

Jahresbericht 2001, 04. Dezember 2001

Projekt

Abfalllösungsmittelmanagement in der chemischen Industrie

Autor und Koautoren	Thomas Hofstetter, Christian Capello und Konrad Hungerbühler
beauftragte Institution	Prof. Konrad Hungerbühler Laboratorium für Technische Chemie / ETH Zürich Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie
Adresse	Laboratorium für technische Chemie ETH Hönggerberg 8093 Zürich
Telefon, E-mail,	01 632 33 39, hofstetter@tech.chem.ethz.ch
Internetadresse	http://www.tech.chem.ethz.ch/hungerb
BFE-Nummern	Projekt: 38368 / Vertrag: 78144
Dauer des Projekts	vom 1.1.99 bis 31.5.02

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Jahresbericht werden erste Resultate des ökologischen Vergleichs zweier Abfalllösungsmittelbehandlungsoptionen mittels Life-Cycle Assessment (Ökobilanz) präsentiert. In einer Fallstudie wurden die Verbrennung eines Toluol-Methanol-Wasser-Gemisches in der Sondermüllverbrennungsanlage und die Behandlung des Gemisches durch eine Rektifikation bewertet. Die ökologisch relevanten Stoff- und Energieströme konnten aufgrund von Daten der entsprechenden Anlagen der *Valorec Services AG* in Schweizerhalle in sog. Ökoinventaren erfasst werden. Gemäss Stand der Arbeit schneidet die Rektifikation des Abfalllösungsmittels (ALM) aus ökologischer Sicht besser ab, als dessen thermische Verwertung. Die Ergebnisse hängen stark von den ökologischen Gutschriften (in Form von Umweltbelastungs- bzw. Eco-Indikator 99-Punkten) ab. Dabei zeigt sich, dass die Gutschrift für wiedergewonnenes Toluol grösser ist, als diejenige für die durch die ALM-Verbrennung gewonnene Energie. Laufende Arbeiten befassen sich mit der Sensitivität wichtiger Einflussgrössen im System Abfalllösungsmittelbehandlung. Diese sollen demnächst identifiziert und die zugrundeliegenden Annahmen verifiziert und ev. angepasst werden.

Projektziele

In diesem Projekt werden zwei wichtige Behandlungsoptionen von Abfalllösungsmitteln (ALM) – Rektifikation bzw. Verbrennung - aus ökologischer Perspektive mittels Life-Cycle Assessment (LCA, Ökobilanz) evaluiert. Als Fallbeispiel dienen die Abfalllösungsmittelverbrennungsanlage und eine Rektifikationskolonne der Firma *Valorec Services AG* in Schweizerhalle.

Nachdem bisher ein detailliertes LCA-Modul über die Abfalllösungsmittelverbrennung erstellt wurde, sollte im Berichtsjahr ein erster **ökologischer Vergleich einer Abfalllösungsmittelbehandlung in den zwei verschiedenen Anlagen (Rektifikation vs. Verbrennung)** ermöglicht werden. Für den Vergleich mussten weitere Ökoinventare (Life-Cycle Inventories, LCI) erstellt und eine transparente Abgrenzung der in der Praxis gut integrierten Prozesse vorgenommen werden.

Die Bewertung der ALM-Behandlungsoptionen mittels LCA hängt stark von der Verfügbarkeit qualitativ guter und repräsentativer LCIs ab. In dieser Studie sind nicht nur die LCIs der Anlagen in Schweizerhalle wichtig, sondern auch diejenigen der in der Abfalllösungsmittelbehandlung entstehenden Produkte. Letztere betreffen die petrochemischen Lösungsmittelproduktion und die Energiebereitstellung.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Fallbeispiel

Da die Randbedingungen für die Bewirtschaftung verschiedener Abfalllösungsmittelgemische in der chemischen Industrie oft sehr unterschiedlich sind [2], wird im vorliegenden Projekt exemplarisch das Fallbeispiel der Behandlung eines Toluol-Methanol-Wasser-Gemisches evaluiert. Zum Zeitpunkt der Berichterstattung lag für das LCA der Rektifikation ein produktspezifisches LCI vor (Anfangszusammensetzung des ALM Toluol-Methanol-Wasser 98 : 0.5 : 0.5 (% wt), 1% übrige Stoffe, wiedergewonnenes Produkt 99.5 : 0.4 : 0, <0.1% übrige Stoffe). Von der Abfalllösungsmittelverbrennungsanlage ALV-2 basiert das LCI auf Durchschnittszahlen für das Betriebsjahr 1998 [6]. Deshalb stellen die Daten für die Verbrennung des ALM-Gemisches in der ALV-2 (wie auch vereinzelte andere Datensätze) noch Näherungswerte dar. Nach der Zusammenstellung und provisorischen Bewertung der Stoff- und Energieflüsse des Gesamtsystems 'ALM-Behandlung' sollen diese LCIs für quantitativ wichtige Stoff- und Energieflüsse in einem späteren Stadium des Projektes noch angepasst werden (vgl. weiteres Vorgehen).

Vorgehen und Methoden

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Erstellung eines vergleichenden LCAs für ALM-Verbrennung bzw. -Rektifikation. Die erfassten Stoff- und Energieströme stammen aus Jahresberichten, Betriebsvorschriften der *Valorec Services AG* und wurden durch Kommentare und Ergänzungen verschiedener *Valorec*-Mitarbeiter ergänzt. Die Anlagen gelten als repräsentativ für die ALM-Behandlung in der Schweiz [1]. Die Erstellung eines Systemmodells und dessen Bewertung mit gängigen Bewertungsmethoden erfolgte mit Hilfe des LCA-Software-Paketes *SimaPro* [7]. Wie in vorangegangenen Berichten wurden die Resultate mit zwei verschiedenen Bewertungsmethoden ausgewertet: (a) Methode der ökologischen Knappheit (Quantifizierung mittels Umweltbelastungspunkten UBP 1997, [3]) und (b) mittels *Eco-Indicator 99 Punkte* (EI-99-Pt, [5]). Damit sollen unterschiedliche Werthaltungen, wie sie in Bewertungsmethoden existieren, Rechnung getragen werden. Auf die Charakteristika der Methoden wird z.T. bei den Resultaten eingegangen.

Systemmodelle

Zum Vergleich der ökologischen Eigenschaften der Verbrennung des Toluol-Methanol-Wasser-Gemischen mit der Aufarbeitung durch die Rektifikation dient die funktionelle Einheit 'Dienstleistung von 1 kg Toluol in der chemischen Produktion' [6]. Zur Bereitstellung dieser Dienstleistung muss das Toluol hergestellt und das resultierende ALM-Gemisch 'behandelt', d.h. verbrannt bzw. rektifiziert werden. Diese Unterscheidung ist in Abbildung 1 schematisch wiedergegeben und ermöglicht eine Zuordnung der verursachten Umweltbelastung bzw. der ökologischen Gutschriften zu den zwei alternativen Behandlungsmethoden.

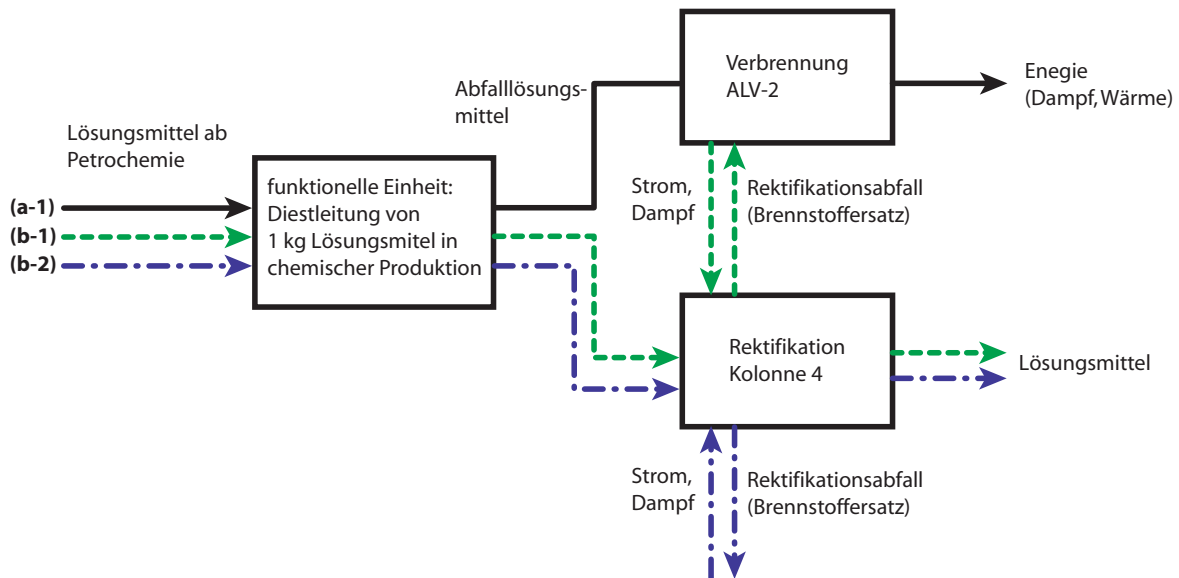


Abb. 1 Funktionelle Einheit und betrachtete Systeme für die Abfalllösungsmittelbehandlung. Die verschiedenen Pfeile symbolisieren die verschiedenen Szenarien, (a-1) die ALM-Verbrennung, (b-1) Rektifikation mit Integration der Stoffströme in ALV und (b-2) Rektifikation ohne Integration mit ALV. Aus Übersichtsgründen wurden nur die wichtigsten Stoff- und Energieströme eingezeichnet, auf den 'geschlossenen' Lösungsmittelkreislauf des Szenarios (b-2) wurde verzichtet.

Das Systemmodell besteht aus den Einheiten der petrochemischen Lösungsmittelherstellung, aus der funktionellen Einheit sowie den ALM-Behandlungsoptionen Verbrennung (ALV) bzw. Rektifikation. In Abbildung 1 sind schematisch die verschiedenen Szenarien der ALM-Behandlung durch symbolische Stoffströme hervorgehoben: (a-1) Verbrennung (durchgezogene Linie), (b-1) Rektifikation mit Integration der Stoffströme in ALV (Strom und Dampf aus ALV bezogen, Rektifikationsrückstände werden in ALV verbrannt, gestrichelte Linie) und (b-2) Rektifikation ohne Integration mit ALV.

Da die für diesen Bericht verwendeten LCI-Daten noch modifiziert werden, beziehen sich im Folgenden alle Rechnungen anstatt auf 1 kg Lösungsmittel wie in Abbildung 1 dargestellt, auf eine Charge in der Rektifikation behandeltes ALM (13760 kg).

Zur Bereitstellung dieser funktionellen Einheit sind alternative Stoffstromvarianten denkbar. Die Unterteilung in drei Szenarien und die Konsequenzen für die Allokation ökologischer Gut- und Lastschriften wird in Tabelle 1 umschrieben. Gutschriften erfolgen für die im jeweiligen Szenario anfallenden Produkte.

Tabelle 1 Beschreibung der verschiedenen Szenarien für die ökologische Bewertung der ALM-Verbrennung und -rektifikation.

	Beschreibung des Szenarios	Ökologische Gutschriften
(a-1)	<p><i>Verbrennung des ALM-Gemisches in ALV</i></p> <p>Umfasst alle Betriebsmittel- und Energieströme für die Verbrennung von ALM gemäss Jahresdurchschnittswerte 1998</p>	<p>a-11 <i>Variante mit Gutschriften: Energiegutschrift</i> für in ALV produzierten Dampf- (Niederdruck) und Strommenge durch Gutschrift für äquivalente Energieproduktion mit Heizöl EL [4].</p> <p>a-12 Die <i>Variante ohne Energiegutschrift</i> dient der Quantifizierung der ALM-Entsorgungsdienstleistung. Die in der ALV produzierte Energie wird dabei nicht berücksichtigt.</p>
(b-1)	<p><i>Rektifikation des ALM-Gemisches - Integration der Stoffflüsse mit ALV</i></p> <p>Umfasst alle Betriebsmittel- und Energieströme für die Rektifikation des Toluol-Methanol-Wasser-Gemisches gemäss Betriebsvorschrift <i>Valorec Services AG</i>.</p> <p>Strom und Dampf werden aus der ALV bezogen (ALV-LCI für Energieproduktion), Vorlauf und Rückstände aus Rektifikation gelangen als Brennstoff in die ALV.</p>	<p>b-11 <i>Variante mit Gutschriften: Wiedergewonnenes Toluol</i> wird als Toluol aus petrochemischer Produktion gutgeschrieben. Im vorliegenden Modell gelangen 13485 kg Toluol ab Petrochemie ins System, wobei 11552 kg nach der Aufarbeitung der Rektifikation gutgeschrieben werden.</p> <p><i>Energiegutschrift:</i> Verwertung der Rückstände aus Rektifikation führt zu Dampf- und Stromproduktion gemäss ALV-Inventar. (Energiebedarf der Rektifikation durch Storm/Dampf aus ALV gedeckt.) Gutschrift erfolgt wie unter a-11.</p> <p>b-12 <i>Variante ohne Gutschriften</i> für Toluol und Energiegewinnung aus Rektifikationsrückständen.</p>
(b-2)	<p><i>Rektifikation des ALM-Gemisches - Einsatz von Fremdenergie</i></p> <p>Umfasst alle Betriebsmittel- und Energieströme für die Rektifikation des Toluol-Methanol-Wasser-Gemisches gemäss Betriebsvorschrift <i>Valorec Services AG</i>.</p> <p>Strom und Dampf werden aus von externen Storm- und Dampflieferanten bezogen (<i>andere LCI für Energiegewinnung</i>, CH-Strommix, [4]), Vorlauf und Rückstände aus Rektifikation werden verbrannt (Verbrennung mittels ALV-LCI quantifiziert).</p>	<p>b-21 <i>Variante mit Gutschriften: Wiedergewonnenes Toluol</i> wird als Toluol aus petrochemischer Produktion gutgeschrieben (vgl. b-11).</p> <p><i>Energiegutschrift:</i> Verwertung der Rückstände aus Rektifikation führt zu Dampf und Stromproduktion gemäss ALV-Inventar. Gutschrift erfolgt wie unter a-11.</p>

Resultate

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der LCAs der verschiedenen Szenarien (Tabelle 1) zusammen. Umweltbelastungspunkte wurden pro Modul (z.B. petrochemische Lösungsmittelproduktion, ALM-Behandlung etc.) zusammengestellt. Die kumulierten Ergebnisse des Vergleichs der drei ALM-Behandlungsszenarien sind exemplarisch in Tabelle 3 für die Bewertung mittels UBPs wiedergegeben.

Szenario (a-1) Verbrennung des ALM-Gemisches in ALV

Die ALV dient neben der Entsorgung von kontaminierten ALM der Energiebereitstellung. Wie Abbildung 2a zeigt, lässt sich die ALV aus ökologischer Sicht mit der Energiebereitstellung aus Ölf Feuerungen vergleichen. Für die dargestellte Bereitstellung von 1 MJ Strom belasten beide Varianten die Umwelt im Umfang von ca. 180 Umweltbelastungspunkten (UBP). Dass diese Bewertungsmethode die Emissionen stark gewichtet zeigt die Evaluation der gleichen Dienstleistungen (1 MJ Strom) mittels EI-99-Punkte. Letztere Methode bewertet den Verbrauch nichterneuerbarer Energieträger besonders stark, so dass Strom aus der ALV deutlich besser abschneidet, weil in der ALV durch die Verbrennung von ALM aus Sicht eines LCAs keine Ressourcen verbraucht werden.

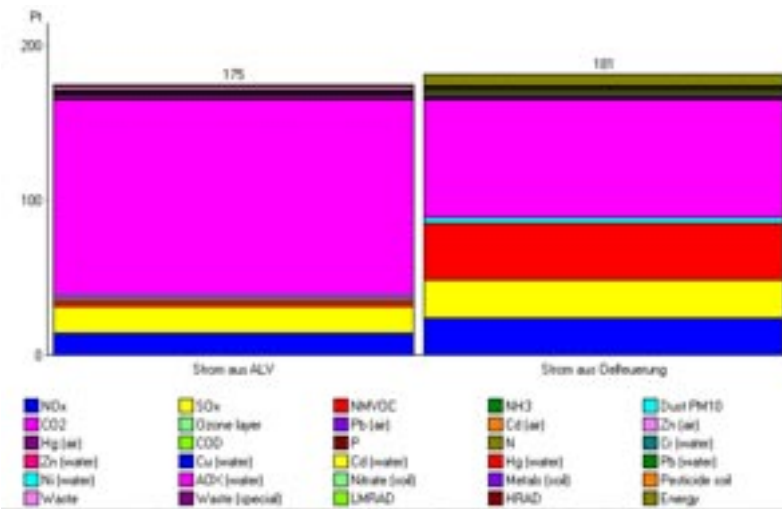


Abb. 2a Comparing 1 MJ processing 'Strom aus ALV' with 1 MJ processing 'Strom aus Ölf Feuerung'; Method: Eco-points '97 (Dk) / Eco-points / single score

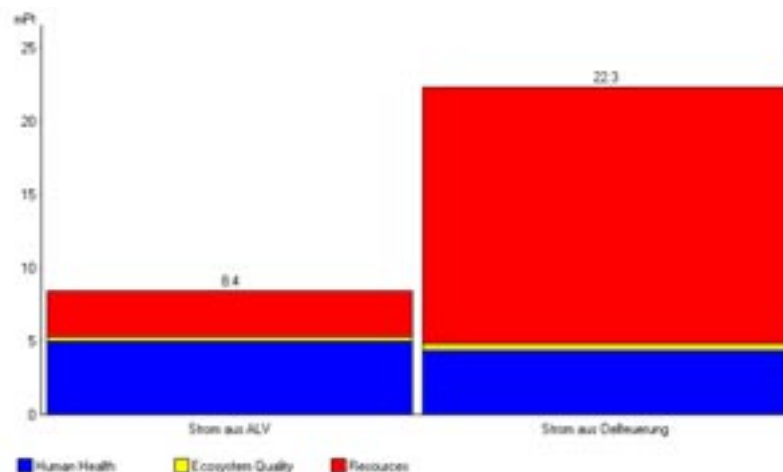


Abb. 2b Comparing 1 MJ processing 'Strom aus ALV' with 1 MJ processing 'Strom aus Ölf Feuerung'; Method: Eco-indicator '99 (E) / Europe EI '99 E/A / an

Abb. 2 Bewertung von 1 MJ Strom aus ALV (links) bzw. aus Ölf Feuerung (rechts) mit der Methode der UBP 1997 (2a, oben) bzw. Ecoindicator 99 (EI-99, 2b, unten).

Die (provisorischen) Ergebnisse der Bewertung der ALM-Verbrennung in Tabelle 2 zeigen, dass die ökologischen Gutschriften das Gesamtergebnis stark beeinflussen. Die Gutschrift für die durch die ALV gelieferte Energie reduziert die Umweltbelastung der Dienstleistung 'ALM-Entsorgung' um 40% (UBP) bzw. 32% (EI-99).

Die Beiträge der Prozessemissionen und der vorgelagerten Prozesse zur Umweltbelastung der ALM-Verbrennung (z.B. Produktion von Lösungsmitteln, Hilfsstoffen für die ALV etc.) sind bei der Auswertung mit EI-99 gleich relevant (210 bzw 258 EI-99-Pt.), während die Bedeutung der Vorprozesskette im Vergleich zu den Emissionen aus der ALV mit den UBPs geringer bewertet wird (7.01 bzw. 2.72 UBP). Die Wahl der Bewertungsmethode wirkt sich aber nicht auf die Ergebnisse des Vergleichs verschiedener ALM-Behandlungsmethoden aus.

Szenario (b-1) Rektifikation des ALM-Gemisches - Integration der Stoffflüsse mit ALV

Das LCA der ALM-Rektifikation (Tabelle 2) mit den vorliegenden Zahlen deutet darauf hin, dass die ALM-Rektifikation aufgrund der Gutschrift für Toluol ökologisch besser bewertet wird als die ALM-Verbrennung. Dabei fällt auf, dass die Umweltbelastung durch die der ALM-Behandlung vorgelagerten Prozesse in der gleichen Grössenordnung liegen wie die Gutschriften für die gewonnenen Produkte (Lösungsmittel und Energieproduktion aus der Verbrennung der Rektifikationsrückständen). Die Prozessemissionen sind, wie bei der Bewertung der ALV Szenario (a-1) weniger relevant.

Ohne Gutschriften für Lösungsmittel und Beiträge zur Energiebereitstellung ist die Gesamtbewertung der Rektifikation mit derjenigen der ALM-Verbrennung vergleichbar.

Szenario (b-2) Rektifikation des ALM-Gemisches - Einsatz von Fremdenergie

In diesem Szenario (Tabelle 2) werden die quantitativen Beiträge der ALV (durch die ALM-Verbrennung) zur Energieversorgung der Rektifikation sichtbar. Müsste Strom und Dampf extern bezogen werden (CH-Stormmix), verschlechtert sich die Bewertung durch höhere Beiträge zur Umweltbelastung aus vorgelagerten Prozessen (petrochemische Energiebereitstellung). Wie Abbildung 3 zeigt, verdoppelt sich dadurch die Umweltbelastung in UBPs (6.7 statt 3.0 UBP).

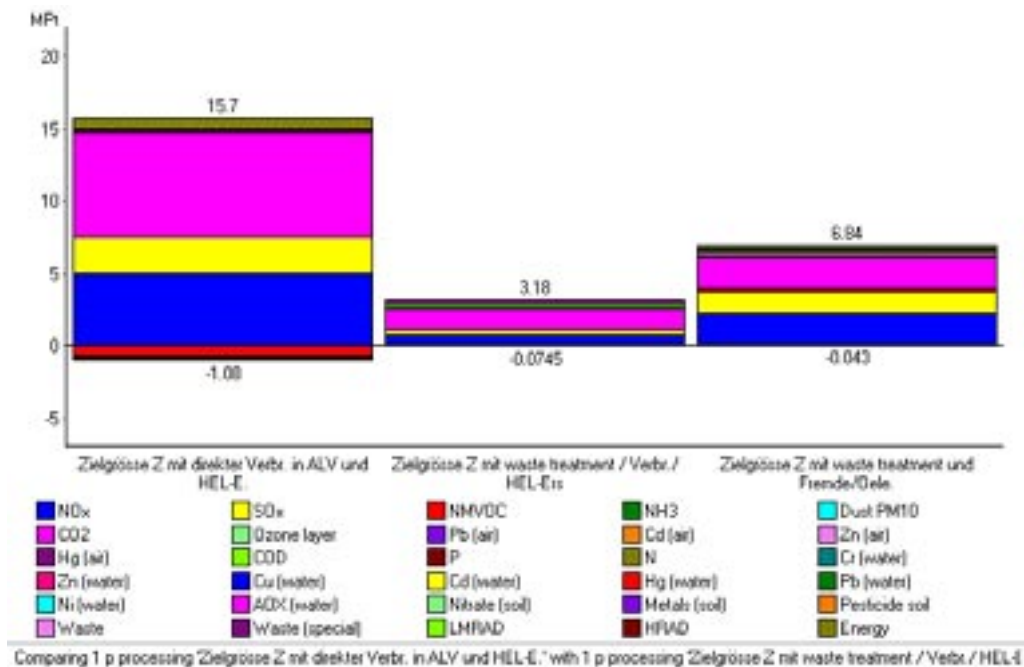


Abb. 3 Bewertung der drei ALM-Behandlungsszenarien: Verbrennung in ALV (a-11, links), Rektifikation des ALM-Gemisches - Integration der Stoffflüsse mit ALV (b-11, mitte), Rektifikation des ALM-Gemisches mit Einsatz von Fremdenergie (b-21, rechts). 'Zielgröße Z etc.' steht für eine SimaPro-interne Bezeichnung der verschiedenen Szenarien.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Bewertung der Behandlung von 13760 kg ALM (negative Werte bedeuten Gutschriften)

Szenarien	Bewertung des Gesamtsystems		ALM-Behandlung (Verbrennung bzw. Rektifikation)			
	total	Summe aller vorgelagerten Prozesse	vorgelagerte Prozesse	Prozessemissionen	Gutschriften für Energien und Produkte	
	10 ⁶ UBP	10 ⁶ UBP	10 ⁶ UBP	10 ⁶ UBP	10 ⁶ UBP	EI-99-Pt
(a-1) Verbrennung						
a-11: Energiegutschrift	14.6	3660	2.72	210	-10.0	-1230
a-12: ohne Gutschriften	24.6	3660	2.72	210	0	0
(b-1) Rektifikation (Integration in ALV)*						
b-11: mit Gutschriften	3.00	3440	1.08	37.3	-14.8	-3240
b-12: ohne Gutschriften	18.6	3540	1.86	37.3	0	0
(b-2) Rektifikation (mit Fremdenergieeinsatz)*						
b-21: mit Energiegutschrift	6.71	3780	4.78	37.3	-14.8	-3240

* Gutschrift für wiedergewonnenes Toluol in Produktgutschrift enthalten.

Tabelle 3 Bewertung des LCA der drei verschiedenen ALM-Behandlungsszenarien in UBP 1997. Die Beiträge sind nach Beitrag zum Gesamtscore absteigend sortiert (aufgrund Rundungsdifferenzen können Werte von Angaben in Tabelle 2 abweichen).

Impact Kategorie (Emissionen) (Einheiten UBP 1997)	Szenarien		
	(a-11) Verbrennung	(b-11) Rektifikation (Integration in ALV)*	(b-21) Rektifikation (mit Fremdenergieeinsatz)
Total	1.46E7	3.00E6	6.71E6
NOx	4.91E6	7.49E5	2.18E6
SOx	2.56E6	3.46E5	1.53E6
NMVOG	-7.83E5	-1.12E4	2.05E5
NH3	193	53.6	46.6
Dust PM10	-1.02E5	-2.73E4	-1.94E4
CO2	7.2E6	1.48E6	2.16E6
Ozone layer	-3.42E4	-1.14E4	-7.28E3
Pb (air)	-1.12E3	-294	-193
Cd (air)	-2.6E4	-6.96E3	-4.91E3
Zn (air)	-287	-41.6	-19.8
Hg (air)	1.5E5	3.24E4	6.8E4
COD	-7.71E4	1.82E5	1.91E5
P	1.67E4	3.9E3	7.64E3
N	-4.41E4	-1.33E4	-8.24E3
Cr (water)	295	100	144
Zn (water)	785	-527	-589
Cu (water)	6.59E3	-107	2.58E3
Cd (water)	-4.2E3	-1.13E3	-794
Hg (water)	1.61E4	3.5E3	2.97E3
Pb (water)	244	68	64.3
Ni (water)	1.91E3	-124	246
AOX (water)	-465	2.74E5	2.74E5
Metals (soil)	-7.74E3	-2.09E3	-1.5E3
LMRAD	3.52E3	965	692
HRAD	756	207	149
Energy	7E5	7.99E4	1.67E5

Geplante Arbeiten

Die kurze Zusammenfassung der LCA verschiedener ALM-Behandlungsmethoden zeigt, dass der Quantifizierung der ökologischen Gutschriften in Form von wiedergewonnenen Produkten grosse Bedeutung zukommen kann. Im beschriebenen Systemmodell betrifft dies die LCIs der Lösungsmittel wie auch die Allokation der Rückstände aus der Rektifikation auf die Strom- und Dampfproduktion in der ALV.

Laufende Arbeiten befassen sich deshalb mit der Sensitivität dieser Einflussgrössen auf die Gesamtbewertung von ALM-Verbrennung und -rektifikation. Damit soll die Bewertung der Verbrennung der Rektifikationsrückstände in der ALV verbessert werden, die bisher durch die Annahme einer durchschnittlichen ALM-Zusammensetzung in bezug auf ihre ökologische Gutschriften vermutlich unterschätzt werden.

Die vorliegende Bewertung gilt nur für Behandlung des Toluol-Methanol-Wasser-Gemisches. Zusätzliche Arbeiten sollen zeigen, wie aufgrund der Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel auf die ökologische Bewertung der Behandlung anders zusammengesetzter ALM geschlossen werden kann. Dazu werden neben der erwähnten Sensitivitätsbetrachtungen systematische Vereinfachung zur Berechnung von LCIs der Herstellung verschiedener Lösungsmittel nötig sein.

Zusammenarbeit

Die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenarbeit der Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie der ETH Zürich mit den Firmen *Valorec Services AG*, *Hoffmann-La Roche AG*, *EMS Dottikon*, und *Siegfried AG* dar.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Nach einer anfänglichen Fokussierung des Projektes auf ein detailliertes LCI der ALM-Verbrennung ist es mit ersten Zahlen zur ALM-Rektifikation gelungen, ein ausbaufähiges Systemmodell für die ökologische Bewertung verschiedener ALM-Behandlungsoptionen zu erstellen.

Qualitativ gute LCI von chemischen Prozessen und Produkten sind nur wenige publiziert. Deshalb wird der **Abschätzung von Stoff- und Energieflüssen** für fehlende Datenmodule sowie für alternative Fallbeispiele im kommenden Jahr grosse Bedeutung zukommen. Aus der Analyse von vereinfachten, theoretischen Fallbeispielen sollen Aussagen über die Allgemeingültigkeit der bisher gewonnenen Erkenntnisse gemacht werden können.

Referenzen

- [1] **Begleitgruppensitzung.** 2000. Protokoll vom 17. August 2000. ETH Zürich.
- [2] **Bruder, C.** 2000. Diplomarbeit, erstellt in der Gruppe Umwelt- und Sicherheitstechnologie. ETH Zürich.
- [3] **BUWAL.** 1998. Bewertung von Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 1997. SRU Nr. 297. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- [4] **Frischknecht, R., U. Bollens, S. Bosshard, M. Ciot, L. Ciseri, G. Doka, R. Hischier, A. Martin, R. Dones, and U. Gantner.** 1996. Ökoinventare von Energiesystemen - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. 3rd edition. Institut für Energietechnik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich; Paul Scherrer Institut, Villigen/Würenlingen.
- [5] **Goedkoop, M., and R. Spriessma.** 1999. The Eco-Indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report. Pré Consultants B. V.
- [6] **Jahn, C., and T. Hofstetter.** 2000. Abfalllösungsmittelbewirtschaftung in der chemischen Industrie. Zwischenbericht zu Handen des BfE Projekt 31239, Vertrag 71186, erstellt in der Gruppe Umwelt- und Sicherheitstechnologie. ETH Zürich.
- [7] **PréConsultants.** 2001. SimaPro, 5 ed, Amersfoort.