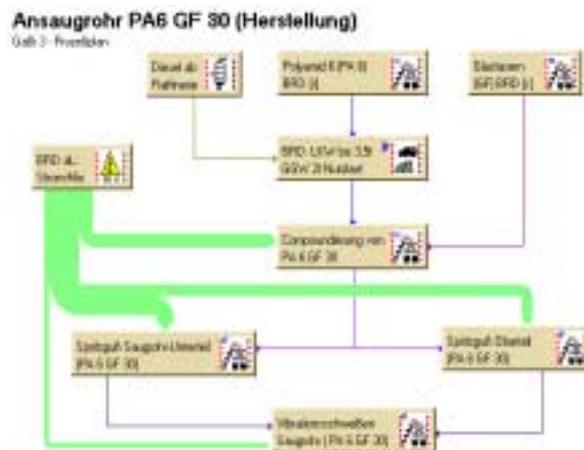


Abbildung 4: Sankey-Diagramm für den Energiefluß

## Neue Flexibilität

Lebenszyklen von Produkten, Verfahren und Systemen können mit dem Software-System GaBi 3, wie oben dargestellt, nach dem Baukastenprinzip modelliert werden. Die einzelnen Prozessschritte innerhalb eines Lebenszyklus werden durch Module (GaBi-Objektklasse *Prozeß*) charakterisiert, die im wesentlichen aus einer Input- und einer Outputliste bestehen. Diese Listen, deren Einträge *Flüsse* und zugehörige Mengen angeben, können im GaBi-System durch die Angabe einer mathematischen Berechnungsvorschrift (optional) definiert werden. Dadurch wird die Flexibilität von GaBi-Modellen weiter erhöht.

Ein gutes Beispiel für parametrische *Prozesse* sind die Transporte (siehe Abb. 5); hier wird der Treibstoffverbrauch ebenso wie die zugehörigen Emissionen errechnet (Baitz 1995). Dabei müssen sogenannte freie Parameter - *hier*: 'Distanz' und 'Auslastung' - spezifiziert werden. Aus den freien werden die fixen Parameter (*hier*: 'Tonnage', 'Verbrauch' und 'Spez\_Verbr'), die über mathematische Vorschriften definiert sind, errechnet. Alle Parameter können zur Spezifikation von Flußmengen verwendet werden (Spalte 'Alias' in den Tabellen Input und Output), sie ändern sich auf diese Weise als Konsequenz einer Parameteränderung. Im Beispiel hat also die Variation der Distanz eine Änderung des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen zur Folge.

Im *Prozeßplan* Ansaugrohr aus den Abbildungen 3 und 4 wird sich also der Fluß Diesel (Verbindung von Diesel ab Raff. nach BRD LKW...) verbreitern, wenn die Distanz des LKW-Transports beispielsweise von '100 km' nach '500 km' geändert wird. Andere Beispiele für Prozeßparameter sind Wirkungsgrade, Ausschußraten, Auslastungsgrade, Mischungsverhältnisse und vieles mehr.

Die mathematische Repräsentation von Input- und Outputlisten eines GaBi-*Prozesses* erfolgt durch einen Vektor. Wenn zwei *Prozesse* (Produzent und Konsument) auf einem *Prozeßplan* miteinander verbunden werden, dann werden die *Prozesse* aneinander so angepaßt, daß der Produzent genau die Menge eines Stoffes liefert, die der Konsument des Stoffes benötigt. Der Anpassung zweier *Prozesse* entspricht die Skalarmultiplikation eines Vektors. Beim Aufbau eines Lebenszyklusmodells im *Prozeßplan*, durch Plazieren neuer *Prozesse* und anschließendes Verbinden, wird also für jeden *Prozeß* ein Skalar festgelegt.

Die Anpassung von *Prozessen* in Prozeßnetzen ist dann komplexer, wenn Verzweigungen im *Prozeßplan* existieren. Deshalb wird aus einem GaBi-*Prozeßplan* zunächst ein Gleichungssystem erzeugt, das mit dem Gauss'schen Algorithmus gelöst wird und so zu den Prozeßskalaren führt. Die Fähigkeit des GaBi-Systems, *Prozeßpläne* so automatisch zu berechnen (nicht approximativ über Propagation), ermöglicht die Variation von Prozeßparametern in kompletten *Prozeßplänen*. *Bilanzen* können also abhängig von den Vorgaben (Wertzuweisung freier *Prozeß*-Parameter) effizient erstellt werden, ohne Modelle in Form von *Prozeßplänen* kopieren oder neu aufbauen zu müssen.

**Parameter**

Parameter	Formel	Wert	Kommentar
Distance		100	[kg] Entfernung Start - Ziel
Fuel		11.05	[l] Durchschnittliche Auslastung
Consumption	$0.002921 \cdot \text{Distance} + 0.32952$	32.952	[kg] Diesel absolute Verbrauch
Spez_Verbr	$\text{Verbrauch} / \text{Distance}$	0.002921	[kg] Diesel pro kg Transportgut

**Input**

Alias	Fluss	Einheit	Menge	Einheit	W	Standardwert	Herkunft
Spez_Verbr	Diesel [Benzinöl]	Masse	0.002921 kg	1 kg	N	100%	beschwert
	Transportgut [Sonstiges]	Masse	1 kg	1 kg	N	0%	keine Angabe

**Output**

Alias	Fluss	Einheit	Menge	Einheit	W	Standardwert	Herkunft
	Transportgut [Sonstiges]	Masse	1 kg	1 kg	N	0%	keine Angabe
Spez_Verbr	Stickoxide [Anorganische Emissionen in Luft]	Masse	0.0001549 kg	0.038728 kg	100%		beschwert
Spez_Verbr	Staub [anorganisch] [Partikel in Luft]	Masse	5.3125E-4 kg	0.001583 kg	100%		beschwert
Spez_Verbr	Schwefeldioxid [Anorganische Emissionen]	Masse	8.5463E-6 kg	0.001 kg	100%		Umgebung
Spez_Verbr	MMVOC [organisch] [Gruppe NMVOC]	Masse	1.5678E-5 kg	0.00243 kg	100%		beschwert
Spez_Verbr	Methan [Organische Emissionen in Luft]	Masse	5.253E-7 kg	0.0017615 kg	100%		beschwert
Spez_Verbr	Kohlendioxid [Anorganische Emissionen]	Masse	2.11E-5 kg	0.018429 kg	100%		beschwert
Spez_Verbr	Kohlendioxid [Anorganische Emissionen]	Masse	0.0050689 kg	1.1417 kg	100%		beschwert

System keine Änderung. Letzte Änderung: Unbekannt, 07.02.98 17:00:44

Abbildung 5: Parametrisch modellierter GaBi-Prozess: Durchschnitts LKW

Eine GaBi-Bilanz eines *Prozesses* oder eines *Prozessplans* basiert auf einer bestimmten *Größe*. Es werden Massen-, Energie-, verschiedene Wirkbilanzen und viele mehr unterschieden. Prinzipiell kann jede GaBi-*Größe* zur Errechnung von *Bilanzen* herangezogen werden, z.B. auch der 'Preis' oder beliebige vom Anwender definierte *Größen*. GaBi-Bilanzen stellen keine gemischten (Massen-, Energie-, etc.) *Bilanzen* dar, die Ansicht einer *Bilanz* kann aber mit einem einfachen Mausklick auf eine andere *Größe* umgeschaltet werden. In Abbildung 6 ist beispielhaft die *Bilanz* des oben beschriebenen *Prozessplans* zur Herstellung eines Ansaugrohrs dargestellt. Hier werden die *Größe* 'Masse' und die Einheit 'kg' angezeigt.

Zusätzlich wurde in Abb. 6 die Einstellung 'relative Flüsse' gewählt, die bewirkt, daß die von einzelnen *Prozessen* konsumierten und freigesetzten *Flüsse* auf die jeweilige gesamte im *Prozessplan* konsumierte und freigesetzte Menge bezogen wird. Andere Einstellungen sind 'Absolutwerte', 'relative Beiträge' (auf Gesamtinputs und -outputs bezogen) und 'relative Prozesse'.

Eine weitere Funktionalität des GaBi-Systems hilft bei der Schwachstellenanalyse. So kann die in der ersten Tabellenspalte erkennbare Flußgruppenstruktur (siehe GaBi-Datenbank-Manager) durch Doppelklick auf- und zugefaltet werden. Auf diese Art kann also zuerst in einer generellen Sicht, bestehend aus den Werten der oberen

Flußgruppenhierarchien, eine Übersicht gewonnen werden, und anschließend schrittweise spezielle Details bis zu den Werten der einzelnen Flüsse hinzugenommen werden. Diese Vorgehensweise kann gleichermaßen auch für *Prozeßpläne* und *Prozesse* angewendet werden. Ein Doppelklick auf eine aggregierte Planspalte liefert also Spalten mit den Beiträgen einzelner *Prozesse*, die sich auf dem entsprechenden *Prozeßplan* befinden. Prinzipiell kann hier wie bei den *Flüssen* beliebig tief verschachtelt werden, denn *Prozeßpläne* können auf anderen *Prozeßplänen* wie *Prozesse* eingesetzt und mit anderen *Prozessen* verbunden werden.

The screenshot displays the GaBi software interface for a GaBi-Bilanz. The main window shows the following data:

**Parameter Table:**

Parameter	Formel	Wert	Kategorie
Düchschritts-LKW / 13. NL / Nah Speed		180	[x] Entfernung Start - Ziel
Auslast		0,05	[ ] durchschnittliche Auslastung
Tonnage	Auslast*13	11,70	[ ] gen. Leistung für
Verbrauch	0,0264*Auslast*18,7489*Centara*1,3/Auslast	32,952	[g] Diesel absoluter Verbrauch
Spec_Vebr	Verbrauch*(Tonnage/1000)	0,0379921	[g] Diesel pro kg Tonnage pro

**Inputs Table:**

Alias	Fluss	Einheit	Menge	Faktor	%	Spezifität	Herkunft
Spec_Vebr	Diesel (Energiequelle)	Masse	0,0379921 kg	1 kg	x	10%	berechnet
	Transportgut (Sonstiges)	Masse	1 kg	1 kg	x	9%	keine Angabe

**Outputs Table:**

Alias	Fluss	Einheit	Menge	Faktor	%	Spezifität	Herkunft
Spec_Vebr	Stickoxide (Anorganische Emissionen in L)	Masse	0,08011549 kg	0,036728 kg		10%	berechnet
Spec_Vebr	Staub (anorganisch) (Partikel in Luft)	Masse	5,9725E-4 kg	0,001860 kg		10%	berechnet
Spec_Vebr	Schwefeldioxid (Anorganische Emissionen Masse)	Masse	8,9463E-6 kg	0,003 kg		10%	keine Angabe
Spec_Vebr	NH4VOC (anorganisch) (Gruppe NH4VOC in Masse)	Masse	1,5635E-5 kg	0,005243 kg		10%	berechnet
Spec_Vebr	Methan (Organische Emissionen in Luft (G))	Masse	5,253E-7 kg	0,0047615 kg		10%	berechnet
Spec_Vebr	Fahrsensoroxid (Anorganische Emissionen Masse)	Masse	3,11E-5 kg	0,010429 kg		10%	berechnet
Spec_Vebr	Fahrendioxid (Anorganische Emissionen in Masse)	Masse	0,0893688 kg	3,1417 kg		10%	berechnet

Abbildung 6  
GaBi-Bilanz eines Prozeßplans für die Herstellung eines Ansaugrohrs

GaBi-Bilanzen können durch die Angabe von entsprechenden Schlüsseln auch normalisiert und bewertet werden. Es existieren zusätzlich noch viele Funktionen, die die Analyse großer *Bilanzen* unterstützen und vereinfachen. Auch die Auswertung der Datenqualität kann auf Bilanzenebene durchgeführt werden. Zusätzlich lassen sich GaBi-Bilanzen, wie jedes andere GaBi-Objekt über die Windows-Zwischenablage problemlos in jede Windows-Anwendung einfügen.

Das GaBi-System wird durch ein weiteres Instrument abgerundet, den GaBi-Analysten (siehe Abb. 7). Hier wird die durch parametrische Prozeßdefinition und automatische Prozeßnetz-kalkulation gewonnene Flexibilität eines GaBi-Modells voll ausgenutzt. Unterstützt durch spezielle Eingabefenster können hier Parameter variiert und beliebige Bilanzwerte in Abhängigkeit dieser Variation untersucht werden.

Die Definition eines Szenarios kann im GaBi-Analyst über die Zuweisung entsprechender Werte zu freien Prozeßparametern erfolgen. So können *Bilanzen* (Massen-, Energie-, Wirkbilanzen etc.) mit wenig Aufwand, abhängig von unterschiedlichen Szenarien errechnet werden. Im Beispiel wurde die Distanz eines LKW-Transports von '200 km' auf '1000 km' variiert, die Auslastung der Rückfahrt wurde über die dabei beförderte Tonnage mit '1000 kg' und '50 kg' angegeben. Betrachtet wurden für beide Szenarien die Gesamtenergie -1- und das Treibhauspotential -2- aller freigesetzter Emissionen.

Nach Möglichkeit wird der Vortrag zu diesem Beitrag von einer Präsentation des Systems GaBi 3 in der im Rahmen der UT'98 stattfindenden Ausstellung flankiert.

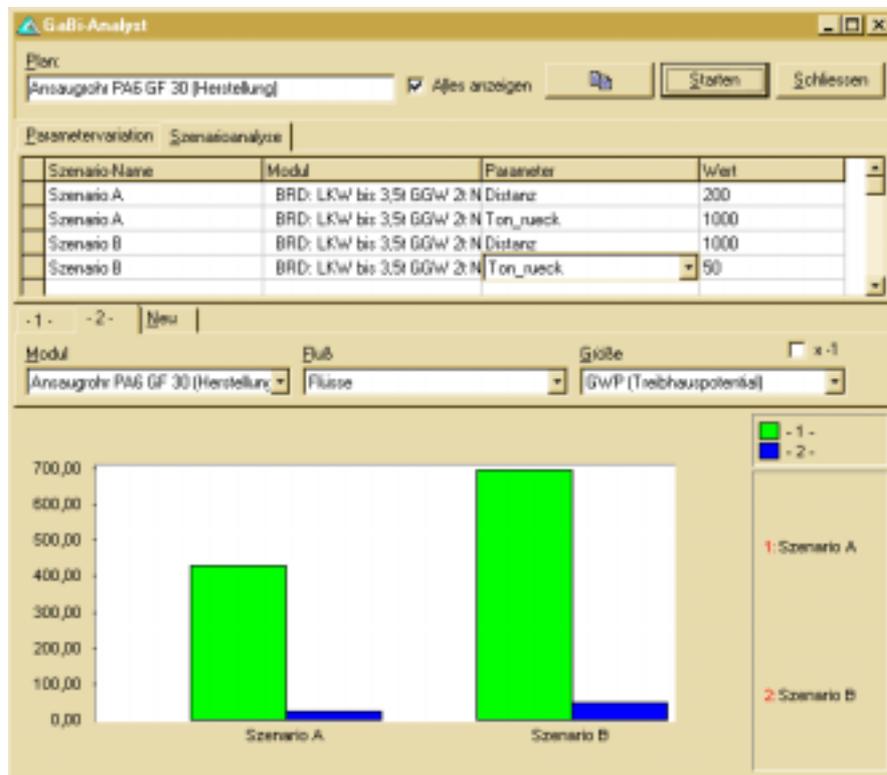


Abbildung 7  
GaBi-Analyst: Transport-Szenarien bei der Ansaugrohr-Herstellung

**Literaturverzeichnis**

- Baitz; M. (1995): Erstellung eines Modells zur Simulierung umweltrelevanter Auswirkungen von Transportprozessen. Studienarbeit, IKP, Universität Stuttgart.
- De Haes, H.A.U.; Nicoline Wrisberg (Hrsg.) (1997): Life Cycle Assessment: State-of-the-Art and Research Priorities - Results of LCANET. LCA Documents Volume 1, Eco-Infoma Press.
- DIN EN ISO 14040ff, Normen, Entwurf, Drafts (1996/97): Umweltmanagement - Produkt-Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle inventory. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation.
- Eyerer, P. (Hrsg.) (1996): Ganzheitliche Bilanzierung. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin: Springer-Verlag.
- Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP); PE Product Engineering GmbH (1996): GaBi Progress 2.0, Das Software-Werkzeug zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Dettingen.