

# SIMBOX-FUZZY: ein Tool zur Bewertung von Stoffflüssen basierend auf unscharfem Wissen

Xenia Holtmann<sup>1</sup>, Hans-Peter Bader<sup>2</sup>, Ruth Scheidegger<sup>2</sup>, Ralf Wieland<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TU Ilmenau,

<sup>2</sup> EAWAG, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf

<sup>3</sup> ZALF, Müncheberg

<sup>1</sup> [xenia\\_holtmann@gmx.net](mailto:xenia_holtmann@gmx.net)

<sup>2</sup> [bader@eawag.ch](mailto:bader@eawag.ch)

<sup>2</sup> [ruth.scheidegger@eawag.ch](mailto:ruth.scheidegger@eawag.ch)

<sup>3</sup> [rwieland@zalf.de](mailto:rwieland@zalf.de)

## Zusammenfassung:

Die Erfassung, Modellierung und Beurteilung von Stoff- und Energieflüssen ist ein zentraler Aspekt bei der Untersuchung von natürlichen und anthropogenen Systemen. Das Spektrum der Beurteilung reicht dabei von der Ökologie über die Ökonomie bis hin zur Nachhaltigkeit.

Das Computerprogramm SIMBOX erlaubt die Modellierung von stationären und dynamischen Stoffflüssen. Mit dem entwickelten Modul SIMBOX-FUZZY können die Stoffflüsse nun zusätzlich bewertet werden und zwar auf der Basis von unscharfem Wissen.

Als Vorlage für die Entwicklung diente SAMT-FUZZY. Der Berechnungsalgorithmus wurde dabei übernommen und mit zusätzlichen Funktionalitäten erweitert. Die graphische Oberfläche wurde neu entwickelt. Sie erlaubt die Generierung von neuen Fuzzy-Modellen, die Anpassung bereits bestehender Fuzzy-Modelle sowie die Berechnung und graphische Darstellung der Bewertung. Es können einerseits stationäre, rein mittelwertbasierte sowie wahrscheinlichkeitsverteilte Stoffflüsse, andererseits dynamische Stoffflüsse (Zeitreihen) bewertet werden.

Illustriert wird das Modul an einem sehr vereinfachten Beispiel.

Die Bewertungsmöglichkeit aufgrund von Expertenwissen ist wichtig für die Entscheidungsunterstützung bei der Evaluation von Verbesserungsmassnahmen.

## 1 Einleitung

Die Aktivitäten des täglichen Lebens verursachen grosse Massen- Stoff- und Energieströme. Diese Ströme haben in den letzten Jahrzehnten massiv zugenommen und ein Ende der Entwicklung ist nicht absehbar. Zwei Gründe sind verantwortlich für diese Zunahme: 1. Der Anstieg des pro Kopf-Verbrauchs ( ca. Faktor 100 in den letzten 100 Jahren) und 2. das Wachstum der Weltbevölkerung. Abbildung 1 zeigt für einige Stoffe den „Lebensverbrauch“ pro Person für Deutschland.

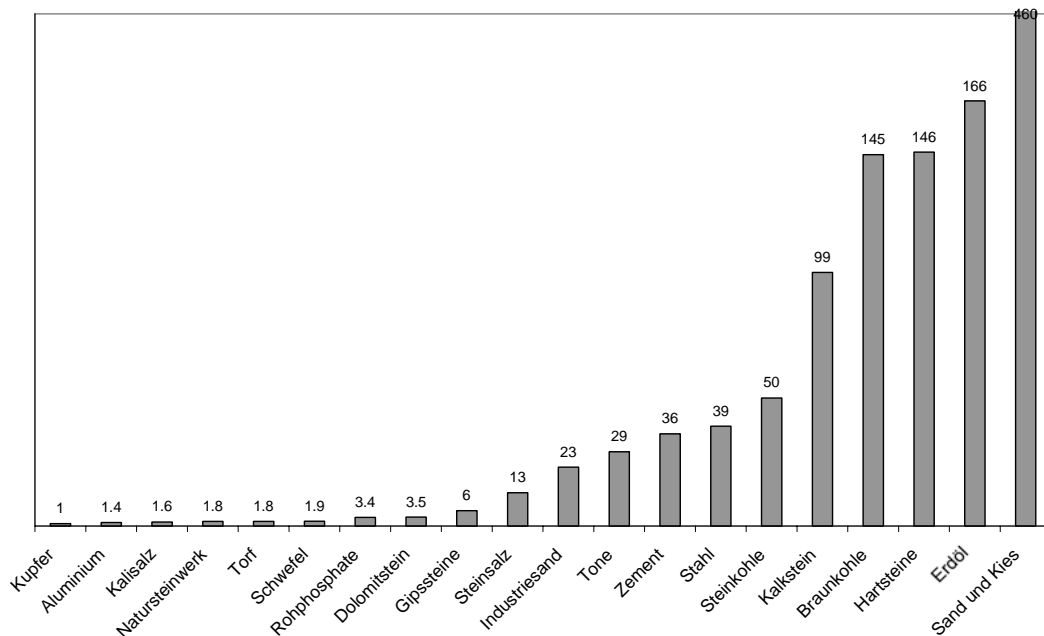


Abbildung 1. Abgeschätzter Rohstoffverbrauch für Deutschland pro Person in Tonnen während 70 Lebensjahren. Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2004.

Dass dieser enorme Stoffumsatz zu Problemen führen muss ist offensichtlich. Man kann grob 3 Problembereiche unterscheiden: 1) Ressourcenproblematik: Der Verbrauch von nichterneuerbaren Ressourcen führt früher oder später zur Verknappung. 2) Umweltproblematik: Der Stoffumsatz induziert eine Belastung der Umweltkompartimente. 3) Gesundheitsproblematik: Die vielen Stoffe in Nahrung, Wasser und Luft in teilweise hohen, unnatürlichen Konzentrationen führen zu gesundheitlichen Störungen oder Schäden.

In den letzten Jahrzehnten gab es eine riesige Anzahl von Arbeiten zu Fragestellungen aus diesen Problemkreisen. Das Spektrum reicht dabei von mikroskopischen Wirkungsuntersuchungen auf Mikroorganismen bis hin zu regionalen, respektive globalen Ressourcenhaushaltsuntersuchungen. Ein wichtiger Aspekt bei solchen Studien ist immer die Erfassung, Modellierung und Beurteilung der für die Problemstellung relevanten Stoffflüsse.

Die Erfassung der Stoffflüsse in ihrer Gesamtheit, d.h. die Verfolgung der **stofflichen Lebenspfade**, vom Ressourcenabbau über die Produktion, den Gebrauch im täglichen Leben bis hin zur Entsorgung ist das Ziel der Stoffflussanalyse (Stoffstrommanagement). Das Hauptanliegen ist dabei die **Früherkennung**, d.h. das Aufzeigen von möglichen Problemen bevor die Stoffe eigentliche Problemstoffe werden. Das ist deshalb wichtig, weil sich die stofflichen Lebenspfade durch lange Aufenthaltszeiten in der Anthroposphäre (dem Bereich des menschlichen Lebens) auszeichnen. Das bedeutet, dass Stoffverbote erst Jahrzehnte nach Inkraftsetzung voll wirken.

Eine beachtliche Zahl von Computerprogrammen wurde in den letzten zirka 15 Jahren für das Stoffstrommanagement entwickelt. (Literatur: ISIS, USIS [http://www.isis-specials.de/windows/WindowsPortal/sw\\_suche.htm](http://www.isis-specials.de/windows/WindowsPortal/sw_suche.htm)). Die meisten davon sind massgeschneidert für das betriebliche Stoffstrommanagement. Nur wenige enthalten moderne Modellierungswerkzeuge wie Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen, Parameteranpassung und Parameteridentifikation etc.

Eine wichtige, von der Praxis früh geforderte Anwendung ist eine geeignete Bewertungsmöglichkeit für die Stoffströme. Verschiedene, standardisierte Bewertungsmethoden (Ökopunkte, LCA, .. Baccini, Bader 1996, ) wurden entwickelt. Je nach Verfahren kann z.B. für ein Produkt die Bewertung zwischen schlecht bis gut variieren. Das liegt an der unterschiedlichen Systemgrenze („was wird berücksichtigt“) und an der eigentlichen Bewertungsformel („wie wird ein Effekt bewertet“).

Was bisher fehlte war die Möglichkeit unter Einbezug von Betroffenen respektive Beteiligten („Stakeholders“) eine subjektive, nicht standardisierte Bewertung für ein System aufzustellen. Diese Bewertung basiert dann auf subjektivem Systemwissen (unscharfes Expertenwissen) und auf bewusst subjektiver Auswahl, Gewichtung und Einschätzung von Stoffströmen.

Inspiziert durch die Entwicklung von „SAMT-FUZZY“ (Holtmann et al 2004) ergab sich ein Projekt mit folgenden Zielen:

- Entwicklung eines einfachen, bedienerfreundlichen Fuzzy - Bewertungsmoduls
- Integration ins Programm SIMBOX
- Anwendbarkeit auf stationäre, rein mittelwertbasierte sowie wahrscheinlichkeitsverteilte, aber auch zeitabhängige Stoffströme.

## **2 Methode**

### **2.1 Modellierung Stoffströme: Vorgehen**

Das Computerprogramm SIMBOX ([http://www.eawag.ch/services/software/d\\_simbox.html](http://www.eawag.ch/services/software/d_simbox.html)) basiert auf der Stoffflussanalyse beziehungsweise ihrer mathematischen Formulierung. Diese ist beschrieben in Baccini, Bader (1996) und wurde in vielen Studien in verschiedenen Gebieten angewandt: Zeltner et al (1999), Sörme (2003), Hedbradt (2003), van der Voet et al (2000), Real (1998), Hug et al (2004), Real et al (2003), Bader et al (2005), Müller et al (2004), Johnstone (2001), Kohler et al (1999), Schmid et al (2004a, b), Kwongpongsagoon et al (2005) und weitere.

Wie üblich bei Modellierungsmethoden werden folgende 4 Schritte unterschieden: 1. Systemanalyse, 2. Mathematischer Modellansatz, 3. Kalibrierung und 4. Simulationsrechnungen, d.h. Szenarios, Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen.

In der **Systemanalyse** wird das für die Problemstellung relevante System definiert. Dabei wird festgelegt, welche Prozesse (Bilanzvolumina) und welche Stoffflüsse berücksichtigt werden sollen (Approximationsgrad).

Der **Modellansatz** beinhaltet die mathematische Formulierung der Systemzusammenhänge. Im 3. Schritt **Kalibrierung** werden die Parameter so angepasst, respektive geschätzt, dass das Modell die verfügbaren Daten und das subjektive Systemwissen möglichst gut fittet respektive möglichst gut wiedergibt. Je besser die Datenbasis, umso besser wird die Kenntnis über die Parameter und damit das Modell. Das kalibrierte Modell erlaubt schliesslich, basierend auf Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen, das Verhalten des Modells unter veränderten Bedingungen zu studieren. Solche Analysen bilden die Grundlage für die Diskussion möglicher Massnahmen.

Die Umsetzung von Massnahmen verlangt, dass diese bewertet werden (ökologisch, sozioökonomisch, gesundheitsmässig, ....). Ein Bewertungsmodul auf der Grundlage von unscharfem Expertenwissen kann diesen Prozess unterstützen, wenn die Massnahmen zusammen mit Betroffenen und Beteiligten bewertet werden.

Diese Bewertung erweitert das oben diskutierte Vorgehen um den 5. Schritt.

## 2.2 Entwicklung und Aufbau von SIMBOX-FUZZY

Als Vorlage für die Entwicklung diente SAMT-FUZZY (Holtmann et al 2004). Als Entwicklungsumgebung diente die Windows Version von *HTBasic* von *Transera Corporation, Utah* ([www.transera.com](http://www.transera.com)), unter der schon SIMBOX entwickelt wurde. *HTBasic* ist eine Implementation von *Rocky Mountain Basic* das Anfangs der 80er Jahre von *Hewlett Packard* entwickelt wurde. *HTBasic* ist eine Programmiersprache, die auf wissenschaftliche und technische Anwendungen zugeschnitten ist. Sie enthält neben vielen mathematischen Routinen umfangreiche graphische Befehle (auch für graphische Benutzeroberflächen) und ist durch die Bereitstellung einer hohen Anzahl von GPIB and GPIO Interfaces gut geeignet um Messgeräte zu steuern.

Der Fuzzy- Berechnungsalgorithmus konnte von SAMT-FUZZY übernommen und erweitert werden. Für Einzelheiten des Berechnungsalgorithmus sei auf Holtmann et al (2004) verwiesen. Programmtechnisch ist er als DLL eingebunden. Die graphische Benutzeroberfläche wurde neu entwickelt und ist wie folgt strukturiert:

- Input – Submodul
- Output - Submodul
- Regeln – Submodul
- Berechnungs – Submodul

### Input – Submodul:

Dieses erlaubt die Definition eines neuen Fuzzy – Modells. Dazu müssen zuerst die zu bewertenden Stoffflüsse (Eingangsvariablen) aus der Variablenliste eines

Stoffstromsystems ausgewählt werden. Zu jeder dieser Variablen wird nun eine Zugehörigkeitsfunktion (Membership-Function) definiert. Zur Auswahl stehen dreieck-, trapezförmige und Gaussverteilte Zugehörigkeitsfunktionen (siehe auch Abb.3).

### **Output – Submodul**

Dieses ist ähnlich aufgebaut wie das Input – Submodul. Für die Ausgangsvariable (Bewertungsgrösse des Modells) stehen als Zugehörigkeitsfunktion Singletons, dreieck- und trapezförmige Verteilungen zur Verfügung (siehe auch Abb. 4).

### **Regeln – Submodul**

Dieses erlaubt die Eingabe der Regeln zur Bewertung der Ausgangsvariablen aufgrund der Werte der Eingangsvariablen und zwar für alle Kombinationen dieser letzteren (siehe auch Abb. 5). In diesen Regeln und den Zugehörigkeitsfunktionen steckt das unscharfe Expertenwissen.

### **Berechnungs – Submodul**

Dieses führt die Berechnung der Fuzzybewertung durch. Es stehen drei Berechnungsmodi zur Verfügung: i) für stationäre, rein mittelwertbasierte Stoffströme ii) für stationäre, wahrscheinlichkeitsverteilte Stoffströme, iii) für zeitabhängige Stoffströme. Die Resultate werden unmittelbar nach der Berechnung graphisch (und zum Teil tabellarisch) dargestellt.

## **3 Illustration an einem Beispiel**

### **3.1 Systemanalyse**

Illustriert wird das Bewertungsmodul am Beispiel des Wasser-, Holz und Kupferkonsums der Schweiz. Bei diesem Beispiel ist nur die Illustration wichtig; die Werte der Variablen und damit auch die ganze Bewertung sind ungenau und nicht repräsentativ. Abb. 2 zeigt die Systemanalyse für den stark vereinfachten Haushalt dieser zwei erneuerbaren (Wasser + Holz) und der nichterneuerbaren Ressource (Kupfer). Der Wasserkonsum wird in der Schweiz vollständig durch „Eigenwasser“ gedeckt. Holz wird sowohl importiert als auch selber produziert und Kupfer stammt aus Importen und aus der eigenen Recyclingindustrie.

Das System in Abb. 2 ist nur eine erste Approximation. Eine vollständige Beschreibung des Ressourcenhaushaltes würde ein viel detaillierteres System erfordern, bei dem alle Prozesse der Aufarbeitung, Bearbeitung und Entsorgung berücksichtigt würden. Für eine erste grobe Bewertung genügt aber das einfache System in Abb.2.

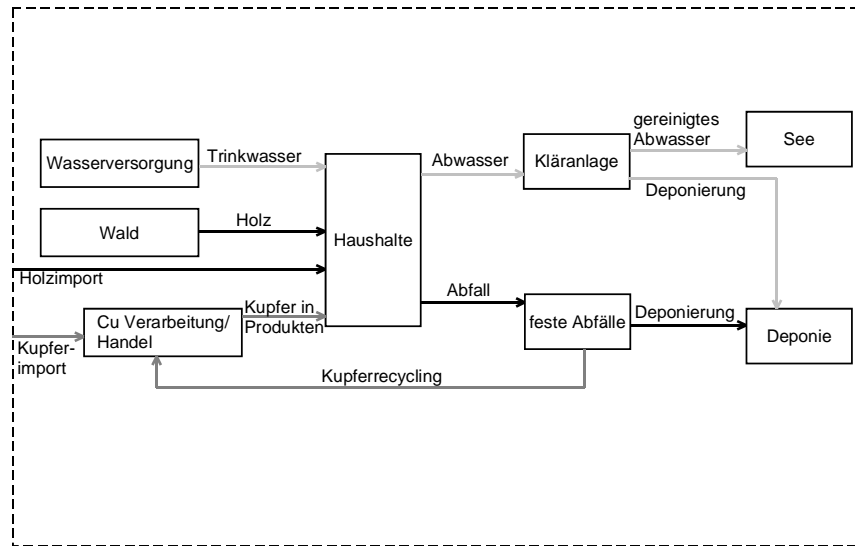


Abbildung 2. Systemanalyse: Einfaches Ressourcenhaushaltssystem.

### 3.2 Eingangsvariablen

Die Wahl der Eingangsvariablen richtet sich nach der Art der angestrebten Bewertung. Hier sollen 3 verschiedene Bewertungen (entsprechend den 3 in der Einleitung diskutierten Problemkreisen) vorgestellt werden, nämlich: Bewertung des Ressourcenaspektes, des Umweltaspektes und des Gesundheitsaspektes.

#### Ressourcenaspekt:

Als Eingangsvariablenvariablen werden die pro Kopf Verbräuche von Wasser und Holz sowie der Recyclingsgrad von Kupfer gewählt. Die Zugehörigkeitsfunktionen werden auf der Basis der jährlichen Erneuerungsraten (Wasser:  $\approx 6000 \text{ m}^3/(\text{E} \cdot \text{a})$ , Holz:  $\approx 530 \text{ kg}/(\text{E} \cdot \text{a})$ ) respektive des Recyclinggrades (Kupfer) gewählt. Abb.3. zeigt die Oberfläche des Inputmoduls mit der Zugehörigkeitsfunktion des Trinkwassers.

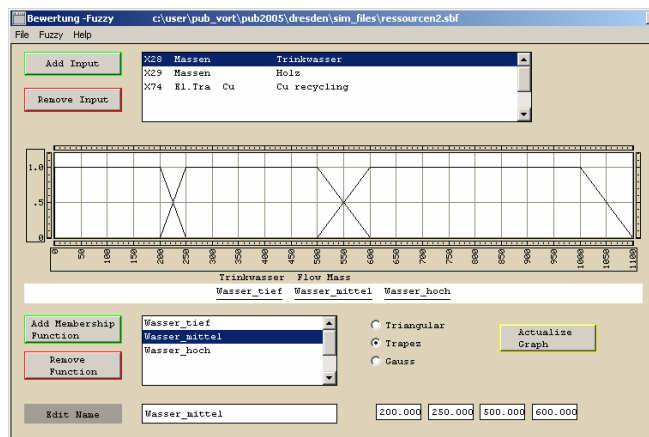


Abbildung 3. Oberfläche Input – Submodul mit Zugehörigkeitsfunktion für das Trinkwasser.

### Umweltaspekt:

Als Eingangsvariablen wurden der Holzverbrauch sowie die Phosphorkonzentration im gereinigten Abwasser gewählt. Ein zu hoher Holzverbrauch ( $> \approx 500 \text{ kg/(E-a)}$ ) verringert die  $\text{CO}_2$  Assimilation und erhöht die Bodenerosion. Zu hohe Phosphorkonzentrationen ( $> \approx 0.8 \text{ mg/l}$ ) sind ein Grund für die Eutrophierung der Seen.

### Gesundheitsaspekt:

Als Eingangsvariablen dienten die Nitratkonzentration im Trinkwasser und der Kupferstrom im gereinigten Abwasser. Beide Stoffe verursachen bei höheren Konzentrationen Gesundheitsprobleme. Als kritische Werte wurden betrachtet: Nitrat:  $25 \text{ mg/l}$  (Grenzwert) und  $40 \text{ mg/l}$  (Risikowert) Kupfer:  $\approx 20 \text{ g}$  Kupfer im gereinigten Abwasser pro Einwohner und Jahr.

### Bemerkung:

Es muss betont werden, dass die gewählten Eingangsvariablen und ihre Zugehörigkeitsfunktionen eine sehr vereinfachte Bewertung darstellen. Viele wichtige Aspekte wurden dabei nicht berücksichtigt. Wie schon in Abschnitt 3.1 erwähnt geht es nicht um ein möglichst umfangreiches Modell, das das gesamte Wissen über die Ressourcen -, Umwelt- und Gesundheitsaspekte berücksichtigt, sondern um die Illustration von SIMBOX-Fuzzy. Dies gilt auch für die Ausgangsvariablen und die Regeln.

## 3.3 Ausgangsvariablen

Die Ausgangsvariablen sind die Beurteilungen für Ressourcen, Umwelt und Gesundheit. Exemplarisch zeigt Abb.4. die Zugehörigkeitsfunktion für die Bewertung des Ressourcenaspekts.

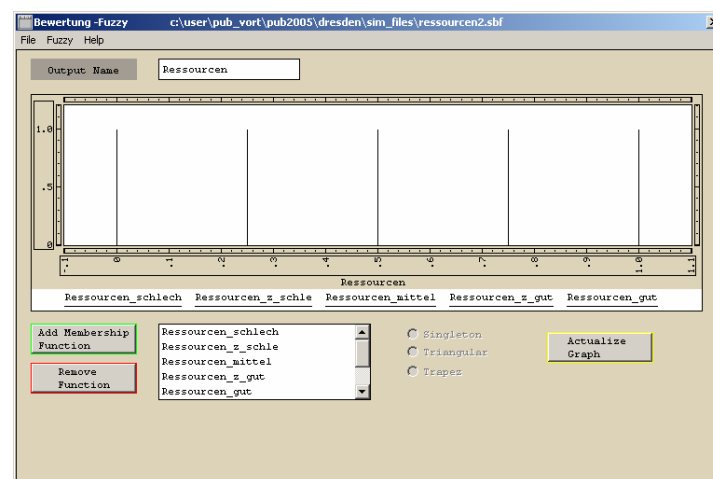


Abbildung 4. Oberfläche Output - Submodul. Zugehörigkeitsfunktion für den Ressourcenaspekt.

### 3.4 Regeln

Das Systemwissen zusammen mit der subjektiven Beurteilung der Eingangsvariablen-Bereiche wird in Regeln formuliert. Beispielsweise wurde ein tiefer Recyclinggrad des Kupfers durch die Experten schlechter bewertet als ein eher hoher Verbrauch von Trinkwasser und Holz. Dies deshalb weil Kupfer eine nichterneuerbare Ressource ist. Abb.5 zeigt einen Ausschnitt der Regeln für den Ressourcenaspekt.

r	Flow Mass	Flow Mass	ng TransFlow	Cu	Ressourcen	CF
1	Wasser tief	Holz tief	Rec wenig		Ressourcen_mittel	1.0
2	Wasser tief	Holz mittel	Rec wenig		Ressourcen_z_sc	1.0
3	Wasser tief	Holz hoch	Rec wenig		Ressourcen_schle	1.0
4	Wasser mittel	Holz tief	Rec wenig		Ressourcen_z_sc	1.0
5	Wasser mittel	Holz mittel	Rec wenig		Ressourcen_schle	1.0
6	Wasser mittel	Holz hoch	Rec wenig		Ressourcen_schle	1.0
7	Wasser hoch	Holz tief	Rec wenig		Ressourcen_schle	1.0
8	Wasser hoch	Holz mittel	Rec wenig		Ressourcen_schle	1.0
9	Wasser hoch	Holz hoch	Rec wenig		Ressourcen_schle	1.0
10	Wasser tief	Holz tief	Rec mittel		Ressourcen_z_gut	1.0
11	Wasser tief	Holz mittel	Rec mittel		Ressourcen_mittel	1.0
12	Wasser tief	Holz hoch	Rec mittel		Ressourcen_z_sc	1.0
13	Wasser mittel	Holz tief	Rec mittel		Ressourcen_mittel	1.0

Abbildung 5. Oberfläche Regeln - Submodul. Regeln für den Ressourcenaspekt.

Mit diesem letzten Schritt ist das Fuzzy Modell definiert. Durch Anwendung auf Datensätze können diese bewertet werden.

### 3.5 Resultate

Abb.6 zeigt die Bewertung des Ressourcenaspekts für einen vorliegenden Datensatz. Im oberen Teil des Fensters sind die Eingangsvariablen inklusive Daten dargestellt. Der berechnete, numerische Wert der Ausgangsvariablen befindet sich in einem Feld unterhalb der grafischen Ausgabe.

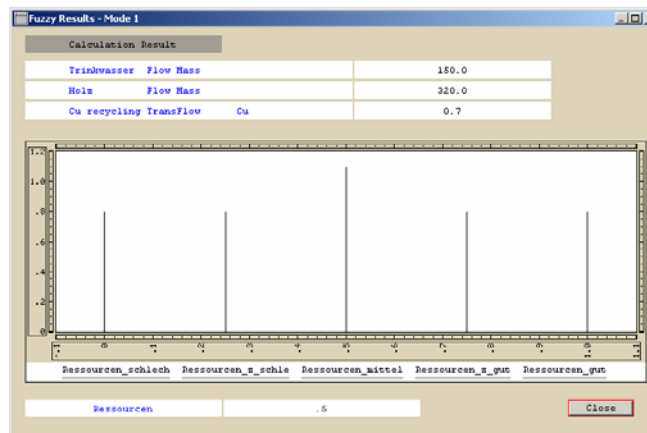


Abbildung 6. Bewertung der Ressourcennutzung für einen Datensatz.



Durch die stärkere Gewichtung des Kupferrecyclingkoeffizienten ergab sich für den Datensatz ein Wert von 0.5, d.h. eine mittlere Ressourcennutzung.

Eine verbesserte Ressourcennutzung könnte vor allem durch Erhöhung des Recyclingkoeffizienten von Kupfer erreicht werden. Eine detaillierte Analyse der Kupferströme zeigt, dass das Recycling der mobilen Güter (elektronische und elektrische Geräte) relativ tief ist (60%) und verbessert werden müsste.

Interessant ist auch der Einfluss von Unsicherheiten in den Eingangsvariablen auf die Bewertung. Dabei werden die probabilistischen Verteilungsfunktionen der Eingangsvariablen mittels Monte Carlo Rechnungen vorgängig bestimmt. Als Verteilungsfunktionen wurden gewählt: Wasser: Normalverteilung (Mittelwert  $150\text{m}^3/(\text{E}\cdot\text{a})$ , Standardabweichung  $5\text{ m}^3/(\text{E}\cdot\text{a})$ ); Holz: Normalverteilung (Mittelwert  $320\text{kg}/(\text{E}\cdot\text{a})$ , Standardabweichung  $10\text{ kg}/(\text{E}\cdot\text{a})$ ); Recyclingkoeffizient von Kupfer: Gleichverteilung (Minimum 0.4, Maximum 0.98). Für diese Samples bestimmt SIMBOX-Fuzzy die Verteilungsfunktion der Ausgangsvariablen. Abb.7. zeigt die Resultate für einen Datensatz der Ressourcennutzung.

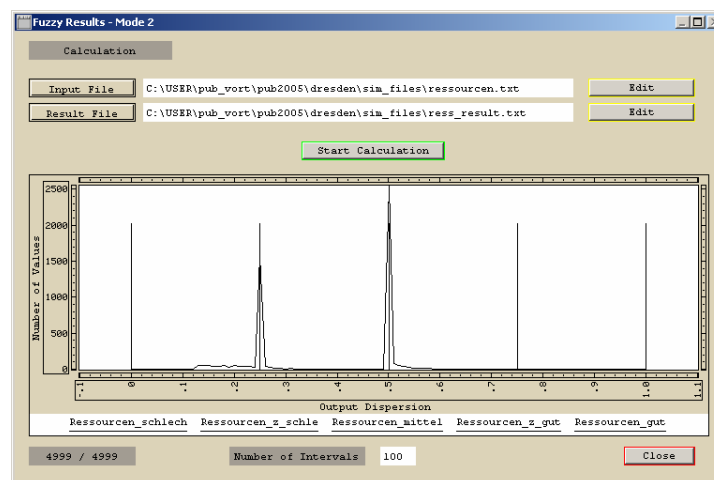


Abbildung 7. Verteilungsfunktion der Bewertung der Ressourcennutzung für einen wahrscheinlichkeitsverteilten Datensatz.

### Gesundheitsaspekt:

Die Bewertung des Gesundheitsaspekts ist in Abb.8 dargestellt. Aufgrund des hohen Nitratgehaltes im Trinkwasser resultiert eine Bewertung „schlecht“. Die Daten, die dieser Bewertung zugrunde liegen, sind nicht gesamtschweizerische Mittelwerte sondern stammen aus einer landwirtschaftlich belasteten Region. Diese Bewertung trifft demnach auch nur für eine Region zu und nicht für die ganze Schweiz. Dieses Beispiel zeigt dass je nach Aspekt unterschiedliche „Bemessungsräume“ (Systemgrößen : lokal bis global) für die Bewertung nötig sind. In unserem Beispiel kann die Ressourcennutzung auf nationalem Niveau bewertet werden, währenddem für die Umwelt- und die Gesundheitsaspekte lokale Bewertungen sinnvoller sind.

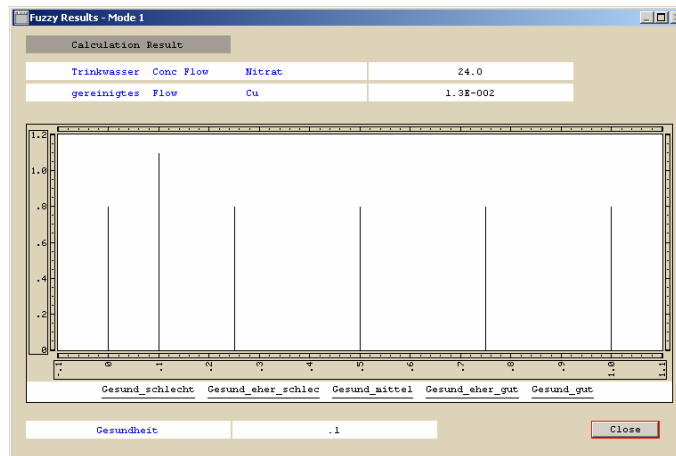


Abbildung 8. Bewertung des Gesundheitsaspektes für einen Datensatz.

## 4 Diskussion

Das entwickelte Modul SIMBOX – FUZZY ermöglicht die Bewertung von Stoffströmen auf verschiedener Betrachtungsskala. Die Auswahl der Stoffströme sowie die ganze Bewertung (Zugehörigkeitsfunktionen, Regeln) widerspiegeln dabei subjektives, unscharfes Expertenwissen.

SIMBOX – FUZZY erlaubt somit geplante Massnahmen zur „Verbesserung“ von anthropogen verursachten Stoffströmen unter Betroffenen und Beteiligten zu diskutieren und zu bewerten. In diesem Sinne ist das Modul eine Unterstützung des Stoffstrommanagements (Entscheidungsunterstützung) und ergänzt die reine Stoffstrommodellierung. Die Unsicherheit der Inputvariablen kann berücksichtigt werden durch Bewertung von wahrscheinlichkeitsverteilten Inputvariablen. Diese Verteilungen resultieren entweder aus Messkampagnen, oder aus Monte Carlo Simulationen oder aber sind abgestützt auf subjektivem Systemwissen. Da SIMBOX – FUZZY nur Eingangsvariablen und entsprechende Datensätze benötigt, können neben Stoffströmen auch andere Grössen wie Kosten bewertet werden. Die Kosten erscheinen in solchen Modellen einfach als weitere Inputvariablen mit entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen.

## 5 Danksagung

Wir möchten uns ganz herzlich bei M. Bader für hilfreiche Anregungen und Diskussionen bedanken.

## Literatur

- Baccini, P. and Bader, H.-P., Regionaler Stoffhaushalt. Spektrum Akademischer Verlag 1996.
- Bader, H.-P., Real, M. and Scheidegger, R., Large scale implementation of Solar Home Systems in remote, rural areas. *Clean Technologies and Environmental Policy* 6, (2003) 18-25.
- Bader, H.-P., Real, M. and Scheidegger, R., Dynamic simulation on large-scale implementation of renewable energies: impact on greenhouse gas emissions, financial needs and sustainability. submitted to *Clean Technology and Environmental Policy* (2005).
- Hedbrant, J. 2003. Structuring Emirical Knowledge on Environmental Issues. Linköping Studies in Arts and Science No 283, Linköping, Schweden
- Holtmann, X., Wieland, R. and Schultz, A., Vorstellung und Anwendung des Fuzzyentwicklungstools SAMT – Fuzzy. In *Proceedings of Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Müncheberg 2004*, Shaker Verlag
- Hug, F., Bader, H.-P., Scheidegger, R. and Baccini, P., A dynamic model to illustrate the development of an interregional energy household to a sustainable status. *Clean Technologies and Environmental Policy* 6, (2004) 138-148.
- Johnstone, F.M., 2001. Energy and mass flow of housing: a model and example. *Building and environment* 36, 27-41.
- Kwongpongsagoon, S., Bader, H.-P., Scheidegger R. and Moore, S.J., Modeling the Cadmium Flow in Australia, based on a Substance Flow Analysis, submitted to *Environment, Development and Sustainability*, Kluwer Academic Publishers
- Kohler, N., U. Hassler and H. Paschen, eds. 1999. *Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Konzept Nachhaltigkeit*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Müller, D., Bader, H.-P. and Baccini, P., Physical characterization of regional timber management for a long-term scale. *Journal of Industrial Ecology* 8,3 (2004) 65-88.
- Real, M., Bader, H.-P., und Scheidegger, R., Erneuerbare Energien: Dynamische Modellierung der Aufbauzeit, eingesparter Treibhausgas Emissionene und finanzellen Aspekte. In *Proceedings of Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Osnabrück 2003*, Shaker Verlag
- Real, M. A methodology for evaluating the metabolism in the large scale introduction of renewable energy systems. (1998) (<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=diss&nr=12937>)
- Schmid, T., Bader, H.-P. and Scheidegger, R., Food consumption and nutrient flows - the urban flow of nitrogen for the activity to nourish since 1870s. submitted to *Journal of Industrial Ecology* (2004).
- Schmid, T., Bader, H.-P., Scheidegger, R. and Lohm, U., submitted to *Ressources, Conservation and Recycling*. The Flow of Phosphorous in Food Production and Consumption Linköping, Sweden 1870-2000.
- Sörme, L. 2003. Urban Heavy Metals Stocks and Flows. Linköping Studies in Arts and Science No 270, Linköping, Schweden
- van der Voet, E., J. B. Guinee and H. A. Udo de Haes, (eds.). 2000. Heavy metals: A problem solved? *Environment & Policy*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Zeltner, Ch., Bader, H.-P., Scheidegger, R. and Baccini, P., Sustainable metal management exemplified by copper in the USA. *Regional Environmental Change* 1, 1(1999) 31-46.