

# Ökobilanzen im Chemieunterricht

Darstellung eines experimentellen und  
computerunterstützten Zuganges

## Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich  
Chemische und Pharmazeutische Wissenschaften  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
in Frankfurt am Main

von

**Stefan Horn**

aus Hanau

Frankfurt 2002

D F 1

vom Fachbereich Chemische und Pharmazeutische Wissenschaften  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen

Dekan: Prof. Dr. W. E. Müller

Gutachter: Prof. Dr. H. J. Bader

Prof. Dr. A. Flint (Universität Rostock)

Datum der Disputation: 06.06.2002

*"Nicht das, was wir beginnen, zählt,  
sondern das, was wir fertigbringen."  
EMIL OESCH*

## **Vorwort**

Diese Arbeit wurde unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. H. J. Bader, Leiter des Instituts für Didaktik der Chemie der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, in der Zeit von Juli 1995 bis Mai 2002 angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. J. Bader für die Überlassung des Themas und seiner langjährigen fachlichen Unterstützung bei der Bearbeitung, ohne die die vorliegende Arbeit nicht in dieser Form hätte entstehen können.

Allen Mitarbeitern des Institutes danke ich für Ihre stete Hilfsbereitschaft und dem regen wissenschaftlichen Austausch.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. W. Klöpffer, C.A.U. GmbH in Dreieich, als Experte bezüglich Ökobilanzen für die vielen informativen Gespräche während meiner Zeit in seiner Arbeitsgruppe "Ökobilanzen und Chemikalienbewertung".

Meinen Eltern danke ich für die finanzielle Unterstützung während des Studiums.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Frau Ingrid für ihre Geduld und ihr Verständnis für meine Arbeit bedanken. Sie hat mir so manche familiäre Aufgabe abgenommen, für die ich nicht die Zeit fand.

Hanau, Mai 2002

*Stefan Horn*



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XIII
Kurzfassung .....	XV
Glossar .....	XVII
Abkürzungen .....	XXI
<b>1 Einführung .....</b>	<b>23</b>
1.1 Einleitung .....	23
1.2 Zielsetzung .....	23
1.3 Aufbau der Arbeit .....	24
<b>2 Grundlagen der Ökobilanzierung.....</b>	<b>25</b>
2.1 Einleitung .....	25
2.2 Definitionen.....	25
2.2.1 Begriff Umwelt .....	25
2.2.2 Begriff Ökobilanz .....	27
2.2.3 Begriff Input-Output-Faktor .....	29
2.3 Anwendungsmöglichkeiten .....	33
2.4 Geschichte der Ökobilanz.....	34
2.5 Erstellung einer Ökobilanz .....	37
2.5.1 Normung .....	37
2.5.2 Methodik.....	39
2.5.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen .....	39
2.5.2.2 Sachbilanz.....	41
2.5.2.3 Wirkungsabschätzung .....	42
2.5.2.4 Auswertung .....	45
2.6 Der Kumulierte Energieaufwand (KEA).....	46
2.6.1 Grundlagen.....	46
2.6.2 Vergleich verschiedener Energiesysteme .....	48
2.7 Grenzen von Ökobilanzen.....	51
2.8 Die Methode der Umweltbelastungspunkte.....	53
2.8.1 Geschichte .....	53
2.8.2 Ermittlung der Ökofaktoren .....	54
2.8.3 Berechnung der Umweltbelastung .....	56
2.8.4 Bestimmung der kritischen Flüsse .....	58
2.8.5 Wirtschaftlicher Vergleich von Schweiz und Deutschland .....	58

2.8.6	Übersicht Ökofaktoren.....	59
2.9	Fallbeispiel - Die Herstellung von Bier .....	63
2.9.1	Technischer Hintergrund .....	63
2.9.2	Ziel- und Untersuchungsrahmen.....	64
2.9.3	Sachbilanz.....	66
2.9.4	Wirkungsabschätzung .....	66
2.9.4.1	Methode der Umweltbelastungspunkte.....	66
2.9.4.2	Methode nach CML 1992 .....	68
2.9.5	Auswertung .....	70
2.10	Zusammenfassung des Abschnitts .....	72
<b>3</b>	<b>Didaktisch-methodische Grundlagen.....</b>	<b>73</b>
3.1	Einführung .....	73
3.2	Didaktische Grundlagen.....	74
3.3	Notwendigkeit der Elementarisierung.....	81
3.4	Sachunterricht der Grundschule .....	84
3.4.1	Aufgaben und Ziele des Sachunterrichts .....	84
3.4.2	Inhalte des Sachunterrichts .....	84
3.4.3	Methodische Vorschläge zum Sachunterricht.....	86
3.5	Chemieunterricht der Sekundarstufe I (Gymnasium) .....	89
3.5.1	Aufgaben und Ziele des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe I.....	89
3.5.2	Inhalte des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe I.....	90
3.5.3	Methodische Vorschläge zum Chemieunterricht in der Sekundarstufe I .....	94
3.6	Chemieunterricht der Sekundarstufe II.....	96
3.6.1	Aufgaben und Ziele des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II.....	96
3.6.2	Inhalte des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II.....	97
3.6.3	Methodische Vorschläge zum Chemieunterricht in der Sekundarstufe II .....	99
3.7	Checkliste zur Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz im Chemieunterricht der Sekundarstufe II .....	101
3.8	Zusammenfassung des Abschnitts .....	103
<b>4</b>	<b>Experimenteller Zugang zum Thema Ökobilanzen.....</b>	<b>105</b>
4.1	Einführung .....	105
4.2	Entionisiertes Wasser durch Destillation und Ionenaustausch .....	106
4.2.1	Einführung in die Problematik - Vorversuch zur Destillation.....	107
4.2.2	Die kontinuierliche Destillation von Trinkwasser .....	114
4.2.3	Der Ionenaustausch zur Gewinnung von entionisiertem Wasser .....	121
4.2.3.1	Vorbereitung und Behandlung der Austauscherpackung .....	122
4.2.3.2	Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes durch Kationenaustausch.....	123
4.2.3.3	Vollentsalzung .....	125
4.2.3.4	Regeneration des Ionenaustauschers .....	128
4.2.4	Vergleich der Ergebnisse schulexperimenteller gegenüber industrieller Verfahren (Destillation und Ionenaustausch).....	130

4.2.5	Ökobilanz der Destillation und des Ionenaustausches .....	137
4.2.5.1	Ziel und Untersuchungsrahmen .....	137
4.2.5.2	Sachbilanz .....	139
4.2.5.3	Wirkungsabschätzung .....	140
4.2.5.4	Auswertung .....	142
4.3	Darstellung und Recycling von Kunststoffen .....	143
4.3.1	Darstellung von Kunststoffen .....	144
4.3.1.1	Darstellung von Polymethacrylsäuremethylester durch radikalische Polymerisation .....	144
4.3.2	Darstellung von Polystyrol .....	149
4.3.2.1	Darstellung von Polystyrol durch radikalische Polymerisation .....	149
4.3.2.2	Darstellung von Polystyrol durch kationische Polymerisation .....	152
4.3.3	Recycling von Kunststoffen .....	155
4.3.3.1	Rohstoffliches Recycling von PMMA .....	156
4.3.3.2	Werkstoffliches Recycling von PS .....	159
4.3.3.3	Kalorimetrische Bestimmung des Brennwertes von Kunststoffen .....	163
4.3.4	Vergleich der Ergebnisse schulexperimenteller und industrieller Verfahren (Darstellung und Recycling von Kunststoffen) .....	170
4.3.4.1	Darstellung von Kunststoffen .....	170
4.3.4.2	Recycling von Kunststoffen .....	178
4.3.5	Ökobilanz der Darstellung und des Recycling von Kunststoffen .....	186
4.3.5.1	Ziel und Untersuchungsrahmen .....	186
4.3.5.2	Sachbilanz .....	188
4.3.5.3	Wirkungsabschätzung .....	192
4.3.5.4	Auswertung .....	194
4.4	Zusammenfassung des Abschnitts .....	198
<b>5</b>	<b>Computerunterstützter Zugang zum Thema Ökobilanzen.....</b>	<b>201</b>
5.1	Einführung .....	201
5.2	Definitionen.....	202
5.3	Microsoft Excel und VBA .....	203
5.4	Systemvoraussetzungen.....	204
5.5	Installation .....	205
5.6	Bedienung .....	205
5.7	Fehlermeldungen in ÖKO-BILLY .....	207
5.8	Beschreibung von ÖKO-BILLY.....	207
5.9	Zusammenfassung des Abschnitts .....	208
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>211</b>
6.1	Vorgehensweise und Ergebnisse.....	211
6.2	Schlußfolgerungen und Ausblick.....	216
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>217</b>

**Anhang**

<b>Anhang 1: Die Bereiche von ÖKO-BILLY .....</b>	<b>A4</b>
A1.1 Öko-Billy Hauptseite .....	A4
A1.2 Einführung .....	A5
A1.3 Blanko-Wirkungsabschätzung.....	A8
A1.4 Ökobilanz Papier .....	A12
A1.5 Ökobilanz entionisiertes Wasser .....	A17
A1.6 Ökobilanz Kunststoffe .....	A22
A1.7 Die Hilfe-Datei .....	A33
<b>Anhang 2: Hintergrundberechnungen in ÖKO-BILLY .....</b>	<b>A35</b>
A2.1 Einführung .....	A36
A2.2 Blanko-Wirkungsabschätzung.....	A37
A2.3 Ökobilanz Papier .....	A38
A2.4 Ökobilanz entionisiertes Wasser .....	A38
A2.5 Ökobilanz Kunststoffe .....	A40
<b>Anhang 3: Gesamtliste Ökofaktoren .....</b>	<b>A45</b>

# Abbildungsverzeichnis

## Abbildungen im Hauptteil

Abb. 1: Darstellung eines idealisierten Lebensweges .....	28
Abb. 2: Struktur des ISO TC 207 .....	38
Abb. 3: Aufbau einer Ökobilanz (nach DIN EN ISO 14040).....	39
Abb. 4: Prozeßbaum von Bier .....	65
Abb. 5: Umweltbelastungen im Lebensweg von Bier (Anteil der einzelnen Kategorien [%]).....	67
Abb. 6: Luftbelastung [UBP].....	67
Abb. 7: Wasserbelastung [UBP].....	67
Abb. 8: Abfall [UBP].....	67
Abb. 9: Energie (Verbrauch) [UBP].....	68
Abb. 10: Fläche [UBP].....	68
Abb. 11: Die größten Einzelbelastungen im Lebensweg von Bier (bezogen auf die Gesamtbelastung) (UBP) [%].....	68
Abb. 12: Energieverbrauch (CML) [MJ].....	69
Abb. 13: Treibhauseffekt (CML) [kg Kohlendioxid-Äquivalente] .....	69
Abb. 14: Humantoxizität (CML) [kg Körpergewicht] .....	69
Abb. 15: Wassertoxizität (CML) [m <sup>3</sup> Wasser] .....	69
Abb. 16: Die größten Einzelbelastungen im Lebensweg von Bier (CML) [%].....	70
Abb. 17: Beispiel für ein "Umweltbarometer" auf Basis des Materialverbrauchs (KAHLERT) .....	87
Abb. 18: Beispiel für eine Produktgruppe aus dem "Einkaufsspiel" (BUWAL) .....	88
Abb. 19: Wesentliche Voraussetzungen für die Thematik Ökobilanzen in Klasse 10/2 .....	93
Abb. 20: Beispiel einer Darstellung zum Rohstoff- und Energieverbrauch verschiedener Verpackungen (BASCHEK) .....	94
Abb. 21: Übersicht Konzeption "Thematik Ökobilanzen in Sekundarstufe II" .....	101
Abb. 22: Destillatmenge [ml/5 min] für verschiedene Varianten der Destillation .....	111
Abb. 23: Energieverbrauch [kJ/ml Destillat] für verschiedene Varianten der Destillation.....	111
Abb. 24: Kühlwasserverbrauch [ml Kühlwasser/ml Destillat] für verschiedene Varianten der Destillation .....	112
Abb. 25: Abgabe Heißwasserdampf [ml Wasser/ml Destillat] für verschiedene Varianten der Destillation .....	112
Abb. 26: Thermische Ausbeute für verschiedene Varianten der Destillation (nur Verdampfen) .....	113
Abb. 27: Aufbau der Destillationsapparatur und Kühlwasserführung .....	115
Abb. 28: Ergebnisse der Destillation mit 100-ml-Rundkolben .....	118
Abb. 29: Ergebnisse der Destillation mit 250-ml-Rundkolben .....	118
Abb. 30: Ergebnisse der Destillation mit 500-ml-Rundkolben .....	119
Abb. 31: Ergebnisse der Destillation mit 1-Liter-Rundkolben .....	119

Abb. 32: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung nach Kationenaustausch .....	126
Abb. 33: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung nach Anionenaustausch .....	127
Abb. 34: Für die Destillation erfaßte bzw. nicht erfaßte Inputs und Outputs .....	138
Abb. 35: Für den Ionenaustausch erfaßte Inputs und Outputs .....	139
Abb. 36: Unterscheidung der Polyreaktionen .....	144
Abb. 37: Übersicht Recyclingverfahren .....	155
Abb. 38: Versuchsaufbau zur kalorimetrischen Bestimmung des Brennwertes .....	165
Abb. 39: Zeit-Temperatur-Diagramm einer kalorimetrischen Messung (Beispiel PS) .....	166
Abb. 40: Für die Polymerisation (nicht) erfaßte Inputs und Outputs .....	188
Abb. 41: Für das Recycling von Kunststoffen (nicht) erfaßte Inputs und Outputs .....	189
Abb. 42: Sachbilanz zur Darstellung von Kunststoffen .....	191
Abb. 43: Sachbilanz Recycling von Kunststoffen (nur Input-Daten) .....	192
Abb. 44: Sachbilanz Recycling von Kunststoffen (nur Output-Daten) .....	192
Abb. 45: Umweltbelastung bei der Herstellung von Kunststoffen im Schulversuch .....	194
Abb. 46: Umweltbelastung bei dem Recycling von Kunststoffen im Schulversuch .....	195
Abb. 47: Kunststoffproduktion in Deutschland 1999 .....	196
Abb. 48: Verwertung und Beseitigung von Kunststoffabfällen in Deutschland 1999 .....	198
Abb. 49: Symbolleiste und Menü von ÖKO-BILLY .....	206
Abb. 50: Aufbau von ÖKO-BILLY .....	208

## Abbildungen im Anhang

Abb. A1: Hauptseite von ÖKO-BILLY mit Wahl der Bereiche und Ansichtsoptionen .....	A4
Abb. A2: Startseite des Bereiches "Einführung" .....	A6
Abb. A3: Ermittlung der Umweltbelastungen einer Kerze (Seite "Einführung Sachbilanz") .....	A6
Abb. A4: Ergebnisse der Umweltbelastungen einer Kerze (Beispiel, Seite "Einführung Sachbilanz") .....	A7
Abb. A5: Wirkungsabschätzung nach der Methode der Umweltbelastungspunkte (Seite "Einführung Wirkungsabschätzung") .....	A8
Abb. A6: Startseite des Bereiches "Blanko-Wirkungsabschätzung" .....	A9
Abb. A7: Wirkungsabschätzung für beliebige Umweltbelastungen (Beispiel, Seite "Blanko- Wirkungsabschätzung") .....	A10
Abb. A8: Schaltflächen (Seite "Blanko-Wirkungsabschätzung") .....	A11
Abb. A9: Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Wirkungsabschätzung (Seite "Blanko- Wirkungsabschätzung") .....	A11
Abb. A10: Startseite des Bereiches "Ökobilanz Papier" .....	A12
Abb. A11: Sachbilanz der Ökobilanz Papier (Seite "Sachbilanz Tabelle") .....	A13
Abb. A12: Beispiel für die Zusammenfassung der Umwelteinwirkungen (Seite "Sachbilanz kompakt") .....	A14
Abb. A13: Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Sachbilanz (Seite "Sachbilanz kompakt") .....	A15

Abb. A14: Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz Papier) .....	A16
Abb. A15: Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz Papier) .....	A17
Abb. A16: Startseite des Bereiches "Ökobilanz entionisiertes Wasser" .....	A17
Abb. A17: Sachbilanz für die Destillation (Seite "Sachbilanz Destillation") .....	A18
Abb. A18: Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Sachbilanz (Seite "Sachbilanz Destillation") .....	A19
Abb. A19: Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes (Seite "Sachbilanz Ionenaustausch") .....	A19
Abb. A20: Bestimmung der Waschwassermenge (Seite "Sachbilanz Ionenaustausch") .....	A20
Abb. A21: Bestimmung der Säure-, Laugen- und Wassermenge für Regeneration (Seite "Sachbilanz Ionenaustausch") .....	A20
Abb. A22: Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz entionisiertes Wasser) .....	A21
Abb. A23: Listenfeld für das Laden von Standard-Daten und Übernahme von Benutzerdaten (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz entionisiertes Wasser) .....	A22
Abb. A24: Startseite des Bereiches "Ökobilanz Kunststoffe" .....	A23
Abb. A25: Sachbilanz Kunststoff-Herstellung (Seite "Sachbilanz Herstellung") .....	A24
Abb. A26: Ergebnis für Kunststoff-Herstellung (Beispiel, "Seite Sachbilanz Herstellung") .....	A24
Abb. A27: Sachbilanz für das Recycling von PMMA mit Wahl verschiedener Edukte (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling von PMMA") .....	A25
Abb. A28: Ergebnis der Sachbilanz für das Recycling von PMMA (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling von PMMA") .....	A25
Abb. A29: Teil 1 der Sachbilanz für das Recycling von PS (Seite "Sachbilanz Recycling von PS") .....	A26
Abb. A30: Teil 2 der Sachbilanz für das Recycling von PS (Seite "Sachbilanz Recycling von PS") .....	A27
Abb. A31: Zusammenfassung der Sachbilanz für das Recycling von PS (Seite "Sachbilanz Recycling von PS") .....	A28
Abb. A32: Ergebnis der Sachbilanz für das Recycling von PS durch Lösen (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling von PS") .....	A28
Abb. A33: Meßwerte für die Zeit-Temperatur-Kurve zum Aufstellen der Regressionsgeraden bei der Kalorimetrie (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung") .....	A29
Abb. A34: Zeit-Temperatur-Kurve mit Regressionsgeraden sowie Geradengleichung (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung") .....	A30
Abb. A35: Berechnung der Verbrennungsenthalpie (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung") .....	A30
Abb. A36: Näherungsberechnung des Brennwertes und Heizwertes für Kohlenwasserstoffe nach BRAUN (Seite "Berechnung des Brennwertes") .....	A31
Abb. A37: Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz Kunststoffe) .....	A32
Abb. A38: Listenfeld für das Laden vorgegebener Sachbilanz-Werte oder Übernahme von Benutzerdaten (Seite "Wirkungsabschätzung") .....	A33



# Tabellenverzeichnis

## Tabellen im Hauptteil

Tab. 1: Räumliches und funktionales Umweltmodell im Vergleich .....	26
Tab. 2: Vereinfachte Übersicht erfaßbarer Inputs und Outputs und ihre Bedeutung für eine Ökobilanz .....	30
Tab. 3: Angaben zum KEA für verschiedene Energieträger (GEMIS 4.0).....	48
Tab. 4: Beispiel zum Vergleich verschiedener Energieträger auf der Basis des KEA.....	50
Tab. 5: Bandbreite verschiedener Sachbilanz-Positionen (Auswahl).....	51
Tab. 6: Vergleich der Schweiz und Deutschland hinsichtlich Industrieanteil, Bruttosozialprodukt (BSP), Fläche und Einwohnerzahl (Stand 1997) .....	59
Tab. 7: Vergleich der Begriffe für Umwelteinwirkungen und Umweltbelastungen.....	60
Tab. 8: Ökofaktoren für die Schweiz (Auswahl).....	62
Tab. 9: Ergebnisse der Destillation (Vorversuch) .....	110
Tab. 10: Ergebnisse der Destillation .....	117
Tab. 11: Vergleich unterschiedlicher Kolbengrößen auf Basis der Input-Output-Daten.....	120
Tab. 12: Input-Output-Daten für die Destillation .....	121
Tab. 13: Zusammensetzung des Trinkwassers (Beispiel Frankfurt/Main).....	125
Tab. 14: Input-Output-Daten für den Ionenaustausch .....	130
Tab. 15: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zur Destillation.....	134
Tab. 16: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum Ionenaustausch .....	135
Tab. 17: Sachbilanz Destillation.....	140
Tab. 18: Sachbilanz Ionenaustausch.....	140
Tab. 19: Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Destillation; Herstellung).....	141
Tab. 20: Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Ionenaustausch; Herstellung) .....	141
Tab. 21: Umweltbelastung durch Ionenaustausch und Destillation.....	142
Tab. 22: Input-Output-Daten für die radikalische Polymerisation von MMA.....	148
Tab. 23: Ergebnisse der radikalischen Polymerisation.....	152
Tab. 24: Input-Output-Daten für die Polymerisation von Styrol .....	154
Tab. 25: Input-Output-Daten für das Recycling von PMMA.....	159
Tab. 26: Input-Output-Daten für das Recycling von PS in Cyclohexanon (Teil 1, Lösen).....	160
Tab. 27: Input-Output-Daten für das Recycling von PS in Cyclohexanon (Teil 2, Destillation).....	162
Tab. 28: Input-Output-Daten für das Recycling von PS (zusammengefaßt) .....	162
Tab. 29: Ergebnisse unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung des Brennwertes ( $H_o$ ) .....	168
Tab. 30: Input-Output-Daten für die kalorimetrische Verbrennung.....	169
Tab. 31: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zur Darstellung von PMMA.....	174

Tab. 32: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zur Darstellung von PS.....	176
Tab. 33: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum rohstofflichen Recycling von PMMA.....	183
Tab. 34: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum werkstofflichen Recycling von PS.....	184
Tab. 35: Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum energetischen Recycling von PMMA und PS .....	185
Tab. 36: Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Kunststoffe; Herstellung) .....	193
Tab. 37: Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Kunststoffe; Recycling) .....	193
Tab. 38: Primärenergiebedarf für die Herstellung ausgewählter Kunststoffe .....	197
Tab. 39: Primärenergiebedarf für ausgewählte Recyclingverfahren von Kunststoffen.....	199
Tab. 40: Übersicht über die Symbole, Befehle und Tastenkombinationen von ÖKO-BILLY.....	206

### **Tabellen im Anhang**

Tab. A1: Inhalt der Bereiche in ÖKO-BILLY.....	A5
Tab. A2: Inputs und Outputs der tabellarischen Sachbilanz (Seite "Sachbilanz- Tabelle").....	A13
Tab. A3: Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den Kategorien (Papier; vollständiger Lebensweg).....	A15

## Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, Wege darzustellen, wie die Thematik Ökobilanzen im Chemieunterricht allgemeinbildender Schulen behandelt werden kann.

Ökobilanzen sind definiert als ein Verfahren zur Ermittlung der potentiellen Umweltbelastungen eines Produktes über dessen gesamten Lebensweg. Ein solcher Lebensweg besteht aus mehreren Abschnitten. Am Anfang steht die Rohstoffgewinnung, dann folgt die Herstellung des Produktes, darauf der Gebrauch/Verbrauch und schließlich die Entsorgung oder das Recycling. Die grundlegende Vorgehensweise, wie eine (klassische) Ökobilanz aufzustellen ist, ist ausführlich in den DIN EN ISO-Normen 14040 bis 14043 beschrieben.

Für den Chemieunterricht ist aber ein solche, den gesamten Lebensweg umfassende und DIN-gerechte Betrachtung zu zeitaufwendig und schwierig. Daher wurde nach Lösungsmöglichkeiten gesucht, dieses aufgrund seines Umweltbezuges interessante Thema dennoch für den Unterricht erschließen zu können. Es wurde ein kombinierter experimenteller und computerunterstützter Zugang entwickelt. Schwerpunkt ist der Chemieunterricht der Sekundarstufe II, jedoch kann die Thematik Ökobilanzen aufgrund umfassender didaktischer Reduktion bereits in der Sekundarstufe I oder ganz vereinfacht sogar im Sachunterricht der Grundschule behandelt werden. Methodische Möglichkeiten werden auch für diese Schulstufen vorgestellt.

Für die Sekundarstufe II wurden Experimente erarbeitet, deren Daten zu den Stoff- und Energieströmen dazu dienen, eine vereinfachte Ökobilanz im Unterricht aufstellen zu können. Gegenstand der Experimente ist zum einen die Herstellung von entionisiertem Wasser über Destillation und Ionenaustausch, zum anderen die Herstellung und das Recycling von Kunststoffen. Die Experimente sind so konzipiert, daß sie von Schülern<sup>1</sup> selbst durchgeführt werden können.

Um die Auswertung und die Aufstellung der Ökobilanz zu vereinfachen und somit zu beschleunigen, wurde das Programm ÖKO-BILLY unter Microsoft Excel 97 entwickelt, welches hier ebenfalls vorgestellt werden soll. Es dient nicht nur Datenerfassung, sondern ist darüber hinaus auch ein Lernprogramm, welches den Aufbau und die Durchführung einer Ökobilanz demonstriert.

Durch die Kombination von Experiment und Computerprogramm kann die Thematik Ökobilanzen erfolgreich im Chemieunterricht der gymnasialen Oberstufe vermittelt werden.

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der Kürze und besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit bei geschlechtsbezogenen Begriffen nur eine Form verwendet, zum Beispiel wird der Ausdruck "Schüler" gegenüber "Schülerschaft" oder "Schülerinnen und Schülern" vorgezogen. Es sind aber dennoch immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen. Dies gilt in gleicher Weise auch für die Begriffe "Lehrerinnen" und "Lehrer". Der letztere davon wird bevorzugt.



## Glossar

Die folgende Liste gibt eine Zusammenstellung von in dieser Arbeit häufig gebrauchten Begriffen. Teilweise haben Begriffe gleichen Inhalts zwei Bezeichnungen (z. B. Ökofaktor und Charakterisierungsfaktor). Dies beruht darauf, daß die Methode der Umweltbelastungspunkte älter ist als die DIN EN ISO-Normen und bereits eine eigene Terminologie vor der Normung aufwies. Für diese Normen wurden im Laufe des später einsetzenden mehrjährigen Normungsprozesses eigene Bezeichnungen gewählt. Auf eine Angleichung beider wurde in dieser Arbeit bewußt verzichtet, um die Wiedererkennung zu erleichtern. Es werden jedoch Gemeinsamkeiten aufgezeigt. Zur besseren Darstellung der Methode der Umweltbelastungspunkte sowie den darauf bauenden Berechnungen wurden eigene Begriffe wie Umwelteinwirkung oder Umweltbelastung eingeführt. Die Hochzahlen hinter den aufgeführten Begriffen geben die Literaturquelle an (s.u.).

Abfall <sup>4</sup>	eine Kategorie der Umweltbelastung (Folge der Umwelteinwirkung Deponieraumverbrauch)
Auswertung <sup>1</sup>	4. Teil einer Ökobilanz; Zusammenfassung der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung
Belastung <sup>4</sup>	Kurzform von Umweltbelastung
Bodenverbrauch <sup>4</sup>	eine Umwelteinwirkung
Charakterisierung <sup>1</sup>	Teil der Wirkungsabschätzung; Berechnung der Wirkungskategorien
Charakterisierungsfaktor <sup>1, 4</sup>	Multiplikationsfaktor für die Berechnung der Wirkungskategorie aus den zugeordneten Sachbilanzergebnissen; andere Bezeichnung ist Klassifikationsfaktor
Deponieraumverbrauch <sup>4</sup>	eine Umwelteinwirkung
Emission <sup>4, 5</sup>	Abgabe von Stoffen sowie Lärm, Wärme oder Strahlen aus der Technosphäre in die Umwelt
Energie <sup>4</sup>	eine Kategorie der Umweltbelastung (Folge der Umwelteinwirkung Energieverbrauch unter Berücksichtigung eines möglichen Energiegewinns, ausgedrückt als Primärenergie)
Energieverbrauch, -gewinn <sup>4</sup>	eine Umwelteinwirkung; bezieht sich entweder auf Endenergieträger oder Primärenergie
Fläche <sup>4</sup>	eine Kategorie der Umweltbelastung (Folge der Umwelteinwirkung Bodenverbrauch)
Fluß <sup>2, 4</sup>	Menge an Umwelteinwirkungen pro geographisch abgegrenztem Gebiet pro Zeiteinheit
funktionelle Einheit <sup>1</sup>	Vergleichseinheit in einer Ökobilanz
Gruppe <sup>4</sup>	Gruppe von Umwelteinwirkungen (siehe dort); z. B. Lärm- oder Luftemissionen

Input <sup>1</sup>	Stoff oder Energie, welche(r) einem Modul zugeführt wird
Inputs <sup>1, 4</sup>	Gesamtheit aller Input-Ströme eines Moduls bzw. Produktsystems
Kategorie <sup>4</sup>	Klasse von Umweltbelastungen (siehe dort): Abfall, Energie, Fläche, Lärm, Luftbelastung und Wasserbelastung
Klassifizierung <sup>1</sup>	Teil der Wirkungsabschätzung; Zuordnung der in der Sachbilanz zusammengestellten Inputs und Outputs zu einzelnen Wirkungskategorien
Lärm <sup>4</sup>	eine Kategorie der Umweltbelastung (Folge der Umwelteinwirkung Lärmemissionen)
Lärmemissionen <sup>4</sup>	eine Umwelteinwirkung
Lebensweg <sup>1, 4</sup>	Stufen eines Produktsystems, welche aufeinanderfolgen und miteinander verbunden sind (Rohstoffgewinnung, Produktion, Gebrauch/Verbrauch, Entsorgung/Recycling); unterteilt in Lebenswegabschnitte
Life Cycle Assessment (LCA) <sup>1</sup>	englische Bezeichnung für Ökobilanz
Luftbelastung <sup>4</sup>	eine Kategorie der Umweltbelastung (Folge der Umwelteinwirkung Luftemissionen)
Luftemissionen <sup>4</sup>	eine Umwelteinwirkung
Methode der Umweltbelastungspunkte <sup>4</sup>	Methode für die Durchführung der Wirkungsabschätzung; Beurteilung der Umweltbelastung über das Verhältnis zwischen kritischen und tatsächlichen Flüssen; andere Bezeichnung Methode der ökologischen Knappheit
Modul <sup>1</sup>	kleinste Einheit eines Produktsystems, für das Input-Output-Daten gesammelt werden können (Einzelprozeß oder Gruppe von Prozessen)
Ökobilanz <sup>1</sup>	Zusammenstellung relevanter Inputs und Outputs eines Produktsystems und Beurteilung der damit verbundenen potentiellen Umweltbelastungen
ÖKO-BILLY <sup>4</sup>	Lern- und Auswertungsprogramm für Ökobilanzen
Ökofaktor <sup>2, 4</sup>	Charakterisierungsfaktor; Maß für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung
Output <sup>1</sup>	Stoff oder Energie, welche(r) von einem Modul abgeführt wird
Outputs <sup>1, 4</sup>	Gesamtheit aller Output-Ströme eines Moduls bzw. Produktsystems
Produktsystem <sup>1</sup>	Zusammenfassung der Module, welche durch Material- und Energieflüsse miteinander verbunden sind
Sachbilanz <sup>1</sup>	2. Teil einer Ökobilanz; Zusammenstellung der relevanten

	Inputs und Outputs
Systemgrenze <sup>1</sup>	Schnittstelle zwischen einem Produktsystem und seiner Umwelt oder anderen Produktsystemen
Technosphäre <sup>3, 4</sup>	Teil der Welt, welcher dem menschlichen Einflußbereich unterliegt (funktionales Umweltmodell)
Umwelt <sup>3, 4</sup>	1. räumliches Umweltmodell: Umwelt umfaßt Luft, Wasser, Boden sowie die darin lebenden Organismen Tiere, Pflanzen und den Menschen  2. funktionales Umweltmodell: Umwelt ist der Teil der Welt außerhalb der Technosphäre und somit ohne menschlichen Einfluß
Umweltbelastung <sup>4</sup>	Auswirkung menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt (beurteilt über Wirkungsabschätzung); unterteilt in sechs Kategorien
Umweltbelastungskennzahl <sup>4</sup>	Maß für die Umweltbelastung; Ergebnis der Multiplikation von Umwelteinwirkung mit ihrem spezifischen Ökofaktor
Umweltbelastungspunkte <sup>4</sup>	Einheit der Umweltbelastungskennzahl
Wasserbelastung <sup>4</sup>	eine Kategorie der Umweltbelastung (Folge der Umwelteinwirkung Wasseremissionen)
Wasseremissionen <sup>4</sup>	eine Umwelteinwirkung
Umwelteinwirkung <sup>4</sup>	jede menschliche Aktivität, welche unmittelbar auf die Umwelt einwirkt (erfaßt über Sachbilanz als Input-Output-Daten), z. B. Rohstoffverbrauch oder Emissionen; unterteilt in sechs Gruppen
Wirkungsabschätzung <sup>1, 4</sup>	3. Teil einer Ökobilanz; Bestimmung der von den Inputs und Outputs ausgehenden potentiellen Umweltwirkungen
Wirkungskategorie <sup>1</sup>	Klasse von spezifischen und repräsentativen Umweltwirkungen
Ziel und Untersuchungsrahmen <sup>1</sup>	1. Teil einer Ökobilanz; Festlegen des Ziels und des Untersuchungsrahmens (funktionelle Einheit, Systemgrenzen)

<sup>1</sup> DIN EN ISO-Normen 14040 ff. [42; 43; 46; 56]

<sup>2</sup> Das Handwörterbuch der Ökobilanzierung [1]

<sup>3</sup> KLÖPFER [5], FRISCHE ET AL. [7]

<sup>4</sup> eigene Anmerkungen bzw. Definition

<sup>5</sup> Bundes-Immissionsschutzgesetz [2, S. 300]



## Abkürzungen

A	Anhang
APME	ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CEN	COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
CML	CENTRUM VOOR MILIEUKUNDE (CENTER OF ENVIRONMENTAL SCIENCE) Leiden
DIN	DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V.
DOC	Dissolved Organic Carbon(s)
DSD	DUALES SYSTEM DEUTSCHLAND
EN	Europäische Norm
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
H <sub>o</sub>	oberer Heizwert (Brennwert)
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
KEA	Kumulierter Energieaufwand
MMA	Methacrylsäuremethylester
MS	MICROSOFT CORPORATION (Redmond, Washington, USA)
NMVOC	Non Methane Volatile Organic Carbons
PC	Personalcomputer
PMMA	Polymethacrylsäuremethylester
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
SETAC	SOCIETY FOR ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY
TOC	Total Organic Carbon
UBP	Umweltbelastungspunkte
VBA	Visual Basic für Applikationen
VDI	VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE
VOC	Volatile Organic Carbons



# 1 Einführung

## 1.1 Einleitung

Der Chemieunterricht hatte bis in die sechziger Jahre nahezu ausschließlich das Ziel, chemisches Wissen auf fachsystematischer Basis zu vermitteln. Wertungen von Produkten oder Verfahren wurden selten unter ökologischen Gesichtspunkten durchgeführt, sondern statt dessen vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit und des Gebrauchswertes aus betrachtet. So wurde etwa die Überlegenheit der Petrochemie gegenüber der Kohlechemie oder die neuen Eigenschaften von Kunststoffen gegenüber herkömmlichen Werkstoffen thematisiert.

Erst als Umweltprobleme und Umweltschutz auf ein allgemeines Interesse stießen, wurden diese auch zunehmend im Chemieunterricht berücksichtigt. Damit waren in vielen Fällen ökologische Wertungen verbunden. Die Spannweite reicht dabei von der Wertung des Düngereinsatzes bis zu der von Konsumgewohnheiten. Dies bedeutet auf der einen Seite die gewünschte Öffnung zu einer fächerübergreifenden Sichtweise, zeigt aber auf der anderen Seite auch Mängel. Eine ökologische Einschätzung von Substanzen oder chemischen Verfahren ist vielschichtig, und subjektive Beurteilungen sind oft fragwürdig oder falsch. Folglich zog man sich bisher im Chemieunterricht auf wenige triviale Vergleiche zurück oder machte nur wenig konkrete Aussagen.

Das zur gleichen Zeit in der Fachwissenschaft entstehende Verfahren der Ökobilanzierung stand bis vor wenigen Jahren für die Schule noch nicht zur Verfügung und wird auch heutzutage kaum eingesetzt. Man fand zu diesem modernen und überaus interessanten Thema bis jetzt keinen befriedigenden Zugang. Die Gründe dafür sind eine dem Laien noch nicht völlig überschaubare Vorgehensweise sowie die große Zahl existierender Modelle für die Bestimmung der potentiellen Umweltbelastungen.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die Thematik der Ökobilanzierung im Chemieunterricht behandelt werden kann. Der Schwerpunkt soll dabei auf der Sekundarstufe II liegen, jedoch soll zudem die Möglichkeit geprüft werden, in welchem Maße auch ein Einsatz im Chemieunterricht der Sekundarstufe I und im Sachunterricht der Grundschule möglich ist.

Um dem besonderen Charakter des Chemieunterrichts Rechnung zu tragen, wird ein (schüler)experimenteller Zugang angestrebt. Der Vorteil einer solchen Vorgehensweise ist bereits wiederholt beschrieben worden und wird in dieser Arbeit nicht noch einmal begründet (z. B. in [88, S. 292 ff.]).

Es wurden Schülerexperimente entwickelt, deren Daten zu den Stoff- und Energieströmen für die Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz im Chemieunterricht verwendet werden. Es werden zwei Experimentalblöcke vorgestellt, zum einen die Herstellung von entionisiertem Wasser über Destillation beziehungsweise über Ionenaustausch, zum anderen verschiedene Herstellungs- und Recyclingvarianten für die Kunststoffe Polystyrol (PS) und Polymethacrylsäuremethylester (PMMA).

Aufgrund der selbst bei der Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz anfallenden Menge an Input-Output-Daten ist zudem eine computerunterstützte Auswertung erforderlich. Ein solches Programm muß für den schulischen Gebrauch preiswert, leicht zu bedienen und auf älteren PCs lauffähig sein. Das hier vorgestellte Programm ÖKO-BILLY nutzt das bekannte Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel 97 und erfüllt somit diese Bedingungen. Es vereinfacht die Auswertung der Experimente und dient zugleich auch zur Berechnung einer vereinfachten Ökobilanz. Integriert wurden ferner auch eine kurze Einführung in das Verfahren der Ökobilanzierung sowie eine Modell-Ökobilanz.

Das standardisierte Verfahren der Ökobilanzierung ist in der Praxis sehr komplex und zeitaufwendig. Im Unterricht kann es daher nur darum gehen, die grundlegende Vorgehensweise zu demonstrieren. Dies erfordert eine starke Vereinfachung, welche dennoch die wichtigen Elemente einer Ökobilanz beinhaltet. Hierzu gehört auch eine leicht einsetzbare und transparente Methode für die Durchführung der Wirkungsabschätzung. Es wurde die Methode der Umweltbelastungspunkte ausgewählt und entsprechend den schulischen Anforderungen modifiziert.

Somit liegen alle Voraussetzungen vor, mit der die Thematik Ökobilanzen im Chemieunterricht behandelt werden könnte:

- Schülerexperimente als Datenquelle für Material- und Energieströme
- computerunterstützte Auswertung mit Hilfe von ÖKO-BILLY
- vereinfachte Vorgehensweise zur Erstellung der Ökobilanz
- geeignete Methode für die Wirkungsabschätzung

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst werden nach dieser Einführung ausführlich die fachlichen Grundlagen der Ökobilanzierung behandelt (Kapitel 2). Dies umfaßt unter anderem neben der Beschreibung, wie eine Ökobilanz nach ISO-Norm erstellt wird, auch ein Fallbeispiel zur Herstellung von Bier. Darauf folgt eine Analyse der aktuellen Lehrpläne hinsichtlich des möglichen Einsatzes der Thematik Ökobilanzen im Unterricht sowie eine Reihe methodischer Vorschläge (Kapitel 3). Das Kapitel 4 beinhaltet die Versuchsbeschreibungen für die beiden Experimentalblöcke "Entionisiertes Wasser durch Destillation und Ionenaustausch" sowie "Darstellung und Recycling von Kunststoffen". Das Lern- und Auswertungsprogramm ÖKO-BILLY wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Im Anhang finden sich eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Bereiche (Dateien) von ÖKO-BILLY sowie den im Programm vorgenommenen Hintergrundberechnungen. Dieser schließt sich eine ausführliche Liste von Ökofaktoren (Berechnungsfaktoren für die Methode der Umweltbelastungspunkte) an.

## **2 Grundlagen der Ökobilanzierung**

### **2.1 Einleitung**

Mit Hilfe von Ökobilanzen ist es möglich, eine Aussage über die Umweltbelastungen von Produkten oder Dienstleistungen zu treffen.

Ein Produkt weist über alle Abschnitte seines Lebensweges mehr oder weniger große Umweltbelastungen auf. Um darüber ein zumindest annähernd genaues Bild zu erhalten, ist es erforderlich, alle Stoff- und Energieumsätze über den gesamten Lebensweg zu erfassen. In jedem Abschnitt des Lebensweges werden alle anfallenden Stoff- und Energieströme ermittelt. Diese sind vor allem auf der Input-Seite der Verbrauch an Energie, Wasser und die eingesetzten Rohstoffe sowie auf der Output-Seite die entstehenden Schadstoffe und Abfälle. Eine Ökobilanz umfaßt aber nicht nur diese Ebene der Input- und Output-Daten. Es wird ferner aus diesen Daten über die sogenannte Wirkungsabschätzung die Umweltbelastung errechnet.

Im folgenden wird ausführlich dargestellt, was unter einer Ökobilanz zu verstehen ist. Dies ist erforderlich, da die Thematik in der Schule bisher kaum behandelt wurde und somit das zum weiteren Verständnis notwendige Hintergrundwissen nicht vorausgesetzt werden kann. Es werden zunächst grundlegende Begriffe erklärt. Im weiteren wird die Methode der Umweltbelastungspunkte für die Wirkungsabschätzung vorgestellt, welche als eine von zahlreichen Methoden für diese Arbeit ausgewählt wurde. Ferner wird die Geschichte der Ökobilanzierung kurz beleuchtet und auch ein Blick auf die Ungenauigkeiten und Fehlermöglichkeiten in einer Ökobilanz geworfen. Abschließend wird am Beispiel des Lebensweges von Bier das Erstellen einer Ökobilanz demonstriert.

### **2.2 Definitionen**

Es werden an dieser Stelle die wesentlichen Begriffe Umwelt und Ökobilanz ausführlich erläutert.

#### **2.2.1 Begriff Umwelt**

Der Begriff Umwelt ist nicht eindeutig definiert und wird unterschiedlich gebraucht. Im naturwissenschaftlichen Sinne wird darunter meist ein räumliches Umweltmodell verstanden (z. B. nach [3, S. 3 ff.; 4, S. 334 f.]). Das räumliche Modell umfaßt zum einen die durch den Menschen künstlich veränderten Lebensräume (vor allem durch Wirtschaft und Technik), zum anderen die natürlichen Lebensräume. Diese, nicht durch den Menschen beeinflussten räumlichen Bereiche (Kompartimente) sind Luft, Wasser, Boden sowie die darin lebenden Organismen. Sie stellen die Umwelt im eigentlichen Sinne dar und stehen untereinander in Wechselwirkung. Der Mensch ist zwar Gestalter seiner künstlichen Lebensräume, jedoch als Lebewesen auch Teil der Umwelt.

Das räumliche Modell ist vielfach ausreichend, stößt jedoch an seine Grenzen, wenn es darum geht, besondere räumliche beziehungsweise zeitliche Bedingungen zu berücksichtigen.

Man stelle sich als erstes Fallbeispiel einen Betriebsunfall auf dem Werksgelände eines chemischen Betriebes vor, bei dem eine Ammoniak-Gaswolke freigesetzt wird. Ferner soll angenommen werden, daß bei dem Unfall kein Angestellter verletzt wurde und die Werksfeuerwehr die Gaswolke mit Wasser niedergeschlagen hat. Zwar ist Ammoniak in die Luft gelangt, konnte jedoch in Wasser gelöst werden. Die Lösung wurde in der werkseigenen Kanalisation aufgefangen und anschließend neutralisiert.

Ein weiteres Fallbeispiel ist die "Entsorgung" von elektrischen Altgeräten im "Grünen", beispielsweise ein Fernseher am Waldrand (nach KLÖPFFER [5]). Solche Geräte enthalten in diversen elektrischen Bauteilen Stoffe, welche bei Austritt zu einer Umwelteinwirkung führen können (z. B. Flammhemmer in Kunststoffen von Altfernsehern [6, S. 37 ff.]). Wird ein Fernseher am Waldrand abgeladen, ist er leicht zu finden und kann zumindest theoretisch wieder von der Müllabfuhr abgeholt und ordnungsgemäß entsorgt werden.

Beide Fallbeispiele zeigen, daß der Umweltbegriff im traditionellen räumlichen Modell unzureichend ist. Das gilt besonders dann, wenn es, wie bei der Erstellung von Ökobilanzen erforderlich ist, eine eindeutige Zuordnung zu treffen, ob der betrachtete Output in die Umwelt übergeht und somit eine Umwelteinwirkung vorliegt. Im ersten Beispiel würde eine Umwelteinwirkung erst erfolgen, wenn das Ammoniakgas das Werksgelände verläßt und Menschen, Tiere und Pflanzen gefährdet wären. Im zweiten Fall besteht nur dann keine Gefahr für die Umwelt, wenn die Altgeräte am Waldrand eingesammelt und ordnungsgemäß entsorgt werden.

Besondere Anforderungen an die Systemgrenzen (Luft innerhalb beziehungsweise außerhalb des Werksgeländes, Boden am Waldrand beziehungsweise im Wald) können so nicht berücksichtigt werden. Es wird deshalb ein funktionales Umweltmodell nach FRISCHE vorgeschlagen, welches eine eindeutigere Zuordnung (Output in die Umwelt ja/nein) erlaubt [5; 7].

Umwelt wird nun nicht mehr räumlich, sondern funktional definiert. Das Kriterium ist hierbei, ob der Mensch aktiv Kontrolle über die von ihm ausgehenden Umwelteinwirkungen hat. Ist dies der Fall, so gilt dieser mittels menschlicher Maßnahmen kontrollierbare Lebensraum nicht als Umwelt (Tab. 1). Er wird als Technosphäre bezeichnet. Umwelt ist im Gegensatz dazu der Lebensraum, welcher sich außerhalb des menschlichen Einflußbereiches befindet. Technosphäre und Umwelt können im funktionalen Modell sowohl künstlich veränderte als auch natürliche Lebensräume umfassen.

**Tab. 1:** Räumliches und funktionales Umweltmodell im Vergleich

räumliches Umweltmodell	funktionales Umweltmodell
künstlich veränderte Lebensräume (Umwelt im weiteren Sinne)	künstlich veränderte sowie natürliche Lebensräume unter Kontrolle des Menschen (Technosphäre)
natürliche Lebensräume (Umwelt im engeren Sinne)	künstlich veränderte sowie natürliche Lebensräume ohne Kontrolle des Menschen (Umwelt)

Solange im ersten Beispiel das Ammoniakgas sich auf dem Werksgelände befindet, ist die Werksfeuerwehr (zumindest theoretisch) in der Lage, das Gas in Wasser zu lösen und so zu verhindern, daß es das Werksgelände verläßt. Die ausgetretene Gaswolke bleibt also unter menschlicher Kontrolle (Technosphäre). Dies ist auch bei dem Beispiel des

entsorgten Fernseherers der Fall, solange er leicht auffindbar bleibt (z. B. am Waldrand) und gezielt eingesammelt werden kann.

Kommt es allerdings zum unkontrollierten Austritt von Schadstoffen aus dem Gerät in die natürliche Umwelt, liegt eine Umwelteinwirkung vor.

In dieser Arbeit wird der Begriff Umwelt im funktionalen Sinne gebraucht. Er umfaßt also die natürlichen und künstlichen Lebensräume ohne eine Kontrolle des Menschen.

### 2.2.2 Begriff Ökobilanz

Die Ökobilanz umfaßt allgemein eine Zusammenstellung relevanter Inputs und Outputs über den gesamten Lebensweg eines Produktes sowie ferner eine Beurteilung der damit verbundenen potentiellen Umweltbelastungen. Es gilt ein erweiterter Produktbegriff, das heißt, es sind auch Dienstleistungen eingeschlossen. Diese Arbeit beschränkt sich allerdings auf Produkte im engeren, gegenständlicheren Sinne (Produktökobilanz).

Bei einer Ökobilanz darf man jedoch keine definitiven Aussagen erwarten, in dem Sinne, daß die Umwelteinwirkung  $x$  (z. B. Schadstoffemission) die Umweltbelastung  $y$  (z. B. Treibhauseffekt) haben wird. Eine Ökobilanz erlaubt nur die Bestimmung potentieller Belastungen aufgrund von Modellannahmen, das heißt, der Schadstoff  $x$  könnte die Umweltbelastung  $y$  haben.

Aufgrund der Entwicklungsgeschichte existieren neben dem Ausdruck Ökobilanz weitere Begriffe wie Lebensweganalyse oder Ökoprofil [8, S. 11]. International hat sich der englische Begriff Life Cycle Assessment (LCA) durchgesetzt.

Der CODE OF PRACTICE der SETAC gibt folgende umfassende Definition von Ökobilanz:

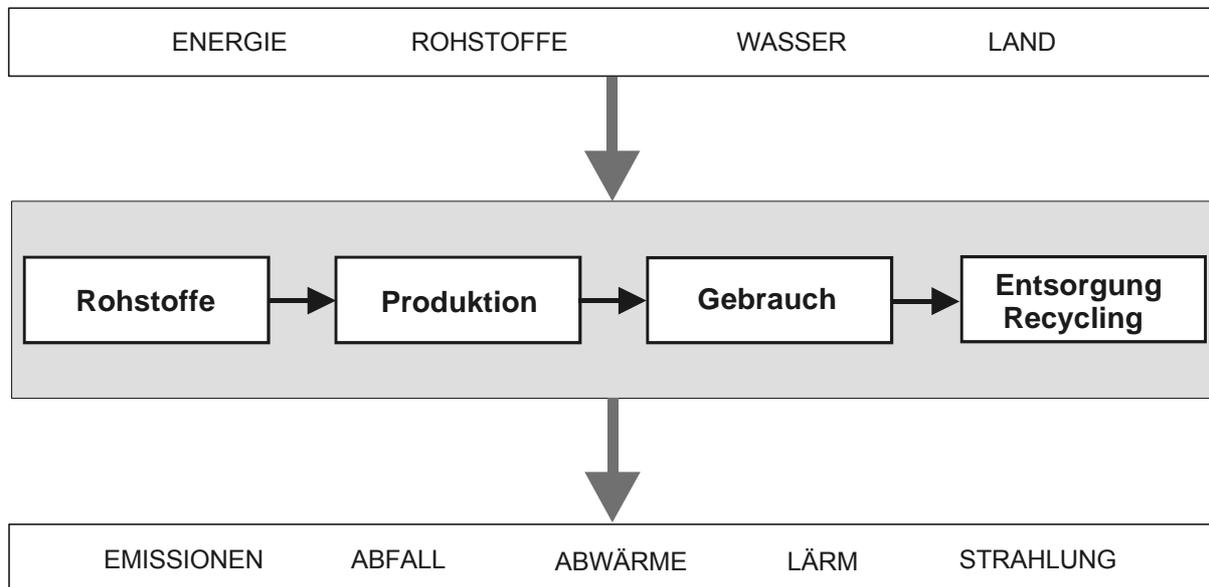
*"The Life-Cycle Assessment is an objective process to evaluate the environmental burdens associated with a product, process or activity by identifying and quantifying energy and materials used and wastes released to the environment, to assess the impact of those energy and material uses and releases to the environment, and to evaluate and implement opportunities to affect environmental improvements. The assessment includes the entire life cycle of the product, process or activity, encompassing extracting and processing raw materials; manufacturing, transportation and distribution; use, re-use, maintenance; recycling and final disposal."* [9, S. 7]

Trotz des Namensanteils hat eine Ökobilanz nichts mit einer Bilanz im betriebswirtschaftlichen Sinn gemeinsam, da keine Gegenüberstellung der Aktiva (Wirtschaftsgüter) und der Passiva (Finanzierungsmittel) erfolgt. Ökobilanzen sind *"Flußrechnungen"* [10, S. 16], welche die in ein untersuchtes System hinein- und herausfließenden Stoff- und Energieströme erfassen und beurteilen. CORINO sieht jedoch Parallelen, wenn er vorschlägt, Bilanz *"im Sinne eines abschließenden Überblicks"* zu verstehen [8, S. 12].

Der Lebensweg eines Produktes umfaßt verschiedene Abschnitte, beginnend mit der Förderung der Rohstoffe, über die Produktion und den eigentlich Gebrauch bis hin zur Entsorgung beziehungsweise zum Recycling des Produktes.

In den meisten Fällen werden in jedem Abschnitt verschiedene Stoffe und Energieträger zugeführt (Inputs), gleichzeitig können andere Stoffe und Energieträger freigesetzt werden

(Outputs). Inputs sind vor allem der Verbrauch an Rohmaterialien sowie Energie. Outputs sind zum Beispiel Wasser- und Luftemissionen, Abfall oder Lärm. Die Input-Output-Ströme werden möglichst über den gesamten Lebensweg des Produktes (cradle-to-grave) erfaßt. Abb. 1 zeigt dies schematisch.



**Abb. 1:** Darstellung eines idealisierten Lebensweges

Abzugrenzen ist das Verfahren der Ökobilanzierung von anderen Umweltinstrumenten. Eine Übersicht gibt BECK [11, S. 103 ff.]. Vier davon sollen hier kurz vorgestellt werden.

- Bei der Produktlinienanalyse (PLA) werden neben den ökologischen Folgen auch soziale und wirtschaftliche Auswirkungen eines Produktes für den gesamten Lebensweg ermittelt. Zudem soll hierbei auch das dem "Produkt zugrundeliegende Bedürfnis im Kontext der gesellschaftlichen Entwicklung" beurteilt werden [11, S. 112]. Die Umsetzung ist jedoch schwierig. WEINBRENNER gibt eine Anleitung zur Durchführung und Auswertung von Produktlinienanalysen am Beispiel verschiedener Joghurtsorten [12]. FINK zeigt am Vergleich von Glühlampen und Energiesparlampen die Unterschiede zwischen Ökobilanz und Produktlinienanalyse [35].<sup>2</sup>
- Bei der Checklisten-Methode werden im Unternehmen Mängel mittels einer Checkliste aufgespürt und beseitigt. Dabei orientiert man sich an Richtgrößen, Grenzwerten und umweltverträglichen Alternativen [13, S. 119]. Der Rahmen der Untersuchung kann sich auf Produkte, Stoffe oder ganze Abteilungen beziehen.

<sup>2</sup> Für die Sekundarstufe II und die Erwachsenenbildung ist ein multimediales Lernprogramm für die Erstellung einer Produktlinienanalyse am Beispiel von Textilien erhältlich. Zu beziehen ist die CD-ROM "Jacke wie Hose" über die STIFTUNG VERBRAUCHERINSTITUT BERLIN.

- Firmen aus den verschiedensten Branchen veröffentlichen Umweltberichte. Neben dem Werbeeffect sind Umweltberichte auch dazu geeignet, schnell Schwachstellen im Unternehmen zu ermitteln. Es erfolgt nur eine Sammlung von Input-Output-Daten. Diese umfaßt als Inputs den Verbrauch an Materialien, Wasser und Energie. Auf der Output-Seite stehen dann die Materialabgänge (Produkte, Abfälle), Abwasser und Luftemissionen [13, S. 579 ff.].
- Ein Öko-Audit ist eine freiwillige Überprüfung und Ermittlung des Ist-Zustandes des betrieblichen Umweltschutzes. Die Durchführung ist europaweit durch die EG-Öko-Audit-Verordnung (1993, 2001) geregelt. Teilnehmen können neben Unternehmen auch Dienstleistungsunternehmen sowie Bundes- und Landesbehörden. Neben direkten werden nun auch indirekte Umwelteinwirkungen erfaßt. Dazu gehören zum Beispiel das (umweltgerechte) Design von Produkten, Urlaubsreiseangebote oder die Kreditvergabe. Ziel eines Öko-Audits ist die Festlegung und Umsetzung standortbezogener Umweltpolitik durch das Unternehmen, ihre systematische und objektive Beurteilung sowie die Gewinnung von Informationen für die Öffentlichkeit [13, S. 561].

### 2.2.3 Begriff Input-Output-Faktor

Unter Inputs versteht man die Gesamtheit aller Input-Ströme (Energien, Stoffe), welche in das betrachtete System hineinfließen. Umgekehrt sind die Outputs alle Output-Ströme, welche aus dem System hinausfließen.

Abb. 1 zeigte einige allgemeine Inputs und Outputs, welche im Rahmen der Sachbilanz erhoben werden können. Die folgende Tab. 2 differenziert die Inputs und Outputs hinsichtlich Industrie, Landwirtschaft und Dienstleistung sowie weiterhin Menschen, Tiere und Pflanzen. Die Auflistung ist jedoch nicht vollständig. Es sind theoretisch weitere Inputs und Outputs für Wirtschaft, Menschen, Tiere und Pflanzen möglich. Beispielsweise können Arzneimittel als Input für Tiere und Menschen aufgefaßt werden oder auch als industrieller Output. Analoges gilt etwa für Pflanzenschutzmittel. Es wird sich daher nur auf die engsten Stoff- und Energieströme beschränkt.

**Tab. 2:** Vereinfachte Übersicht erfaßbarer Inputs und Outputs und ihre Bedeutung für eine Ökobilanz

Industrie Landwirtschaft Dienstleistung	Menschen	Tiere	Pflanzen
<b>INPUT</b>			
Rohstoffe	Nahrung	Nahrung	Mineralien
Energie	Wasser	Wasser	Wasser
Wasser	Luft	Luft	Kohlendioxid
Luft	Boden	Boden	Boden
Boden	Licht	Licht	Licht
Transport Infrastruktur	Wärme	Wärme	Wärme
<b>OUTPUT</b>			
Produkte	Exkrememente	tierische Produkte	biologische Produkte
Emissionen	Leichen	Exkrememente	Abfälle und Überreste
Abfall	Ausatemluft	Kadaver	Sauerstoff
Energie	Abwärme	Ausatemluft	
Lärm		Methan	
Geruch		Abwärme	
Strahlung			

Für die Erstellung der Sachbilanz dominieren in der Regel die produktbezogenen Inputs und Outputs aufgrund ihrer Umweltrelevanz. Es zeigt sich aber hierbei auch eine wirtschaftliche Relevanz, welche sich in der Beschaffung (Rohstoffe, Wasser, Energie) oder Entsorgung (Abwasser, Emissionen) ausdrückt. Neben den produktbezogenen Größen können weitere hinzutreten, wenn sie ebenfalls von ökologischer (Beheizung von Ställen und Gewächshäusern), wirtschaftlicher (Futtermittelverbrauch) oder auch gesellschaftlicher Bedeutung (Verkehrstote) sind.

Nachfolgend wird eine kurze Beschreibung der wichtigsten Inputs und Outputs gegeben [14; 15; 71].

### Tiere und Pflanzen

Mit Tieren und Pflanzen sind hier näherungsweise nur solche Lebewesen gemeint, welche vom Menschen genutzt werden. Dazu gehören zum einen die Wirbeltiere (z. B. Rinder, Schweine, Hühner), zum anderen eine Reihe von Samenpflanzen (z. B. Getreide, Obstgewächse, Gemüse). Die aufgeführten Inputs für Menschen, Tiere und Pflanzen umfassen nur das Lebensnotwendige (z. B. Nahrung und Wasser). Bei Mensch und Tier kann die Nahrung fest oder flüssig sein. Sie benötigen ferner Wasser zum Trinken, Luft zum Atmen, Boden als Lebensraum, Licht zur Orientierung und Entwicklung sowie Wärme zum Leben. Als Outputs fallen Exkrememente sowie menschliche und tierische Leichen (Kadaver) an. Aufgrund des Stoffwechsel entstehen mit Kohlendioxid angereicherte Ausatemluft sowie Abwärme aus dem Körper. Bei Rindern kann beispielsweise aufgrund der Verdauung Methan entstehen, welches zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt.

Pflanzen benötigen zum Leben Mineralien, Wasser, Kohlendioxid und Licht. Mit Hilfe des Sonnenlichts und ihrem Chlorophyll stellen sie im Rahmen der Photosynthese aus

Kohlendioxid u. a. Kohlenhydrate für ihren Stoffwechsel her. Boden wird zur Wasser- und Mineralienaufnahme und als Lebensraum genutzt. Wärme dient zur Aufrechterhaltung des Stoffwechsels.

## **Rohstoffe**

Unter dem Begriff Rohstoffe werden industrielle Grundstoffe unterschiedlicher Herkunft zusammengefaßt. Fossile Rohstoffe sind pflanzlicher, tierischer oder mineralischer Herkunft und nicht erneuerbar, wie z. B. Erdöl, Braunkohle, Steinkohle, Metalle und Mineralien. Nachwachsende Rohstoffe sind unter anderem Holz, Kartoffeln und Raps. Ferner treten recycelbare Rohstoffe hinzu (Altpapier, Altglas, Altkunststoffe usw.). Wasser und Energieträger werden im Rahmen der Ökobilanz extra betrachtet.

Angaben zu Umwelteinwirkungen bei der Bereitstellung von Rohstoffen können aus generischen Datenbanken entnommen werden (z. B. den ÖKOINVENTAREN VON ENERGIESYSTEMEN [128]). Generische Daten sind für einen vergleichbaren industriellen Bereich gesammelte Mittelwerte, beispielsweise zum Energieverbrauch oder zu den Emissionen bei der Förderung und Verarbeitung von Erdöl.

## **Energie**

Energie wird im klassischen Sinne als die Fähigkeit eines physikalischen Systems verstanden, Arbeit zu verrichten. Von Bedeutung für die Sachbilanz sind vor allem die elektrische Energie (Strom) und die thermische Energie (Wärme). Daneben kann auch die mechanische Energie im Einzelfall von Bedeutung sein.

Es wird zwischen Primär- und Sekundärenergie unterschieden. Zur ersteren gehören die fossilen Energieträger sowie Wasser, Wind, Sonnenenergie und Erdwärme. Die Sekundärenergie wird durch Umwandlung von Primärenergieträgern gewonnen und umfaßt vor allem elektrische und thermische Energie.

Energie ist in aller Regel als Input (Verbrauch) aufgeführt, kann aber auch als Output (Gewinn) in einer Sachbilanz erscheinen. Der ökologische Aufwand für die Bereitstellung unterschiedlicher Energieträger kann über generische Daten berücksichtigt werden.

## **Wasser**

Wasser als Input stellt eine abiotisch erneuerbare Ressource dar. Hierzu gehören Grundwasser und Oberflächenwasser (Flüsse, Seen). Meerwasser wird in der Regel nicht bilanziert, da es zum einen vergleichsweise selten für technische Prozesse genutzt wird und zum anderen daran kein Mangel herrscht.

## **Luft**

Luftschadstoffe werden hauptsächlich von der Industrie, Haushalten sowie dem Straßenverkehr abgegeben. Sie breiten sich vor allem innerhalb einer 500 bis 2000 m hohen Luftschicht aus. Bei den anthropogenen Luftemissionen sind besonders Kohlenmonoxid, Stickoxide, NMVOC und Schwefeldioxid von Bedeutung [16, S. 32].

## **Boden**

Boden ist der oberste Bereich der Erdkruste. Er ist Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen. Boden bedeutet zugleich auch Fläche für Wirtschaft, Landwirtschaft, Infrastruktur, Siedlungen und Erholungsräume. Boden als Input bezieht sich auf Produktionsfläche. Diese ist in der Regel versiegelt, verhindert also den direkten Abfluß von Regen ins Grundwasser. Durch die Versiegelung wird entweder der ursprüngliche Lebensraum für Tiere und Pflanzen beeinträchtigt oder ganz zerstört.

## **Transport**

Transport bezieht sich auf die Beförderung von Sachgütern. Der Transport von Menschen und Informationen wird in Produktökobilanzen meist über generische Daten erfaßt. Für den Transport von Gütern werden vor allem Lastkraftwagen, Bahn, Schiff oder Flugzeug verwendet. Dementsprechend werden in dieser Rubrik die Emissionen der verschiedenen Beförderungsmittel aufgeführt.

## **Infrastruktur**

Unter Infrastruktur versteht man die Grundstruktur, die zur Versorgung und Aufrechterhaltung einer Gesellschaft, einer industriellen Produktion oder einer sonstigen Einrichtung erforderlich ist. Hierzu gehört zum Beispiel das Straßennetz, das Kommunikationsnetz, die Versorgungsleitungen für Strom, Gas und Wasser sowie Schulen und Krankenhäuser. Die Infrastruktur wird im allgemeinen nicht erfaßt, da sie vergleichsweise langlebig ist und sich auf eine Vielzahl von Produkten anteilig aufteilt.

## **Emissionen**

Emissionen umfassen im engeren Sinne die Abgabe von Stoffen in die Luft, in das Wasser und in den Boden. In dieser Arbeit wird der Begriff Emissionen im erweiterten Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetz gebraucht. Er bezeichnet die Abgabe von Stoffen sowie Lärm, Wärme oder Strahlen aus der Technosphäre in die Umwelt.

## **Abfall**

Abfallstoffe sind Rückstände, Nebenprodukte oder Altstoffe, welche bei Produktion, Konsum oder Energiegewinnung entstehen. Man unterscheidet

- Siedlungsabfälle
- Gewerbe- und Industrieabfälle
- Sonderabfälle
- landwirtschaftliche Abfälle

Sonderabfälle können besonders gesundheits-, luft-, wasser- oder bodengefährdend sein. Sie können ferner auch brennbar, explosiv oder auch infektiös sein.

Ökobilanzrelevante Angaben zu diversen Entsorgungsprozessen stehen als generische Daten zur Verfügung.

### **Lärm**

Lärm bezeichnet unerwünschte Geräusche, welche für Mensch und Tier gesundheitsschädlich sein können oder zumindest als unangenehm empfunden werden.

### **Geruch**

Der Mensch kann mit seinem Geruchssinn verschiedene Duftstoffe wahrnehmen. Besonders geruchsintensive Stoffe (wie Schwefelwasserstoff) werden schon in sehr geringen Konzentrationen wahrgenommen. Bei größeren Konzentrationen werden Gerüche als Belästigung empfunden.

### **Strahlung**

Unter Strahlung wird hier die Einwirkung ionisierender Strahlung auf Menschen, Tiere und Pflanzen zusammengefaßt.

## **2.3 Anwendungsmöglichkeiten**

Die Gründe für die Erstellung und Auswertung von Ökobilanzen variieren je nach Interessengruppe. Im wesentlichen lassen sich drei Gruppen ausmachen, welche aus Ökobilanzen einen unmittelbaren Nutzen ziehen können:

- Unternehmen
- Staat
- Verbraucher

Bei den Interessengruppen bestehen nicht nur Unterschiede in den jeweiligen finanziellen und materiellen Möglichkeiten. Auch die Ziele sind sehr unterschiedlich und sollen daher näher untersucht werden.

Die Entwicklung von Produkten beziehungsweise deren Optimierung unter ökologischen Gesichtspunkten ist für die Industrie einer der Hauptgründe für die Erstellung von Ökobilanzen [8, S. 19 ff.]. Es handelt sich hierbei nur vordergründig um ökologische Ziele, da hinter diesen auch ökonomische Gründe stehen. Beispielsweise bedeutet eine Senkung des Rohstoffverbrauchs oder der Abfallmenge durch optimierte Produktionstechniken auch eine Kostenreduzierung. Ein weiterer Grund ist die Möglichkeit, mit einem Produkt bei Umweltgruppen und Verbrauchern werben zu können, welches die Umwelt im Vergleich zu einem Konkurrenzprodukt weniger belastet. CORINO sieht in den daraus sich ergebenden Wettbewerbsvorteilen ferner Innovationsmöglichkeiten, welche zur *"Beschleunigung eines umweltfreundlichen technischen Fortschritts im Bereich der Güterherstellung führen"* werden [8, S. 24 f.]. In Deutschland werden Ökobilanzen in vielen Branchen eingesetzt, jedoch hauptsächlich für die Chemische Industrie sowie die Auto-

mobilindustrie, gefolgt von der Metallverarbeitenden Industrie sowie der Papier- und Druckindustrie [17].

Dem Staat bieten Ökobilanzen die Möglichkeit, durch die gewonnenen *"Informationen zur Rationalisierung der verschiedensten unmittelbar oder mittelbar umweltbezogenen Entscheidungen beizutragen"* [8, S. 29]. Dies gilt nicht nur für die nationalstaatliche Ebene, sondern ebenso für den regionalen wie europäischen Bereich. Über den standardisierten Vergleich von Produkten ist der Staat in der Lage, lenkend in die Wirtschaft eingreifen. Es könnten dann Produkte wegen ihrer Schädlichkeit verboten beziehungsweise mit Steuern belegt werden oder, im Gegensatz dazu, durch Umweltzeichen (z. B. Blauer Engel) ausgezeichnet und somit empfohlen werden [18]. Die Vergabe staatlicher Gelder für die Entwicklung von umweltfreundlichen Werkstoffen oder Technologien kann ebenfalls von den Ergebnissen einer Ökobilanz abhängig gemacht werden.

Verbrauchern sowie deren Organisationen können aufgrund von Ökobilanzen Kauf- oder Handlungsentscheidungen gegeben werden. Zudem wird dem einzelnen Verbraucher deutlich gezeigt, welche Umweltbelastungen durch ihn, das heißt durch den Gebrauch/Verbrauch des Produktes, entstehen. Vor diesem Hintergrund ist es daher nachvollziehbar, wenn DOLD sagt:

*"Jeder kann einen Nutzen aus einer Ökobilanz ziehen. Es kommt ganz darauf an, welche Erkenntnisinteressen er hat."* [19, S. 64]

## 2.4 Geschichte der Ökobilanz

Die Entwicklung von Ökobilanzen<sup>3</sup> ist nicht auf einen bestimmten Zeitpunkt zu fixieren, sondern zog sich über einen langen Zeitraum hin und verlief in den einzelnen beteiligten Industriestaaten unterschiedlich. Herrschte in der Anfangszeit noch eine nationale Orientierung vor, so wird gerade seit Beginn der neunziger Jahre ein globaler Standard entwickelt. Aus diesen Gründen können hier nur wichtige Ereignisse und Strömungen genannt werden, welche geeignet sind, einen Einblick in die Geschichte der Ökobilanzierung zu geben.

Gedanken zur Umweltbelastung von Produktionsverfahren sowie daraus resultierende Maßnahmen gab es bereits vor dem Instrumentarium Ökobilanzen. Erste deutsche Gesetzesvorschriften zur Reinhaltung der Umwelt sind etwa aus dem Mittelalter übermittelt [20]:

- Der Bayerische Landfrieden des 13. Jahrhunderts bestrafte das Abholzen von Baumgärten mit dem Abschlagen der Hand und stufte dieses Relikt sogar als Landfriedensbruch ein.
- In der Nürnberger Satzung zum Schutz des Fischbachs von 1302 stand geschrieben, daß niemand *"sinen unflat darin gisen"* soll, um die Wasserversorgung der Stadt sicherzustellen.

---

<sup>3</sup> Der Begriff Ökobilanz ist bei diesem geschichtlichen Rückblick eher allgemein als ökologische Betrachtung zu verstehen und nicht ausschließlich im engeren Sinne nach DIN/ISO.

- Im Kiel des 15. Jahrhunderts wurde Brunnenverunreinigung mit Tod durch Ertränken bestraft.
- Ebenfall in Nürnberg war das Schmelzen von schlechtem Schmalz und das Brennen von Töpfen in der Stadt wegen der auftretenden Geruchsbelästigung verboten (genaues Jahr nicht bekannt).

Der in unserer heutigen Zeit wieder modern gewordene Begriff der Nachhaltigkeit ist bereits Anfang des 18. Jahrhunderts im gleichen Sinne benutzt worden. So gibt es eine *"Anweisung zur Wilden Baum-Zucht"*, in der zu einer *"continuierlichen, beständigen und nachhaltigen Nutzung"* der Bäumebestände aufgerufen wird [21].

Freilich dauerte es bis zur systematischen Erfassung der bei einem Prozeß anfallenden Emissionen noch Jahrhunderte. Als ein wichtiger Schritt in Richtung Quantifizierung chemischer Umsetzungen kann das Gesetz von der Erhaltung der Masse angesehen werden, welches 1785 von LAVOISIER entdeckt wurde. Danach ist bei einer chemischen Reaktion die Masse der Edukte gleich der Masse der Produkte. Es kann also kein Produkt "verschwinden", auch wenn dieses mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar sein sollte. Zum anderen bedarf es immer auch einer bestimmten Menge an Ausgangsstoffen, um ein Endprodukt zu erzeugen.

Die Entwicklung von Methoden zur Ökobilanzierung begann erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit *"dem gestiegenen Bewußtsein über die Bedeutung des Umweltnutzens und möglicher Umweltauswirkungen [entspricht Umweltbelastungen, Anm. d. Autors], die mit Produktion und Anwendung von Produkten im Zusammenhang stehen"* [42, S. 2].

Die erste Ökobilanz wurde im Auftrag der COCA COLA COMPANY am MIDWEST RESEARCH INSTITUTE (MRI) 1969 durchgeführt. Verschiedene Getränkebehälter sollten mit dem Ziel verglichen werden, denjenigen zu finden, welcher die Umwelt am wenigsten belastet. Hierbei wurden der Material- und Energiebedarf und die entstehenden Emissionen und Abfälle untersucht [22, S. 7; 23, S. 2]. Die vollständige Studie wurde aus Vertraulichkeitsgründen nicht veröffentlicht. Getränkeverpackungen aus unterschiedlichen Materialien (vor allem Kunststoffe, Glas, Stahl, Aluminium) blieben auch in der Folgezeit beliebte Untersuchungsobjekte [24; 25].

In den siebziger Jahren begannen europäische Institute erstmals mit der Analyse der Stoff- und Energieströme von Verpackungsmaterialien. Es waren dies das BATTELLE-INSTITUT Frankfurt, die OPEN UNIVERSITY in England sowie die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in der Schweiz [26].

Anfang der siebziger Jahre begann auch die öffentliche ökologische Diskussion, welche durch die warnenden Zukunftsprognosen von MEADOWS [27] und die Ölkrise 1973 unterstützt wurde. Vermehrt rückte nun die Frage des Energieverbrauchs in die Betrachtungen, welche heutzutage noch eine der aussagekräftigsten Positionen innerhalb der Sachbilanz darstellt.

Ein großer Fortschritt war die Entwicklung eines Computerprogramms im Jahr 1973, das noch auf einem Lochkartenrechner lief. Bis dahin wurden die zahlreichen Rechenoperationen auf mechanischen Rechenmaschinen ausgeführt [28]. In den darauffolgenden Jahrzehnten machte die elektronische Datenverarbeitung große Fortschritte. Heutzutage stehen eine große Zahl an Programmen mit unterschiedlicher Leistungsfähigkeit zur Erstellung einer Ökobilanz zur Verfügung [29].

Ende der siebziger Jahre stellte MÜLLER-WENK seine Methode der ökologischen Buchhaltung zur Erstellung von Ökobilanzen vor. Sie war, wie KAIMER und SCHADE feststellen, eine der ersten in Europa [30; 31, S. 24]. MÜLLER-WENK übertrug das System der Sozialbilanzen auf den Umweltschutz im Betrieb. Die Ermittlung der Umweltbelastung erfolgt über Äquivalentkoeffizienten, welche die relative ökologische Knappheit einer Ressource oder die begrenzte Belastbarkeit eines ökologischen Mediums ausdrücken. Die Methode wurde später noch weiterentwickelt (siehe Abschnitt 2.8).

Aus der Vielzahl der bisher erstellten Ökobilanzen sollen hier beispielhaft drei kurz vorgestellt werden.

- Ein Vergleich von Joghurtbehältern (Polystyrol mit Aluminiumfolie gegen Glas) zeigte, daß zunehmend auch verbraucherrelevante Themen in den Blickpunkt der Betrachtung rückten (1979) [34]. Die Studie kam zu dem Ergebnis, daß beide Verpackungen hinsichtlich ihrer Umweltbelastungen gleichwertig sind, so daß für keine eine Empfehlung gegeben werden konnte.
- Die Ökobilanz von Packstoffen des schweizerischen BUNDESAMTS FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) von 1984 sowie 1990 hat ihre Bedeutung in der Erstellung einer Datenbank zur Umweltbelastung der wichtigsten Verpackungsmaterialien (Aluminium, Glas, Plastik, Papier und Pappe) [32; 33]. Die Daten sind zwar nur für die Schweiz gültig gewesen, jedoch sowohl von staatlicher als auch industrieller Seite geprüft und abgesichert [34]. Die Ökobilanz von 1990 ergab, daß der überwiegende Teil der atmosphärischen Emissionen auf die Energiebereitstellung entfällt. Wasserbelastungen entstehen vor allem während des Herstellungsprozesses. Transporte haben einen geringen Anteil an den Belastungen. Eine Ausnahme hierbei ist die Aluminiumherstellung, wo vermehrt Transporte anfallen. Es wurde sich generell für ein Recycling ausgesprochen. Dies sollte zudem für alle Packstoffe (Aluminium, Glas, Kunststoffe, Papier/Karton) weiter ausgebaut werden [32, S. 157 ff].
- Beim Vergleich einer Standardglühbirne mit einer Energiesparlampe wurde herausgefunden, daß 95 bis 99 % des gesamten Primärenergieverbrauchs während des Gebrauchs aufgewendet werden, während nur 1 bis 5 % in der Produktion anfallen (1994) [35]. Die normalen Glühbirnen verbrauchen während ihres Einsatzes fünf- bis achtmal mehr Energie als die Energiesparlampen, wobei jedoch die letzteren aufgrund ihres - wenn auch geringen - Quecksilbergehaltes schlechter zu entsorgen sind.

Es zeigte sich sehr schnell, daß die Aussage einer Ökobilanz nicht nur von den erhobenen Daten abhängt, sondern beispielsweise auch von dem Ziel der Studie, dem Untersuchungsrahmen oder der verwendeten Methode für die Wirkungsabschätzung. Daher war es unbedingt erforderlich, für die Erstellung einer Ökobilanz zu internationalen Standards zu kommen. Mit diesem Ziel begann Anfang der neunziger Jahre die SOCIETY

FOR ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC)<sup>4</sup>, welche wichtige Vorarbeiten für die später einsetzende Arbeit der ISO leistete. Seit 1990 fanden mehrere Kongresse statt, welche jeweils als Meilensteine in der Methodenentwicklung betrachtet werden können. So entstand etwa der (zumindest damals bedeutende) CODE OF PRACTICE im Rahmen des Sesimbra-Workshops 1993 in Portugal [9].

Eine wichtige Rolle für die Entwicklung der Methodik hatte ebenfalls das CENTER OF ENVIRONMENTAL SCIENCE (CENTRUM VOOR MILIEUKUNDE, CML) der LEIDEN UNIVERSITÄT in den Niederlanden. Im Jahre 1992 erschien eine neue Methode für die Wirkungsabschätzung [36], welche aufgrund der wissenschaftlich fundierten Basis als bedeutend für die weitere Entwicklung der Ökobilanzierung gesehen wird (Beispiel siehe Abschnitt 2.9.4.2) [37].

Das UMWELTBUNDESAMT (UBA) in Berlin veröffentlichte in den letzten Jahren eine Reihe von Publikationen zu Ökobilanzen. Diese umfassen allgemeinere Arbeiten zur Methodik [68] sowie Ökobilanzen, welche im Auftrag von anderen Instituten und auch unter Mitarbeit des UBA erstellt werden. Dazu gehören zum Beispiel die Bereiche Nachwachsende Rohstoffe [38], Chemierzeugnisse [39] oder Verpackungen [90].

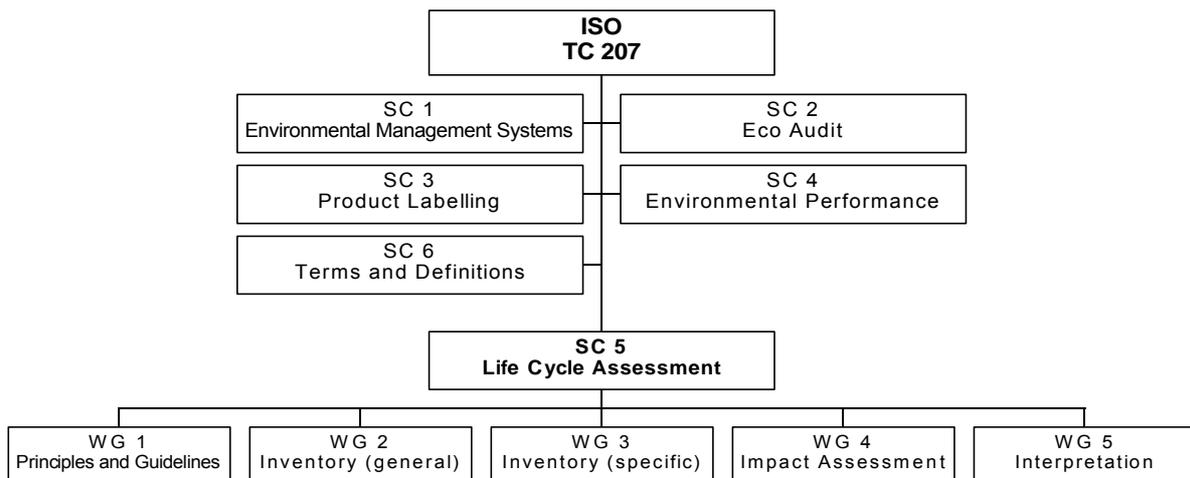
## 2.5 Erstellung einer Ökobilanz

### 2.5.1 Normung

Der Aufbau einer Ökobilanz, wie er im folgenden beschrieben wird, basiert auf den Arbeiten der ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). Die ISO wurde 1947 gegründet und ist die weltweite Vereinigung der nationalen Institute für Normung. Ihre Aufgabe ist es, die Standardisierung von Gütern und Dienstleistungen über die Ländergrenzen hinweg zu fördern, um den globalen Austausch von Produkten und Dienstleistungen zu erleichtern. Die Arbeit der ISO ist dezentralisiert und gliedert sich in mehr als 2.700 Technical Committees, Subcommittees and Working Groups. Alle Standardisierungen, welche die Umwelt betreffen (etwa Ökobilanz oder Öko-Audit), fallen unter den Aufgabenbereich des Technical Committee TC 207. Es gliedert sich wie folgt (Abb. 2) [nach 40]:

---

<sup>4</sup> Aufgaben der 1979 in den USA (1989 in Europa) gegründeten Gesellschaft sind die Erforschung ökologischer Probleme, der Umgang mit Ressourcen und Umwelterziehung. Eines der Themengebiete sind Ökobilanzen.



**Abb. 2:** Struktur des ISO TC 207

Für Ökobilanzen ist das Subcommittee (SC) 5 zuständig, welches sich wiederum in fünf Working Groups aufteilt: WG 1 erarbeitete mit dem DIN EN ISO Standard 14040 ein grundlegendes Basisdokument zu allgemeinen Prinzipien und Anforderungen, welches als Grundlage für die weiteren Arbeiten diente. Mit der Sachbilanz (Inventory Analysis) beschäftigten sich die WGs 2 und 3. Die Ergebnisse Ihrer Arbeit sind in DIN EN ISO 14041 dargestellt. Standards zur Wirkungsabschätzung (Impact Assessment) wurden von der WG 4 in der DIN EN ISO vorgestellt. WG 5 arbeitete an der Auswertung (Interpretation) der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung (DIN EN ISO 14043).

ISO Standards wie die 14040-Familie durchlaufen mehrere Stufen von der ersten Idee bis zur fertigen Norm. Ist der Bedarf an einem Standard vorhanden, wird eine Arbeitsgruppe (Working Group) eingerichtet, welche einen ersten Entwurf (Working Draft, WD) erstellt. Dieser wird im zuständigen Sub-Committee als Committee Draft (CD) beraten, verbessert und liegt nach Annahme durch das SC als Draft International Standard (DIS) vor. Der DIS wird daraufhin allen ISO-Mitgliedern vorgelegt. Findet er im SC eine Mehrheit, wird daraus der Final Draft International Standard (FDIS). Andernfalls muß er nochmals vom SC beraten werden. Der FDIS geht erneut allen Mitgliedern zur Ansicht zu. Eine letzte Abstimmung findet wieder im SC statt. Wird dieser mit Zweidrittelmehrheit angenommen, kann der FDIS als International Standard veröffentlicht werden.

Der Beginn der ISO-Aktivitäten für die Standardisierung von Ökobilanzen war 1993. Mittlerweile liegen alle 14040 bis 14043-Normen als Internationaler Standard vor.

Das DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) gründete im Rahmen seiner Normungsarbeit 1993 eine Arbeitsgruppe Produkt-Ökobilanzen im Normenausschuß Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS). Sie stellt das deutsche Spiegelbild zum SC 5 der ISO dar. Bisher wurden alle Normen ISO 14040-Reihe über das EUROPÄISCHE KOMITEE FÜR NORMUNG (CEN) übernommen.

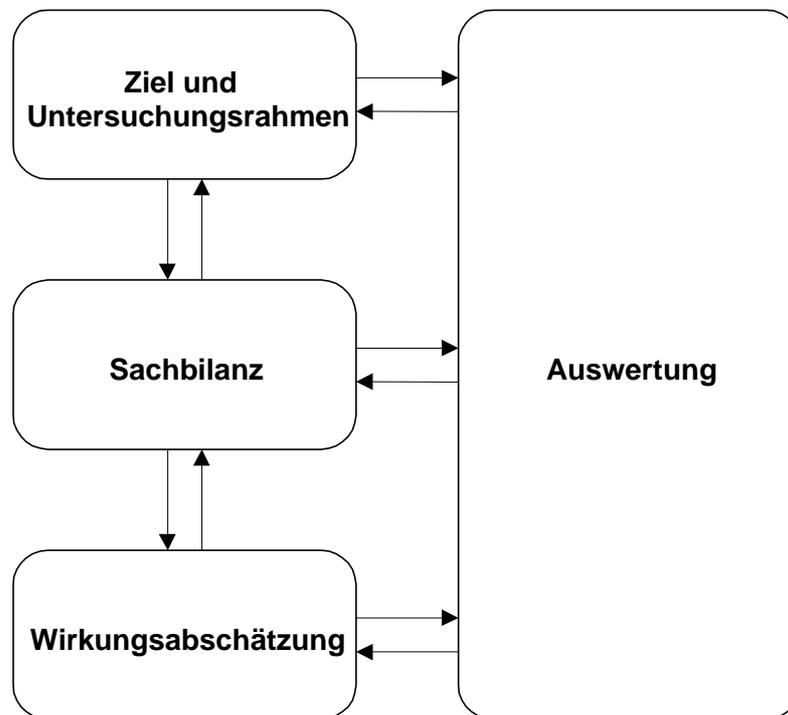
Eine grundlegende theoretische Einführung in die Methodik von Ökobilanzen gibt REINHARDT am Beispiel von Verpackungen [41].

## 2.5.2 Methodik

Basierend auf den Arbeiten der ISO wird der Ablauf zur Erstellung einer Ökobilanz beschrieben. Es sind vier aufeinanderfolgende und voneinander abhängige Stufen zu durchlaufen (Abb. 3) [nach 42, S. 6]:

1. Festlegen des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Erstellen einer Sachbilanz mit relevanten Inputs und Outputs
3. Beurteilung dieser Inputs und Outputs hinsichtlich ihrer potentiellen Umweltbelastungen im Rahmen der Wirkungsabschätzung
4. Auswertung der Ergebnisse aus Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Diese vier Stufen sind zudem auch "interaktiv" (Doppelpfeile in Abb. 3). Werden etwa bei der Erstellung der Wirkungsabschätzung erkannt, daß Daten fehlen, dann müssen die Sachbilanz überprüft und die Daten nachgetragen werden. Dies wird als iteratives, also wiederholendes Vorgehen bezeichnet, wobei die eine Stufe mit nun verbesserten Daten aus der Stufe davor nochmals durchlaufen wird.



**Abb. 3:** Aufbau einer Ökobilanz (nach DIN EN ISO 14040)

### 2.5.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Beschreibung des Bilanzierungsziels sowie der Untersuchungsrahmen sind Gegenstand der DIN EN ISO 14040 und 14041 [42; 43]. Es sind vor allem durchzuführen:

- Formulierung des Ziels der Ökobilanz
- Beschreibung des Untersuchungsrahmens
  - Produktsystem
  - Systemgrenzen
  - funktionelle Einheit
  - Datenqualität
  - Wirkungskategorien, Methode

Das Ziel der Ökobilanzstudie und die Systemgrenzen müssen eindeutig festgelegt sein. Unter dem Ziel faßt man die Gründe für die Ökobilanz sowie die Zielgruppe zusammen (Warum und für wen wird die Bilanz erstellt?).

Der Untersuchungsrahmen beschreibt unter anderem das Produktsystem, die funktionelle Einheit und die Datenqualität. Ferner sollten auch die Methode für die Wirkungsabschätzung sowie die zu erfassenden Wirkungskategorien genannt sein.

Die Systemgrenzen legen den zeitlichen, örtlichen und technischen Untersuchungsrahmen fest und bestimmen damit, wie das System bilanziert werden soll. Hierzu wird das System (genauer das Produktsystem) in Module unterteilt, welche als kleinste Einheit jeweils einen Einzelprozeß darstellen oder eine Gruppe von Prozessen umfassen. Dies erleichtert die Bestimmung der ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme, weil Module leichter zu überblicken sind. Die Module eines Systems können auf unterschiedliche Art miteinander verbunden sein, zum Beispiel über Zwischenprodukte oder Abfälle. Die Gesamtheit aller Module, welche über Stoff- und Energieflüsse miteinander verbunden sind, wird als Produktsystem bezeichnet. Die ausgewählten Module sollten in einem Systemfließbild dargestellt werden, in dem die Beziehungen untereinander deutlich werden.

Für die Auswertung der Datensammlung (im Sinne eines Vergleichs) ist es wichtig, eine gemeinsame Bezugsgröße für alle Input-Output-Daten zu haben. Dies ist die funktionelle Einheit. Sie ist ein *"Maß für den Nutzen des Produktsystems"* [42, S. 8].

Welche Inputs in den einzelnen ausgewählten Modulen erfaßt werden sollen, hängt von drei sogenannten Abschneidekriterien ab:

- Masse
- Energie
- Umweltrelevanz

Ist die Masse oder die Energie das Kriterium für die Auswahl der Daten, so müssen alle Inputs erfaßt werden, die zusammengezählt mehr als einen bestimmten Prozentsatz zum Masseninput beziehungsweise Energieinput des Systems ausmachen. Ist Umweltrelevanz das Entscheidungskriterium, so wird zunächst für jede Gruppe von Daten (z. B. Stickoxid- oder Kohlendioxid-Luftemissionen) ein Grenzwert definiert. Fällt dann eine Stickoxidbelastung in einem Modul höher als dieser Grenzwert aus, so muß diese in die Datensammlung aufgenommen werden. Die Kriterien können auch zur Bestimmung des Outputs genutzt werden.

Nicht nur die Zahl der erfaßten Daten ist entscheidend, sondern auch die Datenqualität. Diese wird durch drei Parameter bestimmt:

- zeitbezogener Erfassungsbereich
- geographischer Erfassungsbereich
- technologischer Erfassungsbereich

Bei der zeitbezogenen Erfassung wird festgelegt, wie alt die Daten sein dürfen und in welchem Zeitintervall die Erfassung erfolgt. Daneben muß der räumliche Horizont definiert werden, das heißt, in welchem geographischen Bereich (regional, national bis hin zu global) die Datenerfassung geschehen soll. Schließlich sollte auch die technische Qualität der Produktionsanlage mit einbezogen werden. Ausgangslage kann eine vor Ort existierende Anlage sein, oder es wird die beste beziehungsweise schlechteste verfügbare Technologie angenommen. Solche Daten können beispielsweise selbst ermittelt, aus Datenbanken übernommen oder einfach geschätzt sein.

### 2.5.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz ist der zweite Schritt in einer Ökobilanz. Entsprechend der Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen werden die Input-Output-Daten erhoben, gesammelt und zusammengefaßt. Diese Daten dienen als Grundlage der Wirkungsabschätzung, mit der erst die eigentliche Beurteilung der Umweltbelastungen erfolgt.

Für die Erhebung der Daten empfiehlt es sich, den Vorgang möglichst transparent und übersichtlich zu gestalten. Fließbilder des Systems und der Module erhöhen die Übersichtlichkeit. Zudem gilt es, Fehlermöglichkeiten (Lücken, Doppelzählungen) auszuschalten. Dazu bedarf es eines umfassenden Überblicks, um die einzelne Messung innerhalb eines Moduls in den System-Zusammenhang einzuordnen.

Dem Zusammentragen der Daten folgt eine Datenvalidierung. Die Summen der in das Modul/System hineingehenden Massen und Energiemengen müssen theoretisch gleich denen sein, die hinausgehen. Praktisch werden aber beispielsweise Luft-Sauerstoff oder als Dampf entweichendes Wasser oft nicht angegeben, so daß hier tatsächlich Defizite auftreten können. Dennoch werden auf diese Weise grobe Lücken sichtbar und fehlende Daten können nachgetragen werden.

Daraufhin können die Ergebnisse aus den Modulen verknüpft werden, um eine Aussage für das gesamte System zu ermöglichen. Die Normierung erfolgt auf der Basis der funktionellen Einheit. Probleme treten dann auf, wenn in einem System nicht nur ein Produkt entsteht, sondern mehrere, oder wenn ein Zwischenprodukt aus einem Modul in einem anderen als Input weiterverarbeitet wird. Dies dürfte in umfangreicheren Produktsystemen die Regel sein (z. B. Erdölverarbeitung, Recycling). In solchen Fällen wird versucht, die beteiligten Stoff- und Energieflüsse den jeweiligen Produkten so zuzuordnen, daß die ihnen zugrundeliegenden quantitativen oder ökonomischen Beziehungen widerspiegelt werden. Dies wird als Allokation (Zuteilung, Umlage) bezeichnet.

Bevor die Daten weiter für die Wirkungsabschätzung verwendet werden, folgt eine kurze Auswertung. Diese geschieht im Sinne der anfangs beschriebenen ersten Phase (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens), welche im Gegenzug auch auf ihre Tauglichkeit hin überprüft wird. Weitere Punkte sind eine Beurteilung der Datenqualität und eine abschließende Sensitivitätsanalyse wesentlicher Input-Output-Daten. Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, zu untersuchen, wie sehr das Endergebnis auf die

Variation eines Einflusses reagiert, um sicherzugehen, alle signifikanten Abschnitte des Lebensweges erfaßt zu haben. Ein solcher variiertes Einfluß kann zum Beispiel ein alternativ verwendeter Rohstoff oder ein geänderter Lebenswegabschnitt sein.

Eine Sensitivitätsanalyse ist dann notwendig, wenn die Ökobilanz-Studie dazu dienen soll, eine vergleichende Aussage über die betrachteten Produkte/Verfahren öffentlich darzustellen. Hier dient sie also zur Überprüfung der Aussage. Eine Sensitivitätsanalyse ist auch dann angebracht, wenn ein Streamlining (Vereinfachung) durchgeführt wurde, um Zeit und Kosten bei der Erstellung der Ökobilanz zu sparen. Das kann beispielsweise dadurch geschehen, daß als irrelevant eingeschätzte Teile des Lebensweges abgeschnitten und deren Daten also somit nicht erfaßt werden. Kann die Zahl der zu erfassenden Daten reduziert werden, ohne dabei die Gesamtaussage zu verändern, wird dadurch die Erhebung nicht nur vereinfacht, sondern auch kostengünstiger gearbeitet [44].

### 2.5.2.3 Wirkungsabschätzung

Der dritte Schritt einer Ökobilanz ist die Wirkungsabschätzung. Auf der Basis der in der Sachbilanz ermittelten Stoff- und Energieflüsse werden - in der Regel mit Computerunterstützung - ausgewählte potentielle Umweltbelastungen bestimmt. Eine Sachbilanz alleine reicht nicht aus, weil deren Ergebnisse oftmals zu komplex sind und daher eine Interpretation nur schwer möglich ist. Es ist nicht immer auf den ersten Blick ersichtlich, welche ökologischen Auswirkungen einzelne Inputs/Outputs haben und wie deren Anteil an der gesamten Umweltbelastung des Produktes ist. Die Wirkungsabschätzung ist die *"einzige Schnittstelle der Ökobilanz zur Umwelt"* [45].

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung erfolgt nach DIN EN ISO 14042 mehrstufig [46]. Verbindliche Bestandteile sind:

- Auswahl der Wirkungskategorien
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung)
- Berechnung der Wirkungskategorien (Charakterisierung)

Optional sind diese Elemente:

- Berechnen der Verhältnisse der Wirkungskategorie-Ergebnisse zu bestimmten Bezugsdaten (Normierung)
- Einordnung und eventuelle Rangbildung (Ordnung)
- Umwandlung und eventuelle Zusammenfassung der Indikatorergebnisse über Wirkungskategorien hinweg unter Verwendung numerischer Faktoren, welche auf (subjektiven) Werthaltungen beruhen (Gewichtung)

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung ist von sogenannten Charakterisierungsmodellen die Rede, welche die Sachbilanzergebnisse und die Wirkungskategorien zueinander in Beziehung setzen. Diese beschreiben einen *"Umweltwirkungsmechanismus"* [46, S. 8]. Darunter ist die Beziehung zwischen dem Sachbilanzergebnis und dem Wirkungsendpunkt in der Natur zu verstehen. Beispielsweise wirken Schwefeldioxidemissionen in Gewässern sowie Böden sauer. Die Emission wird somit der Wirkungskategorie Versauerung zugeordnet.

Charakterisierungsmodelle bilden die theoretische Grundlage für die Methodik der Wirkungsabschätzung. Im Laufe der Entstehungsgeschichte der Ökobilanz entstanden eine Vielzahl von Methoden für die Durchführung der Wirkungsabschätzung (Übersicht geben HOFSTETTER/BRAUNSCHWEIG [47], BÖHLER/KOTTMANN [48], POWELL ET AL. [49] und GIEGRICH et al. [73]). Sie werden gelegentlich, wenn auch ungenau, einfach als Bewertungsmethoden bezeichnet. Die Methoden zur Wirkungsabschätzung können danach unterschieden werden, auf welche Art die Umweltbelastungen bestimmt werden, zum Beispiel

- auf der Basis von Grenzwerten
- auf der Grundlage von Kosten (zur Vermeidung bestimmter Umweltschäden)
- auf der Basis der Einschätzung von Experten

Eine Darstellung der gängigen Methoden zur Wirkungsabschätzung wäre an dieser Stelle zu umfangreich. Statt dessen sollen die Vor- und Nachteile der Methode der Umweltbelastungspunkte gezeigt werden. Diese wird später noch ausführlich behandelt (siehe Abschnitt 2.8).

Die Methode der Umweltbelastungspunkte beruht auf gesetzlichen beziehungsweise politischen Grenzwerten für die jährliche Belastung der Umwelt mit Schadstoffen sowie für den Verbrauch von Energie. Zur Ermittlung der Umweltbelastung wird der Grenzwert eines Schadstoffs in Beziehung gesetzt zur realen Gesamtbelastung (distance-to-target-Ansatz). Da die Methode ursprünglich aus der Schweiz stammt, wurden etwa das Schweizer Luftreinhaltekonzept oder die Verordnung zur Abwassereinleitung (EinleitVO) herangezogen [70]. Dies ist von Nachteil, da sich die verwendeten Gesetze und Daten zur Umweltbelastung ursprünglich auf die Schweiz beziehen und somit auf andere Länder gar nicht oder nur bedingt übertragbar sind. Als weiterer Nachteil erweist sich die Festlegung der Grenzwerte, welche mehr auf politischen Vorgaben als auf wissenschaftlichen Notwendigkeiten beruhen kann [49; 50]. Große Vorteile der Methode sind ihre Transparenz und Praktikabilität. Es ist kein Hintergrundwissen zu Umweltchemie oder Ökotoxikologie notwendig. Alle grundlegenden Parameter, wie Grenzwerte und aktuelle Belastungen, sind bekannt. Schließlich ist die Methode sehr praktikabel, weil die Berechnungen einfach durchzuführen sind.

Die Wirkungskategorien stehen als repräsentative Stellvertreter für die Vielzahl möglicher Umweltbelastungen. Da eine hundertprozentige Ermittlung aller Umweltbelastungen nicht möglich ist, wird daher mit den Wirkungskategorien versucht, ein möglichst breites Spektrum relevanter Belastungen abzudecken. Neben diesem naturwissenschaftlichen Hintergrund haben die Wirkungskategorien auch eine rechtliche Dimension. Sie können von Grundrechten des Menschen abgeleitet werden [51]. Hierzu zählen das herausragende Recht auf Leben, auf dem wiederum andere, beispielsweise das Recht auf eine gesunde Umwelt, basieren.

Im wesentlichen stehen folgende Wirkungskategorien zur Verfügung, wobei ihre Zahl je nach methodischer Ausrichtung schwanken kann [52]:

Inputbezogene Wirkungskategorien:

- Verbrauch abiotischer Ressourcen
- Verbrauch biotischer Ressourcen
- Verbrauch an Boden (Naturraumbeanspruchung)

Outputbezogene Wirkungskategorien:

- Eutrophierung
- Geruch
- Humantoxizität
- Lärm
- Ökotoxizität
- Ozonabbau
- Photooxidantien (Sommersmog)
- Radioaktive Strahlung
- Treibhauseffekt
- Unfälle
- Versauerung

Auf eine Aufspaltung der Wirkungskategorien nach globaler, kontinentaler, regionaler und lokaler Wirkung wurde hier verzichtet, da eine eindeutige Zuordnung nicht in jedem Fall getroffen werden kann (z. B. Versauerung oder human- sowie ökotoxikologische Einwirkungen).

OWENS weist auf die Grenzen der Wirkungsabschätzung hin, welche seines Erachtens in der Ungenauigkeit der Wirkungskategorien liegt. So fehlen der räumliche und zeitliche Bezug sowie die Berücksichtigung von Dosis-Wirkungsbeziehungen oder Grenzwerten [53].

Im Rahmen der Klassifizierung werden die Sachbilanzergebnisse den ausgewählten Wirkungskategorien zugeordnet. Anschaulich kann diese Stufe als ein Sieb dargestellt werden, welches Daten mit bestimmten ökologischen Wirkungen zurückhält und auch zusätzlich danach sortiert. Hierbei gilt es nach DIN EN ISO 14042 zum einen jene Input-Output-Daten zu berücksichtigen, welche ausschließlich einer Wirkungskategorie zugeordnet werden (z. B. Kohlendioxid zu Treibhauseffekt); zum anderen sind solche Input-Output-Daten besonders einzustufen, welche mehreren Wirkungskategorien zuzuordnen sind, beispielsweise Schwefeldioxid (Humantoxizität, Versauerung) und Stickoxide (Photooxidantien, Versauerung).

Im nächsten Schritt der Charakterisierung werden die einzelnen Input-Output-Daten der Sachbilanz innerhalb einer Wirkungskategorie mit stoffspezifischen Charakterisierungsfaktoren gewichtet. Die Zwischenergebnisse werden daraufhin zu einem numerischen Wirkungs(kategorie)-Indikatorergebnis aufaddiert.

Die Abschnitte Normierung, Ordnung und Gewichtung sind optional und somit nicht festgeschrieben.

Das Ziel einer Normierung ist es, Informationen über die absolute Bedeutung des Indikatorergebnisses zu bekommen. Beispielsweise könnte das ermittelte Ergebnis für die Versauerung in einem Produktionsbereich durch die Gesamtheit der sauerwirkenden Emissionen für das betroffene Gebiet dividiert werden. Auf diese Weise erhält man ein Maß für die Bedeutung des einzelnen Ergebnisses und kann daraus Handlungsbedarf ableiten.

Bei einer Ordnung werden Wirkungskategorien in Klassen eingeteilt (z. B. nach den räumlichen Maßstäben global, regional oder lokal). Es kann auch eine Rangbildung auf der Basis unterschiedlicher Priorität hinzukommen (hohe, mittlere oder niedrige Priorität). Die Ordnung beruht wie die Gewichtung auf subjektiven "*Werthaltungen*".

Bei einer Gewichtung werden die Wirkungskategorien untereinander mit Hilfe von numerischen Faktoren gewichtet, welche nicht auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen. Hieraus wird deutlich, daß eine objektive Beurteilung nicht möglich ist. Die Ergebnisse der Wirkungskategorien können gegebenenfalls auch zusammengefaßt werden (wie zum Beispiel bei der Methode der Umweltbelastungspunkte). Zwar ist die Wirkungsabschätzung insgesamt ein wissenschaftlich standardisiertes Verfahren, jedoch basiert die Klassifizierung weniger auf naturwissenschaftlichen, sondern mehr auf politischen, sozialen oder ethischen Vorgaben [54]. Die Beteiligung eines Expertengremiums wird daher empfohlen [55].

Der Wirkungsabschätzung können sich verschiedene statistische Verfahren zur Analyse der Datenqualität anschließen, zum Beispiel eine Schwerpunktanalyse, eine Fehlerabschätzung oder Sensitivitätsanalyse (die beiden letzteren nach DIN EN ISO 14041 [43]). Die Analyse der Datenqualität sowie eine Signifikanzanalyse sind Pflicht bei vergleichenden Aussagen, welche der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Ökobilanzen, deren Ergebnisse für vergleichende Aussagen über die bilanzierten Produkte herangezogen werden, müssen sich einer kritischen Prüfung unterziehen [42, S. 12]. Die Prüfung bezieht sich auf alle Phasen der Ökobilanz. Sie soll sicherstellen, daß die Ökobilanz der internationalen Norm sowie dem wissenschaftlichen und methodischen Stand entspricht. Weiterhin ist zu prüfen, ob die Datenerhebung sowie die Auswertung den Vorgaben der ersten Phase (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens) entspricht. Eine kritische Prüfung kann von internen oder externen Sachverständigen durchgeführt werden. Der interne Sachverständige sollte nicht an der Erstellung der Ökobilanz-Studie beteiligt gewesen sein. Das Gutachten eines externen Sachverständigen ist bei Veröffentlichung der Studie erforderlich. Soll die Veröffentlichung auch noch vergleichende Aussagen über die bilanzierten Produkte beinhalten, so ist vom Sachverständigen ein Prüfungsausschuß einzuberufen. Dieser kann gegebenenfalls weitere interessierte Kreise hinzuziehen (beispielsweise Regierung oder nichtstaatliche Organisationen).

#### **2.5.2.4 Auswertung**

Auswertung (Interpretation) ist der letzte und abschließende Schritt der Ökobilanz. In DIN EN ISO 14043 wird diese Phase folgendermaßen definiert:

*"Die Auswertung ist ein systematisches Verfahren zur Identifizierung, Charakterisierung, Überprüfung und Beurteilung von Informationen aus den Ergebnissen einer Sachbilanz und/oder eines Produktsystems und zur Darstellung dieser Informationen."* [56, S.3]

Ziel ist es somit, die aus den bereits erhaltenen mehr oder weniger abstrakten, mathematischen Resultaten konkrete Handlungsanweisungen zu erhalten. SAUR fügt jedoch hinzu:

*"The real aim of this step is to provide reliability and a meaning to the LCA study performed." [57]*

Die Auswertung besteht aus drei Teilen:

1. Identifizierung der signifikanten Parameter
2. Beurteilung durch Einsatz von Vollständigkeits-, Sensitivitäts- oder Konsistenzprüfung
3. Schlußfolgerungen, Empfehlungen, Bericht

Für die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung muß deren Signifikanz bestimmt werden. Signifikante Größen können zum Beispiel der Energieverbrauch (Sachbilanz), das Versauerungspotential (Wirkungsindikator) oder auffällig große Beiträge bestimmter Lebensabschnitte sein.

Ziel der Beurteilung ist eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Ökobilanz-Studie. Aus diesem Grund werden verschiedene Verfahren eingesetzt, um Fehler und Datenqualität abzuschätzen. Eine Vollständigkeitsprüfung soll sicherstellen, daß alle relevanten Informationen zur Verfügung stehen. Über eine Sensitivitätsprüfung kann ermittelt werden, wie sehr Unsicherheiten in den signifikanten Parametern die bereits gezogenen Schlußfolgerungen beeinflussen. Durch eine Konsistenzprüfung kann die Konsistenz der Ökobilanz-Studie herausgearbeitet werden. Hierbei wird untersucht, ob die Daten der Sachbilanz und Methoden der Wirkungsabschätzung mit den Angaben der ersten Phase der Ökobilanz (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmen) übereinstimmen.

Abschließend können aus den Ergebnissen der vorliegenden Auswertung Schlußfolgerungen gezogen und Empfehlungen ausgesprochen werden, welche den Auftraggebern der Ökobilanz-Studie in einem Bericht mitgeteilt werden.

## **2.6 Der Kumulierte Energieaufwand (KEA)**

### **2.6.1 Grundlagen**

Mit Hilfe des Kumulierten Energieaufwands (KEA) ist es möglich, ein Produkt (oder Dienstleistung) unter dem primärenergetischen Aspekt zu beurteilen. Analog dem Lebenswegansatz in Produktökobilanzen kann auch der KEA über den ganzen Lebensweg bestimmt werden. In der VDI-Richtlinie 4600, welche die Grundlage zur Berechnung des KEA bildet, heißt es dazu:

*Der KEA ist definiert als die "Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann." [58, S. 4]*

Die Höhe des KEA gibt einen ersten Anhaltspunkt über unter anderem die mit dem Prozeß verbundenen Materialaufwendungen, Wahl der Prozeßtechnik und die Bedeutung der Nutzungsdauer [58, S. 2]. Der KEA ist somit Ausdruck des Verbrauchs natürlicher Ressourcen (Erdgas, Erdöl, Uran, Braun- und Steinkohle). Aufgrund seiner Aussagekraft wird der KEA daher heute nahezu standardmäßig in Produktökobilanzen eingesetzt.

In dieser Arbeit wird der KEA benutzt, um verschiedene Energiesysteme zumindest hinsichtlich des energetischen Aspektes miteinander vergleichen zu können. Dies hat sich als notwendig herausgestellt, da beispielsweise im schulischen Experiment und in der Industrie verschiedene Energieträger benutzt werden. Um hierbei die Angaben zum Energieverbrauch miteinander in Beziehung setzen zu können, müssen die energetischen Aufwendungen zur Bereitstellung eben dieser Energieform berücksichtigt werden.<sup>5</sup> Dieser "ökologische Rucksack" ist bei Strom - bedingt durch die Umwandlungsverluste und den Eigenbedarf - um ein Vielfaches höher als bei den Primärenergieträgern Steinkohle, Braunkohle oder Erdgas.

Eine bis ins Detail festgeschriebene Berechnungsweise für den KEA ist in VDI 4600 nicht angegeben. Hier wird der KEA nach der in GEMIS verwendeten Methode berechnet. GEMIS steht für GLOBALES EMISSIONS-MODELL INTEGRIERTER SYSTEME. Die elektronische Datenbank GEMIS des ÖKO-INSTITUTES Freiburg umfaßt Grunddaten zur Bereitstellung von Energieträgern (Prozeßketten- und Brennstoffdaten) sowie verschiedener Technologien zur Bereitstellung von Wärme und Strom<sup>6</sup>.

Für die Berechnung des KEA wurde GEMIS 4.0 verwendet. Es wird angenommen, daß *"ausschließlich die Energieanteile mitbilanziert werden, die sich direkt aus dem energetisch genutzten Energieinhalt von Brennstoffen bzw. Primärenergien ergeben"* [59, S. 7]. Nichtenergetisch (stofflich) genutzte Energieträger werden daher nicht über ihre Heizwerte berücksichtigt, wie es ursprünglich in der VDI-Richtlinie 4600 vorgesehen ist. Das bedeutet also, daß etwa Erdöl für Kunststoffe oder Holz für Möbel nicht erfaßt wird. Absicht ist es hierbei, die Phasen Nutzung und Entsorgung im Produktlebensweg nicht zu berücksichtigen, da *"bei einer Vielzahl von Produkten aus verschiedenen Zeithorizonten sehr verschiedene Entsorgungspfade möglich sind, welche sich über die Zeit ändern"* [59, S. 7]. Somit werden auch deponierte Reststoffe oder energetisch genutzte Abfälle nicht in die Berechnung aufgenommen.

Weiterhin werden folgende Annahmen zum Lebensweg getroffen:

- Bauvorleistungen zum Bau der betrachteten Anlagen sowie Stoffe und Energien zu deren Betrieb werden berücksichtigt.
- Nichtstationäre Transporte (Lkw, Zug, Schiff) sind mit einbezogen.

---

<sup>5</sup> Im Rahmen der Methodik der Umweltbelastungspunkte, welche in dieser Arbeit für die Wirkungsabschätzung verwendet wird, wird der Verbrauch an Primärenergie erfaßt [70, S. 31]. Um den Verbrauch von Sekundärenergieträgern berücksichtigen zu können, wird an der Stelle der Hinweis gegeben, die Ökofaktoren für z. B. Strom *"anhand der konkreten Wirkungsgrade auf die Primärenergieträger zurückzurechnen"*.

<sup>6</sup> GEMIS kann kostenlos über die Homepage des Öko-Institutes heruntergeladen werden (<http://www.oeko.de>).

- Für Prozesse der Energiegewinnung wird eine Ausnutzung der Ressourcen von 100 % angenommen, zum Beispiel für die Förderung von Kohle und Erdgas oder für den Anbau sowie die Verwertung von Biomasse.
- Eine Gutschrift für die energetische Nutzung von Abfällen gibt es nicht.

Nicht Bestandteil des KEA sind standardmäßig (nach VDI 4600) menschliche Arbeit, metabolische Energie (Nährwert von Lebensmitteln) und Umweltenergie (natürliche Beleuchtung). Ferner werden ebenfalls Luft, Wasser und Boden (Flächenbedarf) nicht bilanziert.

## 2.6.2 Vergleich verschiedener Energiesysteme

Mit Hilfe des KEA ist ein Vergleich unterschiedlicher Energiesysteme auf Sachbilanzebene möglich. Daher wurde auf der Basis der oben vorgestellten Annahmen der KEA für verschiedene Energieträger berechnet (Tab. 3). Da der Vergleich nur aus der Sicht des primärenergetischen Aufwandes erfolgt, bleiben andere Input-Output-Faktoren unberücksichtigt (z. B. Flächenverbrauch, Emissionen).

Es zeigt sich im Ergebnis, daß der KEA in der Summe für die betrachteten Energieträger von etwa 1 bis 3 MJ/MJ reicht, das heißt, die Gewinnung von Strom erfordert einen nahezu dreimal höheren Primärenergieaufwand, als es für die Bereitstellung der Primärenergieträger (Kohle, Holz, Erdgas) und der Sekundärenergieträger (schweres und extra-leichtes Heizöl) der Fall ist. Der KEA für die Gewinnung von Dampf liegt rund 10 % über dem für die Herstellung des Heizöls.

**Tab. 3:** Angaben zum KEA für verschiedene Energieträger (GEMIS 4.0)

Energieträger	KEA [MJ/MJ Energieträger]
Braunkohle	1,033
Steinkohle	1,042
Holz (Hackschnitzel)	1,056
Flüssiggas (Propan)	1,118
Heizöl EL	1,118
Erdgas	1,125
Heizöl S	1,163
Dampf (Chemische Industrie)	1,357
Strom	2,899

### Annahmen für die Berechnung

Die Energiesysteme repräsentieren jeweils einen für Deutschland üblichen Durchschnitt und gelten in der Regel nicht für eine bestimmte Industriebranche. Beispielsweise wird für die Herstellung von Strom ein durchschnittlicher deutscher Kraftwerksmix angesetzt. Eine Ausnahme bildet die Dampfgewinnung, welche exemplarisch für die chemische Industrie

ausgewählt wurde, da aufgrund des besonderen Nahbezugs eine Zuordnung zu einer Branche vorgenommen werden mußte.

Für Braunkohle wird ein Szenario zum Abbau rheinischer Kohle im Tagebau angenommen (GEMIS-Prozeß "Xtra-Tagebau-Braunkohle-D-rheinisch"). Als Lebensdauer des Kraftwerks werden 25 Jahre und ein Nutzungsgrad von 100 % angesetzt. Die Kohle wird auch zur Herstellung von Briketts verwendet. Die Energie zur Förderung der Braunkohle stammt aus einem Rohbraunkohle-Kraftwerk.

Die Steinkohle wird unter Tage im Tiefbau gewonnen (GEMIS-Prozeß "Xtra-Tiefbau-Steinkohle-D-Vollwert"). Es handelt sich um in Deutschland abgebaute Vollwertkohle für Kraftwerke. Die Energie liefert ein Ballaststeinkohlekraftwerk. Die Lebensdauer des Kraftwerks beträgt auch hier 25 Jahre und der Nutzungsgrad 100 %.

Zur Herstellung grober Holzhackschnitzel wird Restholz eingesetzt (GEMIS-Prozeß "Fabrik-Holz-HS-D-grob"). Eine aktive Trocknung erfolgt nicht. Hackschnitzel werden zum Beispiel im Heizwerk oder zur Vergasung eingesetzt. Die Lebensdauer der Fabrik beträgt 20 Jahre (Nutzungsgrad 99 %).

Für die Herstellung von Propan (Flüssiggas) wird eine deutsche Raffinerie für Ölprodukte angesetzt (GEMIS-Prozeß "Raffinerie-Flüssiggas"). Sie hat eine Leistung von 2000 MW und eine angenommene Lebensdauer von 20 Jahren. Der Nutzungsgrad der Raffinerie beträgt 99,5 %. Input ist Rohöl aus unterschiedlichen Quellen, welches über Pipelines befördert wird.

Das in der Bundesrepublik Deutschland verwendete Erdgas stammt aus der deutschen Onshore-Förderung (18 %) und aus anderen Ländern (GUS 32 %, Norwegen 30 % und Niederlanden 20 %) (GEMIS-Prozeß "Gas-Mix-D").

Das zur Herstellung von schwerem und extraleichtem Heizöl verwendete Rohöl wird vor allem importiert (GEMIS-Prozeß "Raffinerie-Öl-schwer bzw. leicht-D"). 56 % des deutschen Rohöls stammen aus der OPEC, 25 % aus der GUS und 17 % aus anderen EU-Staaten. Für die deutsche Raffinerie wird eine Lebensdauer von 20 Jahren und ein Nutzungsgrad von 99,5 % veranschlagt. Die elektrische Energie wird dem deutschen Hochspannungsnetz entnommen.

Der Dampf entstammt deutschen Steinkohle- und Erdgaskraftwerken (Kraft-Wärme-Kopplung) (GEMIS-Prozeß "Wärme-Prozeß-Mix-D-Chemische Industrie"). Hierbei liefern die Erdgaskraftwerke ein Drittel und die Steinkohlekraftwerke ca. zwei Drittel der benötigten Wärmemenge. Die Wärme wird als Dampf entnommen und den Verbrauchern zugeleitet (Verluste sind nicht enthalten). Als Lebensdauer der Kraftwerke werden 20 Jahre und ein Nutzungsgrad 93 % angenommen.

Strom wird durch verschiedene Kraftwerke bereitgestellt (GEMIS-Prozeß "EL-KW-Park-D"). Hierbei stellen Kernkraft-, Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke etwa jeweils ein Viertel der benötigten Strommenge. Die Annahmen gelten für Deutschland im Jahr 2000 (Zahlen sind gerundet).

Kernkraft	28,1 %
Steinkohle	27,5 %
Braunkohle	26 %
Erdgas	9,5 %
Wasser	3,5 %
Müll	2,8 %
Wind	1,1 %
Heizöl S	1 %
Holz	0,5 %

Um nun die unterschiedlichen Energieträger direkt miteinander vergleichen zu können, wird auf die in Tab. 3 dargestellten KEA-Angaben zurückgegriffen.

Beispiel:

Prozeß A verbraucht 10 MJ Braunkohle, Prozeß B benötigt 10 MJ elektrischer Energie zur Produktion eines qualitativ und quantitativ (Einheit 1 kg) vergleichbaren Produktes. Um nun den primärenergetischen Vergleich der Prozesse zu ermöglichen, ist der jeweilige Energieverbrauch mit dem entsprechenden KEA für die Bereitstellung des eingesetzten Energieträgers zu multiplizieren. Das Ergebnis ist der gesamte KEA für den betrachteten Prozeß (wobei hier im Beispiel nur der Energieeinsatz berücksichtigt wird und nicht etwa der Transport oder Bauvorleistungen).

**Tab. 4:** Beispiel zum Vergleich verschiedener Energieträger auf der Basis des KEA

Prozeß	Verbrauch Energieträger	KEA [MJ/MJ Energieträger]	KEA [MJ/kg Produkt]
A	10 MJ Braunkohle	1,033	10
B	10 MJ elektrischer Strom	2,899	29

Das einfache Beispiel zeigt, daß zwar der zunächst angegebene Verbrauch verschiedener Energieträger gleich sein kann, jedoch dann durch Berücksichtigung des KEA unterschiedlich ausfällt, da der gesamte primärenergetische Aufwand für die Bereitstellung der betrachteten Energieträger miterfaßt wird.

## 2.7 Grenzen von Ökobilanzen

Ökobilanzen sind prinzipiell ein Instrumentarium von hoher Leistungsfähigkeit zur Ermittlung der Umweltbelastungen. Dennoch ist die Aussagefähigkeit begrenzt [42, S. 3].

- Die Festlegung der Systemgrenzen sowie die Wahl der Datenquellen und der Wirkungskategorien können subjektiv geprägt sein.
- Sachbilanz und Wirkungsabschätzung beruhen auf Modellen, welche die Wirklichkeit nur eingeschränkt wiedergeben (gilt für alle Modelle).
- Die Genauigkeit der Aussage einer Ökobilanz beruht auf dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial. Dessen Qualität hängt davon ab, ob zum Beispiel relevante Daten zur Verfügung stehen, ob Lücken in den Daten vorhanden sind oder ob die Daten aggregiert (das heißt zusammengefaßt) sind.

Eine Untersuchung von FINNVEDEN zeigte die Mängel in der Datenqualität. Es wurden Ökobilanz-Datenbanken unter anderem zur Produktion von Polyvinylchlorid ausgewertet. Als Ergebnis zeigte sich, daß die Bandbreiten für einige Sachbilanzpositionen äußerst stark schwanken können. Der Minimumwert wurde gleich eins gesetzt (Tab. 5) [60]. Beispielsweise lag die Angabe über die Freisetzung von Dioxinen um den Faktor 1700 auseinander, für den Energieverbrauch jedoch nur bei 1,5.

**Tab. 5:** Bandbreite verschiedener Sachbilanz-Positionen (Auswahl)

Sachbilanz-Position	Minimum	Maximum
Energie	1	1,5
Elektrizität	1	1,7
Natriumchlorid	1	1,8
Kohlendioxid	1	2,4
Stickoxide (Emission in die Luft)	1	6,3
Wasser	1	10
Schwefeldioxid	1	11
Metalle (Emission in die Luft)	1	71
Stickstoff (Emission ins Wasser)	1	310
CSB	1	1300
Dioxine (Emission ins Wasser)	1	1720

Als Ursachen für die Schwankungen wurden von FINNVEDEN identifiziert (jeweils mit Beispiel):

- Datenlücken (relevante Prozesse werden nicht berücksichtigt)
- Fehler bei der Datenerhebung (ein Parameter "Summe Metalle als Luftemission" enthält nur ausgewählte Metalle)
- technologische Unterschiede (Produktion von Chlor nach unterschiedlichen Verfahren)

Da das Datenmaterial eine zentrale Rolle innerhalb einer Ökobilanz spielt, soll im folgenden weiter gezeigt werden, welche Fehler bei der Erhebung von Daten auftreten können.

Zur allgemeinen Beschreibung der Datenqualität werden zunächst drei grundlegende Gütekriterien herangezogen:

- Objektivität
- Reliabilität
- Validität

Objektivität drückt aus, daß unter gleichen Bedingungen eine andere Gruppe von Fachleuten auch annähernd zu den gleichen Daten und somit zu den gleichen Aussagen kommen sollte. Dies erfordert eine offen dargelegte und möglichst standardisierte Vorgehensweise.

Reliabilität bezieht sich auf die Wiederholbarkeit der Erhebung. Wird die Sachbilanz unter gleichen Bedingungen von den selben Fachleuten nochmals erstellt, so sollten sich die gleichen Daten ergeben.

Validität bezeichnet die Übereinstimmung der Daten mit dem tatsächlichen Sachverhalt. So müssen die ermittelten Daten die Stoff- und Energieflüsse des Lebensweges richtig widerspiegeln und sollten nicht ein verzerrtes oder falsches Bild liefern. Dazu haben die Daten auf den relevanten Abläufen zu beruhen und nicht auf relativ unwichtigen Nebenwegen.

Bei der Gewinnung von Daten können systematische und zufällige Fehler entstehen. Systematische Fehler treten dann auf, wenn zum Beispiel ein Meßgerät zu Beginn der Messung falsch geeicht oder das Ablesen der Meßskala stets falsch durchgeführt wurde. Zu den zufälligen Fehlern gehören beispielsweise mechanische Mängel des Meßgerätes sowie spontane Schwankungen der Umgebungsbedingungen. Fehler haben primär nicht nur Einfluß auf die Aussage der Ökobilanz. Darüber hinaus wirken sie sich auch auf die Akzeptanz und Anerkennung von Ökobilanzen aus, weil dadurch deren Glaubwürdigkeit herabgesetzt wird [61].

Neben dem Problem der mangelnden Datenqualität hat auch die allgemeine Vorgehensweise der Erstellung von Ökobilanzen Einfluß auf die Daten und somit das Ergebnis. Von großer Bedeutung sind die Zieldefinition und die Wahl der Systemgrenzen, welche genau festlegen, was in welchem Ausmaß zu erfassen ist. Unklare Zielvorstellungen sowie zu eng oder zu weit gesteckte Systemgrenzen führen zu falschen Aussagen. Als Beispiel soll eine Fabrikhalle mit allen Produktionsanlagen bilanziert werden. Es wäre falsch, sich ohne nähere Prüfung des Sachverhalts auf nur einen Produktionsprozeß zu beschränken. Eine

solche Näherung wäre dann zulässig, wenn dieser eine Prozeß den Hauptanteil aller Umwelteinwirkungen ausmachen würde.

Daneben kann die Ermittlung der eigentlichen Input-Output-Daten Schwierigkeiten bereiten. Die Abgabe von Kohlendioxid aus einem Verbrennungsprozeß kann aus der Menge des verbrannten Materials ermittelt werden. Schwieriger und somit ungenauer ist die Bestimmung der Schwermetallbelastung durch eine Müllverbrennungsanlage, da diese von mehreren Parametern abhängt (z. B. Einsatzmaterial, Meßverfahren) [62, S. 57].

Um die Zahl der Fehler zu reduzieren oder gar ganz zu vermeiden, empfiehlt sich ein Peer Review. Es bezeichnet die Überprüfung der Ökobilanz durch unbeteiligte Fachleute. Dies hat nach SETAC im Laufe der Erstellung mehrmals zu geschehen. Unmittelbar zu Beginn werden die festgelegten Ziele und der Untersuchungsrahmen überprüft. Daraufhin wird der Prozeß der Datensammlung begleitet, wobei auch Ratschläge eingeholt und auch Kritik geübt werden kann. Am Schluß erfolgt eine Bewertung der Studie, insbesondere zur Wahl der Methodik oder zur Aggregation der Daten und den letztlich daraus gezogenen Schlußfolgerungen. Der abschließende Rückblick ist aber in der Praxis die Regel [9, S. 49 ff.; 63].

Ferner gibt es Möglichkeiten, die (eventuell mangelnde) Qualität der Daten zu bewerten beziehungsweise mit mathematisch-statistischen Methoden zu handhaben [64; 65]. Solche Maßnahmen führen zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse und langfristig zur Erhöhung der Glaubwürdigkeit [61; 66].

Trotz der Möglichkeiten von Ökobilanzen sollten keine übertriebenen Erwartungen an Ökobilanzen gestellt werden. *"Sie ermöglichen keine Entscheidungen per Knopfdruck"* [67] und *"können auch keine politischen Entscheidungen ersetzen"*, denn *"gesellschaftliches Konsumverhalten oder die Gestaltung der Produkte ist nur mittelbar zu beeinflussen"* [68, S. 15].

Aufgrund der Vielzahl an Fehlermöglichkeiten, Annahmen und Unwägbarkeiten gibt es auch Gegner von Ökobilanzen. Nach ARNOLD kann eine Ökobilanz generell nicht funktionieren:

*"The main problem is that it is impossible, practically speaking, to identify and measure all of the indirect sources of environmental problems for a given product or process."* [69]

Trotz der offensichtlichen Probleme gibt es auch optimistische Stimmen:

*"And even though problems do exist, the process of thinking through ways to make do with incomplete methodology and data can itself be a valuable learning exercise."* [66]

## 2.8 Die Methode der Umweltbelastungspunkte

### 2.8.1 Geschichte

Die Wurzeln der Methode der Umweltbelastungspunkte liegen in der Methode der ökologischen Buchhaltung, welche 1978 von MÜLLER-WENK vorgestellt wurde [30]. Er hatte das System der Sozialbilanzen für den betrieblichen Umweltschutz mit dem Ziel übernommen,

die Umweltbelastungen eines Unternehmens zu erfassen. Eine Sozialbilanz weist Kosten und Nutzen der wirtschaftlichen Tätigkeit des Unternehmens für den gesellschaftlichen Bereich aus und umfaßt zum Beispiel kulturelle Aktivitäten, Spenden oder Umweltschutz. MÜLLER-WENK übertrug dazu die heutzutage unter der Bezeichnung Inputs und Outputs bezeichneten Stoff- und Energieströme des Unternehmens in sogenannte Kontenklassen (beispielsweise Abfälle, Abwasser sowie Verbrauch an Material und Energie). Um einen Vergleich dieser Ströme mit ihren unterschiedlichen Einheiten zu ermöglichen, werden sie auf einen "gemeinsamen Nenner" gebracht. Das geschieht durch Multiplikation der jeweils ermittelten Stoffmenge mit einem Faktor (Äquivalenzkoeffizient). Das Ergebnis wird in Rechnungseinheiten beschrieben, welche in ihrer Summe die gesamte Umweltbelastung des Unternehmens darstellen.

Basierend auf dem Prinzip der ökologischen Buchhaltung entstand als Weiterentwicklung die Methode der Umweltbelastungspunkte. Sie ist auch unter den Bezeichnungen Methode der ökologischen Knappheit oder Stoffflußmethode bekannt und wurde ebenfalls von MÜLLER-WENK in Zusammenarbeit mit AHBE und BRAUNSCHWEIG entwickelt [70]. Die Methode wurde 1990 vorgestellt. Eine Überarbeitung (Berechnung weiterer Ökofaktoren) erfolgte 1993 und 1997 [71; 72].

Zunächst seien einige grundlegende Begriffe erklärt:

*"Unter der ökologischen Belastung verstehen wir das Verhältnis zwischen der beschränkten Belastbarkeit der natürlichen Umwelt und dem Ausmass der von der menschlichen Zivilisation ausgehenden Einwirkungen auf diese Umwelt.*

*Anders gesagt: Ökologische Knappheit ist gleich der Relation zwischen Belastbarkeit einer Umweltressource und der heutigen Belastung." [70, S. 6]*

Es gibt somit eine Grenzbelastung (kritischer Fluß) und eine momentane Belastung (Ist-Fluß). Der kritische Fluß ist die *"Menge einer Einwirkung, welche für das betroffene Element der natürlichen Umwelt gerade noch erträglich ist, d.h. nicht zu einer unzulässigen Zustandsverschlechterung führt"*. Den kritischen Flüssen liegen gesetzliche oder (umwelt)politische Vorgaben zugrunde. Der Ist-Fluß ist das *"tatsächliche Total aller Einwirkungen der betroffenen Einwirkungsart im gegebenen räumlichen Bereich"* [71, S. 45 f.].

Je höher der Ist-Fluß eines Schadstoffs im Vergleich zu seinem kritischen Fluß ist, desto größer ist demnach die ökologische Knappheit. Ist-Fluß und kritischer Fluß werden in einer Berechnungsformel zueinander in Beziehung gesetzt. Das Ergebnis ist ein Ökofaktor, der als *"Gradmesser"* der ökologischen Knappheit dient. Anders ausgedrückt: *"Er ist ein Mass für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung"* [72, S. 19]. Es werden also keine tatsächlichen, sondern nur potentielle Schäden beurteilt.

### 2.8.2 Ermittlung der Ökofaktoren

Für die Berechnung des Ökofaktors wird *"aufgrund der begrenzten Kenntnisse ökotoxischer Zusammenhänge"* in einem ersten Schritt davon ausgegangen, daß sich der Ökofaktor linear zur Nutzung einer Umweltressource verhält [70]. Unter Nutzung soll hier zum Beispiel das Einleiten eines Schadstoffs x in ein Gewässer verstanden werden. Die Nutzung wird durch das Verhältnis von Ist-Fluß F zum kritischen Fluß F<sub>k</sub> ausgedrückt.

Erfolgt keine Nutzung der Ressource, so ist der Ökofaktor gleich null. Mit steigender Nutzung wächst auch der Ökofaktor. Sind F und F<sub>k</sub> gleich groß, dann bedeutet dies eine

volle Ausschöpfung der Ressource. Wird  $F$  größer als  $F_k$ , kommt es zu einer Überbeanspruchung der Ressource. Durch den Quotient  $F/F_k$  erfolgt also eine Gewichtung (welche Bedeutung hat die tatsächliche Nutzung der Ressource im Vergleich zur kritischen Nutzung?).

Hieraus ergibt sich für einen beliebigen Stoff  $x$ :

$$\text{Ökofaktor}_{\text{Stoff } x} \sim \frac{F_{\text{Stoff } x}}{F_k_{\text{Stoff } x}}$$

Die weiteren Überlegungen werden anhand der Umwelteinwirkung von zwei Schadstoffen (z. B. Sulfat- und Phosphatmissionen in Wasser) gezeigt. Beide Schadstoffe belasten die Ressource Wasser in gleichem Maße (ausgedrückt durch das Verhältnis  $F/F_k$ ). Allerdings soll der Grenzwert für Phosphat in diesem Beispiel halb so hoch liegen wie für Sulfat. Phosphat ist also umweltgefährdender als Sulfat. Somit gilt:

$$F/F_k_{\text{Sulfat}} = F/F_k_{\text{Phosphat}}$$

$$F_k_{\text{Phosphat}} = 0,5 F_k_{\text{Sulfat}}$$

Der Ökofaktor für Phosphat müßte also größer sein als für Sulfat. Dieser Umstand kann dadurch berücksichtigt werden, daß bei der Berechnung des Ökofaktors die betrachtete Wasseremission (Sulfat, Phosphat) zusätzlich an ihrem Grenzwert  $F_k$  normiert wird. Es wird der Kehrwert von  $F_k$ , also  $1/F_k$ , in der Berechnung des Ökofaktors berücksichtigt.

$$\text{Ökofaktor}_{\text{Stoff } x} \sim \frac{1}{F_k_{\text{Stoff } x}}$$

Für die Berechnung des Ökofaktors eines Stoffes  $x$  sind somit zusammenfassend zwei Faktoren zu berücksichtigen: Erstens die Gewichtung  $F/F_k$  und zweitens die Normierung  $1/F_k$ . Daraus ergibt sich:

$$\text{Ökofaktor}_{\text{Stoff } x} \sim \frac{1}{F_k_{\text{Stoff } x}} \times \frac{F_{\text{Stoff } x}}{F_k_{\text{Stoff } x}}$$

Es stellt sich nun die Frage nach der physikalischen Einheit des Ökofaktors. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden hierfür sogenannte Umweltbelastungspunkte (UBP) eingeführt. Die Dimension des Ökofaktors ist 1 UBP dividiert durch die physikalische Einheit des Flusses [nach 72, S. 19]. Ferner wird eine dimensionslose Konstante  $c$  zur Vermeidung hoher negativer Potenzen eingeführt.

Zusammenfassend wird der Ökofaktor eines Stoffes  $x$  daher wie folgt berechnet:

$$\text{Ökofaktor}_{\text{Stoff } x} = \frac{1}{F_k_{\text{Stoff } x}} \times \frac{F_{\text{Stoff } x}}{F_k_{\text{Stoff } x}} \times c$$

Ökofaktor	Maß für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung [z. B. UBP/kg]
$F_k$	Kritischer Fluß [z. B. kg/a]
$F$	Ist-Fluß [z. B. kg/a]
$c$	$10^{12}/a$ -Konstante

Der kritische Fluß  $F_k$  sowie der Ist-Fluß  $F$  beziehen sich in der Regel auf ein Jahr. Es ist aber dennoch zulässig, bei dem Vergleich von Umwelteinwirkungen, welche nicht für ein Jahr angegeben sind, die Ökofaktoren als zeitlich unabhängige Multiplikationsfaktoren anzuwenden. Dabei muß jedoch jeweils der gleiche Zeitraum für die Umwelteinwirkung angesetzt werden.

Als Beispiel soll der Ökofaktor für Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) berechnet werden. Als Grundlage für die Berechnung dient zum einen die Belastung der Schweiz aus dem Jahr 1995 in Höhe von 136.000 t/a (Ist-Fluß  $F$ ), zum anderen der Grenzwert von 45.000 t/a (kritischer Fluß  $F_k$ ).

$F_k$ : 45.000 t/a;  $F$ : 136.000 t/a

$$\begin{aligned} \text{Ökofaktor (NO}_x\text{)} &= \frac{1}{45.000 \text{ t/a}} \times \frac{136.000 \text{ t/a}}{45.000 \text{ t/a}} \times 10^{12} / \text{a} \\ &\Rightarrow 67 \text{ UBP/g} \end{aligned}$$

Der Ökofaktor für Stickoxide beträgt auf der Grundlage der obengenannten Annahmen (Ist-Belastung und Grenzwert der Schweiz) 67 UBP/g.

Eine Auswahl von Ökofaktoren findet sich in Tab. 8.

### 2.8.3 Berechnung der Umweltbelastung

In der Praxis ist es zur Ermittlung der Umweltbelastung erforderlich, die Gesamtheit aller in einem Fall vorliegenden Daten von Umwelteinwirkungen (Emissionen und Energieverbräuchen) zu ordnen. Beispielsweise wird eine Stickoxidemission der Gruppe der Luftemissionen zugeordnet (Klassifizierung).

Folgende Gruppen von Umwelteinwirkungen werden betrachtet:

- Bodenverbrauch
- Deponieraumverbrauch
- Energieverbrauch
- Lärmemissionen
- Luftemissionen
- Wasseremissionen

Im nächsten Schritt wird die Umweltbelastung auf Basis der zugeordneten Emission errechnet (Charakterisierung). Hierzu wird die Umwelteinwirkung mit ihrem entsprechenden Ökofaktor multipliziert. Man erhält einen Zahlenwert (Umweltbelastungskennzahl) mit der Einheit Umweltbelastungspunkte<sup>7</sup>. Je höher die Zahl der UBP, desto stärker ist auch die Umweltbelastung.

---

<sup>7</sup> Ein früherer Ausdruck für UBP ist Ökopunkte, welcher aber geändert wurde, weil er nicht die für die Umwelt negative Belastung ausdrückt.

Mit Hilfe des Ökofaktors kann jetzt die Umweltbelastung ermittelt werden. Für die Berechnung der Umweltbelastung wird die Umwelteinwirkung mit ihrem Ökofaktor multipliziert. Das Ergebnis ist die *"Umweltbelastungskennzahl"* als Ausdruck der Umweltbelastung [73, S. 30]. Die Einheit sind Umweltbelastungspunkte (UBP).

$$\text{Umweltbelastungskennzahl} = \text{Ökofaktor} \times \text{Umwelteinwirkung}$$

Umweltbelastungskennzahl    Maß für die Umweltbelastung [UBP]

Ökofaktor    Maß für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung [z. B. UBP/kg]

Umwelteinwirkung    Sachbilanzposition [z. B. kg]

Die Berechnung der Umweltbelastung sei an dem oben ausgewählten Beispiel für  $\text{NO}_x$  verdeutlicht. Der Ökofaktor für  $\text{NO}_x$  beträgt 67 UBP/g. Es soll weiter von einer fiktiven Belastung von 5 kg  $\text{NO}_x$  aus einem beliebigen Produktionsprozeß ausgegangen werden.

$$\begin{aligned} \text{Umweltbelastung (Beispiel)} &= 67 \text{ UBP/g} \times 5.000 \text{ g} \\ &= 335.000 \text{ UBP} \end{aligned}$$

Die Umweltbelastung durch die Stickoxide aus diesem Prozeß beträgt somit 335.500 UBP. Ein solches Ergebnis kann nur im Vergleich zu anderen Umweltbelastungsergebnissen nach der UBP-Methode interpretiert werden (unter Berücksichtigung des Bilanzierungsziels und des Untersuchungsrahmens).

Ein Nachteil der Methode der Umweltbelastungspunkte liegt darin, daß durch die Aggregation der Umweltbelastungskennzahlen die einzelnen verantwortlichen Umwelteinwirkungen nicht mehr beachtet werden. *"Wenn man über Ökopunkte redet, gehen schnell die Informationen, die sich dahinter verbergen, verloren"* [73, S. 38]. Hinzu kommt, daß anthropogene Einwirkungen auf die biotische Umgebung (Mensch, Tier, Pflanze) nicht erfaßt werden, da sich alle errechneten Ökofaktoren nur auf die abiotische Umwelt beziehen. Wechselwirkungen der freigesetzten Schadstoffe bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

Die Methode bietet jedoch eine Reihe von Vorteilen, welche ihre Überschaubarkeit und Praktikabilität ausmachen:

- Durch die generelle Möglichkeit der Aufsummierung unterschiedlicher Umweltbelastungen kann die Gesamtbelastung eines Prozesses oder eines Produktes anschaulich dargestellt werden.
- Der Vorgang der Berechnung ist dabei einfach und nachvollziehbar gehalten.
- Die Zahl der Ökofaktoren ist auf ein Mindestmaß an ausgewählten Umwelteinwirkungen beschränkt.
- Die Ökofaktoren können variiert werden, um so ihren Einfluß auf das berechnete Ergebnis aufzuzeigen.

### 2.8.4 Bestimmung der kritischen Flüsse

Während die Ermittlung des Ist-Flusses relativ leicht durch analytische Messungen möglich ist, stellt die Bestimmung des kritischen Flusses ein größeres Problem dar.

*"Manche hätten hierzu gerne eine objektive wissenschaftliche Antwort. Diese objektive Antwort kann es jedoch nicht geben. [...] Grenzwerte und Grenzfrachten [...] sind in jedem Fall das Ergebnis einer Interaktion wissenschaftlicher Erkenntnis mit sozialer Wertsetzung."* [71, S. 50 f.]

Es wurde vorgeschlagen, kritische Flüsse von Umwelteinwirkungen wie folgt zu bestimmen [71, S. 51 f.]:

1. auf der Grundlage von rechtskräftigen gesetzlichen Normen oder völkerrechtlich verbindlichen Verpflichten. (Wenn diese fehlen ...)
2. auf der Basis von Festlegungen mit Konsenscharakter, zum Beispiel politischen Absichtserklärungen von Parlamenten. (Sollten diese nicht vorhanden sein ...)
3. aus den Aussagen anerkannter wissenschaftlicher Gremien oder Fachleute

Konkret heißt es, daß *"kritische Flüsse idealerweise so festgelegt sein sollen, daß das Überschreiten dieses Sollwerts um 1 % auf allen Gebieten [...] zu gleichermaßen unerwünschten Zuständen führt"* [71, S. 51].

### 2.8.5 Wirtschaftlicher Vergleich von Schweiz und Deutschland

Die Ökofaktoren repräsentieren die als relevant eingestufteten Umweltbelastungen [71, S. 34 ff.]. Diese wurden bislang vor allem für das Gebiet der Schweiz berechnet. In dieser Arbeit wurden die Schweizer Ökofaktoren verwendet, unter der Annahme, daß die wirtschaftlichen Verhältnisse für die Schweiz und Deutschland unter dem Blickpunkt des Bruttosozialproduktes (BSP) annähernd vergleichbar sind. Dann könnten die kritischen sowie die Ist-Flüsse, welche in die Berechnung der Ökofaktoren einfließen, näherungsweise auch auf Deutschland angewendet werden.

Die Tab. 6 zeigt einen Vergleich beider Länder hinsichtlich des absoluten und relativen Bruttosozialproduktes (Stand 1997) [74, S. 163 u. 691]. Das relative BSP ist einmal auf die jeweilige Fläche des Landes, zum anderen auf die Einwohnerzahl bezogen. Zwar sind das BSP, die Landesfläche und die Einwohnerzahl der Schweiz geringer als die von Deutschland, doch fällt das relative BSP pro Fläche und Einwohner für die Schweiz höher aus. Der Anteil des Industrie-Sektors neben Landwirtschaft und Dienstleistungsbereich ist bei beiden Ländern annähernd gleich hoch.

Setzt man voraus, daß ein relativ gleicher Industrieanteil am gesamten erwirtschafteten BSP auch zu einem ebenso relativ gleichen Schadstoffausstoß führt, so kann geschlußfolgert werden, daß in der Schweiz pro Fläche und Einwohner eine höhere Schadstoffmenge als in Deutschland abgegeben wird. Nimmt man ferner an, daß die schweizer Umweltpolitik hinsichtlich ihrer festgelegten Grenzwerte, welche für die Bestimmung der kritischen Flüsse herangezogen werden, mit Deutschland vergleichbar ist, so sind die kritischen sowie die Ist-Flüsse und letztlich auch die Ökofaktoren näherungsweise auf Deutschland anwendbar.

**Tab. 6:** Vergleich der Schweiz und Deutschland hinsichtlich Industrieanteil, Bruttosozialprodukt (BSP), Fläche und Einwohnerzahl (Stand 1997)

Land	Industrieanteil [%]	BSP [Mio \$]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Einwohner [in 1000]	BSP/Fläche [Mio \$/km <sup>2</sup> ]	BSP/Einwohner [Mio \$/1000 Einwohner]
Schweiz	34	305.238	41.285	7.088	7,4	43,1
Deutschland	33	2.320.985	357.021	82.071	6,5	28,3

### 2.8.6 Übersicht Ökofaktoren

Die Umweltbelastungen werden in sechs Kategorien eingeteilt. Der Begriff der Kategorien wurde in dieser Arbeit gewählt, um sich gegenüber dem Begriff Wirkungskategorien abzugrenzen, welche die Umweltbelastungen vor allem als Auswirkungen auf die Umwelt erfassen (z. B. Ozonabbau, Treibhauseffekt). Innerhalb der Methode der Umweltbelastungspunkte wird ein anderer Ansatz verfolgt. Da es nach Ansicht von BRAUNSCHWEIG und MÜLLER-WENK *"nicht in Frage kommt, Ökobilanzen aufzustellen, welche die Umwelteinwirkungen [...] vollständig darstellen"*. Als Begründung wird angeführt, daß das *"System 'natürliche Umwelt' zu komplex ist und die heute den Menschen zur Verfügung stehenden Einwirkungsmöglichkeiten zu vielfältig sind, als dass man alle vorstellbaren Einwirkungen auf die einzelnen Teile der natürlichen Umwelt auch nur aufzählen könnte"* [71, S. 34 ff.]. Folgende Vereinfachungen hinsichtlich der Erfassung der Umwelteinwirkungen werden daher in der Methode der Umweltbelastungspunkte vorgenommen:

1. Beschränkung auf die nichtbelebte Umwelt
2. Beschränkung auf relevante Umwelteinwirkungen
3. Zusammenfassung gleichartiger Umwelteinwirkungen

Der Bereich der nichtbelebten Umwelt - welcher hier als Zielort der Umwelteinwirkungen angesehen wird - umfaßt die Kompartimente Luft, Wasser und Boden. Pflanzen und Tiere als Teil der belebten Umwelt werden nicht betrachtet. Durch die Beschränkung auf die unbelebte Umwelt vermeidet man komplizierte ökotoxische Betrachtungen (Expositionsanalyse). Es wird davon ausgegangen, daß Pflanzen und Tiere (über) leben können, wenn Luft, Wasser und Boden eine bestimmte Qualität aufweisen. Der Verbrauch von Energie ist ebenfalls eine Umwelteinwirkung, da hierdurch *"implizit ausgedrückt wird, dass die Verfügbarkeit energetischer Ressourcen für das Leben der Spezies Mensch [...] als lebensnotwendig erachtet wird"*. Als Hauptursache von Lärm werden die Verkehrsmittel Auto, Flugzeug und Eisenbahn gesehen, deren *"quasipermanente Lärmteppiche von erheblicher Ausdehnung einer relevanten Veränderung von Lebensräumen gleichkommen"* [71].

Unrelevante Umwelteinwirkungen sind solche, welche in der Umwelt zu einer unbedeutenden Veränderung führen würden. Beispielsweise wäre das einmalige Einleiten einer größeren Menge von Natriumchlorid (Kochsalz) in den Bodensee vermutlich ökologisch lokal von Bedeutung, während jedoch ein Quecksilberzufluß in den See und Teile des Rheins ungleich (zeitlich und räumlich) dramatischere Auswirkungen hätte.

Somit ist die Emission von Quecksilber in Wasser umweltrelevanter als die von Kochsalz. Daher ist auch der Ökofaktor von Quecksilber sehr viel höher als der von Chlorid.

Gleichartige Umwelteinwirkungen stellen zum Beispiel die Gruppe der Kohlenwasserstoffe ohne Methan dar, welche als NMVOC erfaßt werden.

Zum besseren Verständnis sollen an dieser Stelle die Begriffe für die verschiedenen Gruppen der Umwelteinwirkungen den unterschiedlichen Kategorien an Umweltbelastungen gegenüber gestellt werden (Tab. 7). Begriffe für die unterschiedlichen Kategorien an Umweltbelastungen wurden in dieser Arbeit neu eingeführt, um eine klare Trennung zwischen Sachbilanz-Ergebnis (Umwelteinwirkungen) und Ergebnis der Wirkungsabschätzung (Umweltbelastung) zu ermöglichen.

**Tab. 7:** Vergleich der Begriffe für Umwelteinwirkungen und Umweltbelastungen

Gruppe Umwelteinwirkung	Kategorie Umweltbelastung
Bodenverbrauch	Fläche
Deponieraumverbrauch	Abfall
Energieverbrauch bzw. -gewinn	Energie
Lärmemissionen	Lärm
Luftemissionen	Luftbelastung
Wasseremissionen	Wasserbelastung

Auf eine detaillierte Beschreibung, wie die einzelnen Ökofaktoren errechnet wurden, wird an dieser Stelle - abgesehen von kurzen Erläuterungen - verzichtet und auf die jeweils aufgeführte Literatur verwiesen.

Für diese Arbeit wurden aus der mittlerweile relativ großen Zahl an Ökofaktoren diejenigen ausgewählt, welche einen Querschnitt verschiedener Umwelteinwirkungen darstellen. Sie sind in Tab. 8 zusammengefaßt. Eine Gesamtliste aller Ökofaktoren findet sich in Anhang 3.

Der Bodenverbrauch wird über die "*Versiegelungsknappheit*" ausgedrückt, da "*die Bodenversiegelung ein permanenter Druck auf die Ökosphäre darstellt*" [71, S. 147]. Unter Bodenversiegelung wird die "*Flächenwirkung*" (Bodenbedeckung) verstanden und nicht die "*Zerschneidungswirkung*" (Zerschneidung eines Gebietes). Die Versiegelung betrifft sowohl Bauzonen als auch Flächen außerhalb davon, z. B. für Eisenbahnen oder Straßen.

Es wird zwischen drei verschiedenen Deponietypen unterschieden [72, S. 79 ff.]. In Inertstoffdeponien dürfen nur "*gesteinsähnliche, schadstoffarme Materialien*" eingelagert werden, von denen zu erwarten ist, daß sie beim Auswaschen kaum Schadstoffe abgeben. Auf Reststoffdeponien werden "*anorganische Materialien mit bekannter Zusammensetzung und mit erhöhtem Schadstoffgehalt*" abgelagert. Es dürfen weder gasförmige noch leicht wasserlösliche Substanzen abgegeben werden. Alle sonstigen Abfälle müssen in der Schweiz auf einer Reaktordeponie abgelagert werden. Darunter fallen zum Beispiel Siedlungsabfälle oder brennbare Bauabfälle. Sonderabfälle, wie Filterstäube, werden in ausländischen (meist deutschen) Untertagedeponien gelagert. Hochradioaktive Materialien werden einer Wiederaufbereitung im Ausland zugeführt oder verbleiben in

einem Zwischenlager bis zur eigentlichen Endlagerung. Schwach- und mittelaktive Abfälle werden ebenfalls endgelagert.

Unter Energieverbrauch wird stets der Verbrauch an Primärenergie betrachtet. Primärenergieträger sind alle natürlich vorkommenden Rohstoffe zur Energiegewinnung, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden (fossile Brennstoffe, Kernbrennstoffe, regenerative Energiequellen). Wenn Sekundärenergieträger eingesetzt werden, ist für diese der entsprechende primärenergetische Aufwand für deren Bereitstellung zu berechnen (siehe Abschnitt 2.6). Der Ökofaktor von 1 für den Verbrauch von 1 MJ Primärenergie ergibt sich aus der Annahme, daß langfristig der Energieverbrauch zu stabilisieren sei.  $F_k$  wird daher gleich  $F$  gesetzt. Die ökologischen Belastungen durch den Verbrauch von Energie werden an anderer Stelle durch die jeweiligen Ökofaktoren abgedeckt.

Die Ursache für Lärmemissionen wird im Verkehr gesehen. Es wird zwischen LKW- und PKW-Verkehr unterschieden. Aus beiden errechnet sich der Mixwert.

Aus der großen Zahl der zur Verfügung stehenden Ökofaktoren für Luftemissionen werden sieben, die als wichtig erachtet werden, herausgegriffen. In den letzten Jahren wurden aufgrund ihrer besonderen Umweltrelevanz (Treibhauseffekt, Zerstörung stratosphärischen Ozons) auch Ökofaktoren für FCKW, FKW, Halone und perfluorierte Kohlenwasserstoffe berechnet (siehe Anhang 3) [72, S. 31 ff.]. Als weiteres Auswahlkriterium wird die ökologische Bedeutung des Stoffes (besonders für die Schweiz) herangezogen. "*Übermäßige lokale Belastungen*" können daher mit diesen Ökofaktoren nicht ermittelt werden.

Bei Wasseremissionen wird zwischen Einleitung in Oberflächengewässer und Grundwasser (über den Boden) unterschieden [72, S. 57 ff.]. Für diese Arbeit sind jedoch nur erstere von Bedeutung. Analog der Vorgehensweise bei der Berechnung von Ökofaktoren für Luftemissionen gilt auch für diese, daß eine "*durchschnittliche schweizerische Situation*" zugrunde gelegt wurde. Lokale und regionale Gegebenheiten werden nicht berücksichtigt. Ausschlaggebend für die Auswahl der Ökofaktoren ist die ökologische Relevanz der jeweiligen Schadstoffe in der Schweiz sowie in den Ländern, in denen Vorprozesse ablaufen (etwa die Aufbereitung von Rohstoffen oder Herstellung von Vorprodukten), welche dann in der Schweiz weiterverarbeitet werden.

**Tab. 8:** Ökofaktoren für die Schweiz (Auswahl)

Weitere Ökofaktoren siehe Anhang 3.

Umwelteinwirkung	Einheit	Ökofaktor	Jahr der Veröffentlichung	Quelle
<b>Bodenverbrauch</b>				
Versiegelung	UBP/m <sup>2</sup>	550	1994	[75, S. 45]
<b>Deponieraumverbrauch</b>				
Abfall in Inertstoff-, Reaktor-, Reststoffdeponie	UBP/g	0,5	1997	[72, S. 10 ff.]
Abfall in Untertagedeponie	UBP/g	24	1997	[72, S. 10 ff.]
<b>Energieverbrauch</b>				
Primärenergieträger	UBP/MJ	1,0	1997	[72, S. 10 ff.]
<b>Lärmemissionen</b>				
Straßenverkehr mit LKWs	UBP/km	1600	1994	[75, S. 45]
Straßenverkehr mit PKWs	UBP/km	140	1994	[75, S. 45]
Straßenverkehr (Mix)	UBP/km	210	1994	[75, S. 45]
<b>Luftemissionen</b>				
Chlorwasserstoff	UBP/g	47	1997	[72, S. 10 ff.]
FCKW (R11-Aq.)	UBP/g	2000	1997	[72, S. 10 ff.]
Kohlendioxid	UBP/g	0,20	1997	[72, S. 10 ff.]
NMVOC (Kohlenwasserstoffe ohne Methan)	UBP/g	32	1997	[72, S. 10 ff.]
Methan	UBP/g	4,2	1997	[72, S. 10 ff.]
Schwefeldioxid	UBP/g	53	1997	[72, S. 10 ff.]
Stickoxide	UBP/g	67	1997	[72, S. 10 ff.]
<b>Wasseremissionen</b>				
Ammonium (in N)	UBP/g	54	1997	[72, S. 10 ff.]
Chlorid (in Cl)	UBP/g	0,026	1990	[70, S. 25 ff.]
DOC (in C)	UBP/g	18	1997	[72, S. 10 ff.]
Nitrat (in N)	UBP/g	16	1997	[72, S. 10 ff.]
Phosphor (in P)	UBP/g	2000	1997	[72, S. 10 ff.]
Sulfat	UBP/g	0,077	1990	[70, S. 25 ff.]

## 2.9 Fallbeispiel - Die Herstellung von Bier

Als Beispiel für eine Ökobilanz wird eine Studie über die Herstellung von Bier ausgewählt.

Bier ist ein populäres alkoholisches Getränk, das aufgrund seiner Bekanntheit ein geeignetes Beispiel für ein zu bilanzierendes Produkt darstellt. Von besonderem Interesse ist auch die Art der Verpackung (Einweg oder Mehrweg), deren Vor- und Nachteile auch in der Öffentlichkeit diskutiert wurden.

Die hier zugrundeliegende Ökobilanz bietet den Vorteil, daß zwei unterschiedliche Methoden für die Wirkungsabschätzung (Umweltbelastungspunkte, CML 1992) eingesetzt werden, was einen direkten Vergleich beider ermöglicht. Die Methode der Umweltbelastungspunkte wurde bereits ausführlich dargelegt (Abschnitt 2.8), die Methode von CML 1992 wird nur kurz erläutert (Abschnitt 2.9.4.2).

Die Ökobilanz wurde für die Schweizer Brauerei Feldschlösschen erstellt und 1996 publiziert [76]. Bevor sie hier ausschnittsweise vorgestellt wird, erfolgt eine kurze Beschreibung des technischen Hintergrundes zur Herstellung von Bier [115; 77].

### 2.9.1 Technischer Hintergrund

Es wird zwischen unter- und obergärigen Bieren unterschieden. Diese Unterscheidung beruht auf der Art der zugesetzten Hefe und der daraus resultierenden Gärungsart (s.u.). Nach dem Reinheitsgebot von 1516 dürfen untergärige Biere nur aus Gerstenmalz, Hopfen, Hefe und Wasser hergestellt sein. Obergärige Biere dürfen auch andere Malzarten oder Zucker enthalten.

Die in der Gerste vorhandene Stärke kann nicht direkt zu Alkohol vergoren werden. In der Malzbereitung läßt man die Gerste daher zunächst keimen und aktiviert dadurch stärke-spaltende Enzyme. Dieses Grünmalz wird getrocknet (gedarrt) und dadurch das Darrmalz gewonnen. Der anfänglich eingesetzte Keimungsprozeß wird durch das Trocknen bei 60 bis 100 °C unterbrochen (je nach Biersorte).

In der nächsten Stufe (Würzebereitung) wird das geschrotete Darrmalz mit dem Brauwasser vermischt. Durch die hierbei ausgelöste erneute Keimung wird auch die restliche Stärke enzymatisch in Maltose und Dextrin umgebaut. Die Maische muß dann von den Trebern (vor allem ausgekochte Spelzen) durch Absetzen oder Filtration getrennt werden. Nun wird zu dieser Würze der Hopfen zugesetzt, welcher dem Bier seinen bitteren Geschmack gibt und dessen Haltbarkeit erhöht (auch das Schaumvermögen des Bieres beruht auf dem Hopfen). Würze und Hopfen werden in der Würzepfanne zusammen gekocht. Das Kochen dient zudem der Ausscheidung von Eiweißen (Koagulation), Aromatisierung und Konservierung.

Nach Filtrieren wird die Würze abgekühlt und mit Hefe versetzt. Die Gärung liefert Alkohol und Kohlendioxid. Sie dauert bei Einsatz von Oberhefen und einer Temperatur ca. 15 bis 20 °C vier bis sechs Tage (obergäriges Bier) und bei Verwendung von Unterhefen und 6 bis 8 °C acht bis zehn Tage (untergäriges Bier). Bei obergärigem Bier sammelt sich die Hefe an der Oberfläche, bei untergärigem Bier bildet sie einen Bodensatz. Das Bier muß abschließend noch in einer mehrwöchigen Nachgärung bei 0 bis 2 °C nachreifen, bevor es nach Filtration in Fässer oder Flaschen abgefüllt werden kann.

Bier besitzt einen Alkoholgehalt von ca. 1,5 bis 6 %. Untergärige Biere sind zum Beispiel das Pilsener, Dortmunder und Münchner. Obergärige Biere sind Berliner Weißbier, Malzbier oder die englischen Sorten Ale, Stout und Porter.

### 2.9.2 Ziel- und Untersuchungsrahmen

Die Ökobilanz umfaßt den Lebensweg von Bier. Dieser beginnt mit dem Anbau von Hopfen und Gerste (vorgeschaltete Prozesse), umfaßt weiter die eigentliche Produktion in der Brauerei (Hauptprozeß) und endet mit dem nachgeschalteten Vertrieb zum Konsumenten oder zur Gastronomie (Abb. 4). Mit in die Systemgrenzen eingeschlossen ist das Recyceln beziehungsweise die Entsorgung der Bierbehälter. Einige untergeordnete Prozesse, wie der Transport von Samen und Pestiziden für die Landwirtschaft, wurden wegen Schwierigkeiten bei der Datenerhebung nicht erfaßt.

Die einzelnen Abschnitte des Lebensweges von Bier sind über verschiedene Transportprozesse miteinander verbunden. In der Darstellung des Lebensweges werden der Transport über Schiene und Straße von sonstigen Transportmöglichkeiten (zum Beispiel innerhalb der Brauerei) oder von der Sammlung und Rückführung von Flaschen unterschieden. Produktionsabläufe innerhalb der Brauerei werden als Black-Box behandelt, also nicht im Detail aufgelistet.

Die funktionelle Einheit ist der Verbrauch von hundert Litern (Hektoliter) Bier. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß Bier in unterschiedlichen Behältern transportiert wird. Die Brauerei Feldschlößchen vertreibt ihr Bier zu 47 % in Mehrwegflaschen, zu 29 % in Fässern und zu 22 % in Einwegflaschen. An die 50 % des in dieser Brauerei hergestellten Bieres werden zu Hause konsumiert.

Zielgruppe dieser Ökobilanz sind neben den Fachleuten auch interessierte Konsumenten und Produzenten.

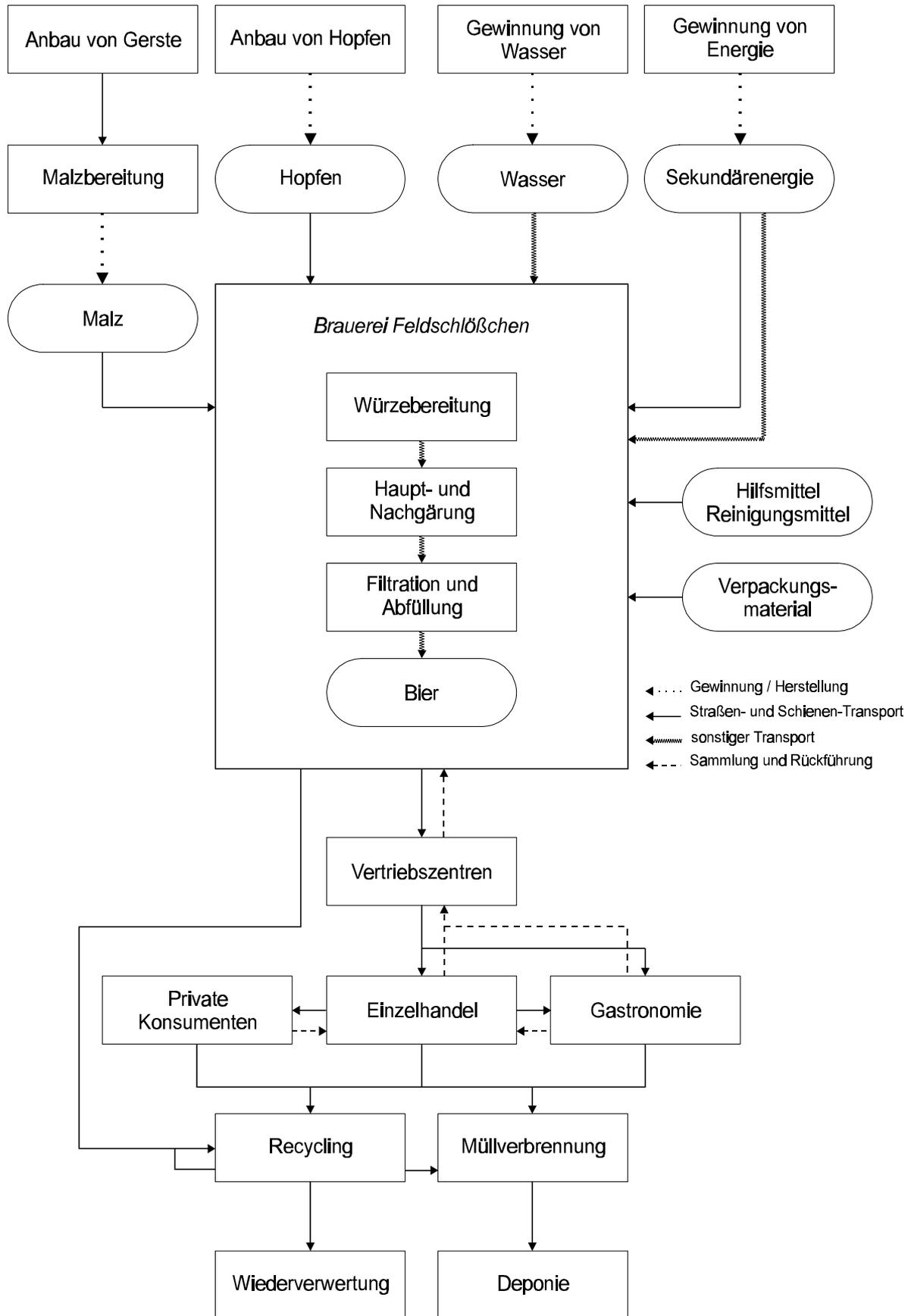


Abb. 4: Prozeßbaum von Bier

### 2.9.3 Sachbilanz

Die Sachbilanz umfaßt alle wesentlichen Input-Output-Daten. Eine ausführliche tabellarische Darstellung wäre an dieser Stelle zu umfangreich. Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden jedoch alle relevanten Prozesse behandelt.

Die Qualität der Sachbilanzdaten für die Bierherstellung in der Brauerei wird von den Autoren der Ökobilanz als gut beurteilt. Die Daten für die Produktion von Hopfen und Gerste sind zu 80 % der Literatur entnommen, der Rest ist geschätzt. Die Output-Daten (z. B. Abwasser, Abfall) beruhen nur zu ca. 70 % auf Messungen. Daten zu Transporten (Entfernungen, Fahrzeugen) stammen vom Schweizer Bundesamt für Statistik (1991). Dieses war neben der Schweizerischen Fachstelle für Alkoholprobleme auch eine Quelle für Angaben zum Bierkonsum (1994). Es kann davon ausgegangen werden, daß jeweils andere Systemgrenzen gelten, und folglich Umfang und Tiefe der Datenerhebung sowie die Qualität der Daten (gemessen, berechnet, geschätzt) unterschiedlich sind.

Die Bilanzierung von Produkten, welche recycelt werden, hängt davon ab, was aus dem recycelten Produkt wieder hergestellt werden soll. Eine solche Unterscheidung wurde auch in dieser Ökobilanz durchgeführt. Es muß generell zwischen geschlossenen und offenen Produktkreisläufen unterschieden werden.

Im Falle von geschlossenen Kreisläufen (Closed-Loop Recycling), wie bei der Wiederverwendung von Mehrwegflaschen aus Glas, werden aus dem Altmaterial neue Gegenstände des gleichen Typs produziert. Die Umweltbelastungen aufgrund des Recycling werden in diesem Fall daher der Produktion der Glasflaschen zugeordnet.

Einwegflaschen aus Glas oder Metalldosen unterliegen einem offenem Kreislauf, das heißt, daß die Materialien in der Regel zu anderen Gegenständen verarbeitet werden. Daher werden die Auswirkungen des Open-Loop Recycling der jeweiligen Produktion zugeordnet (zur Vertiefung siehe [78; 79]).

### 2.9.4 Wirkungsabschätzung

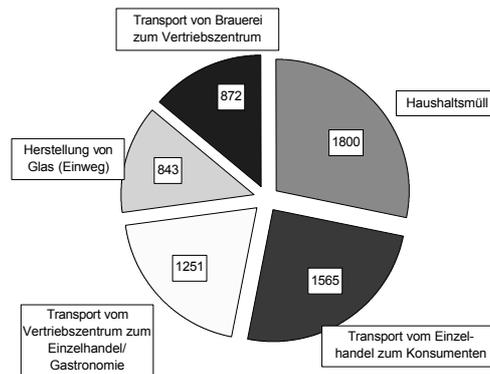
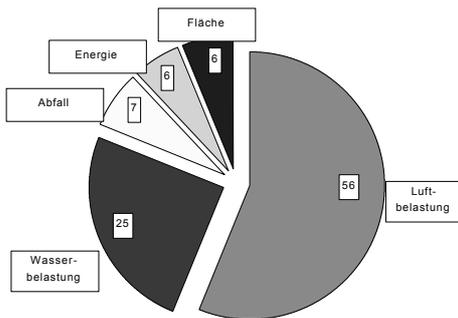
Auf der Basis der im Rahmen der Sachbilanz erhobenen Daten werden mögliche Umweltbelastungen bestimmt. Für die Wirkungsabschätzung wurden zwei unterschiedliche Methoden ausgewählt und gegenüber gestellt. Es handelt sich dabei um die Schweizer Methode der Umweltbelastungspunkte sowie die niederländische Methode des CML von 1992.

#### 2.9.4.1 Methode der Umweltbelastungspunkte

Für dieses Beispiel werden fünf Kategorien herangezogen (Luft- und Wasseremissionen sowie Fläche, Energie, Abfall). Für die untersuchten Umweltbelastungen wurden Ökofaktoren bestimmt, welche mit der Umwelteinwirkung multipliziert die Umweltbelastungskennzahl (in Umweltbelastungspunkten, UBP) ergeben. Diese Kennzahlen können innerhalb der Kategorien sowie auch darüber hinweg aufaddiert werden. Die verwendeten Ökofaktoren stammen aus BRAUNSCHWEIG ET AL. [75] und sind nicht in jedem Fall identisch mit jenen in Tab. 8 (hier sind die jeweils aktuellsten Ökofaktoren angegeben).

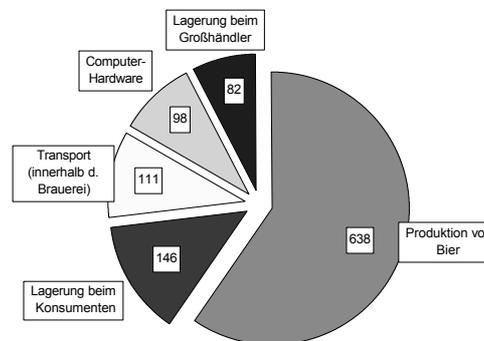
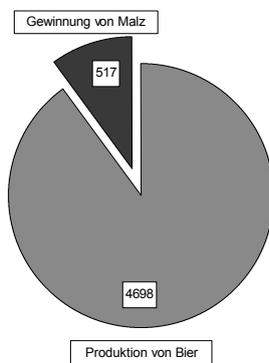
Unter Abfall sind Siedlungsabfälle und Sonderabfälle (ca. 9 %) zusammengefasst. Die Kategorie Lärm wurden nicht berücksichtigt.

Abb. 5 demonstriert den Anteil der Kategorien an der Gesamtbelastung. Die Abb. 6 bis Abb. 10 zeigen aus Gründen der Übersicht nur die jeweils fünf stärksten Belastungen innerhalb einer Kategorie. Abb. 11 gibt die prozentual acht größten Einzelbelastungen wieder.



**Abb. 5:** Umweltbelastungen im Lebensweg von Bier (Anteil der einzelnen Kategorien [%])

**Abb. 6:** Luftbelastung [UBP]



**Abb. 7:** Wasserbelastung [UBP]

**Abb. 8:** Abfall [UBP]

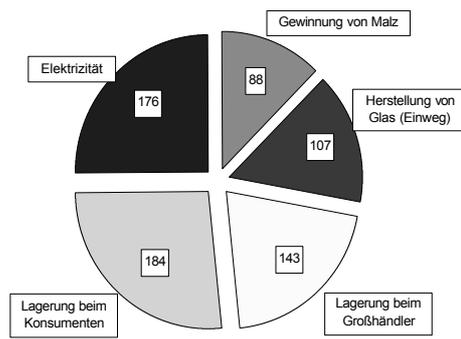


Abb. 9: Energie (Verbrauch) [UBP]

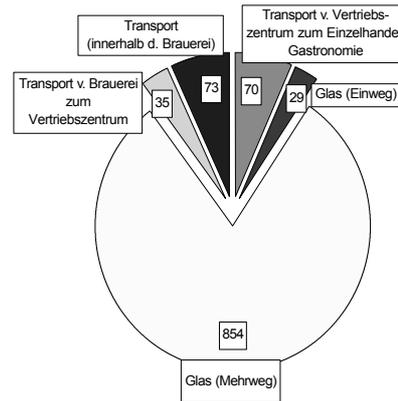


Abb. 10: Fläche [UBP]

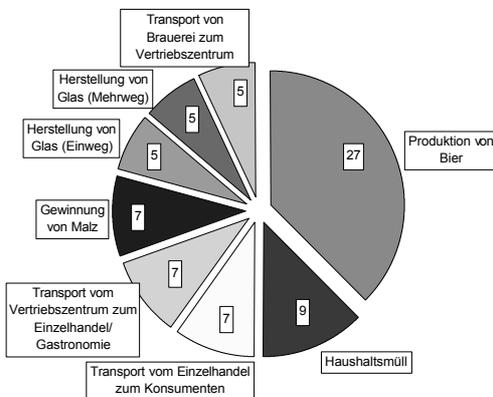


Abb. 11: Die größten Einzelbelastungen im Lebensweg von Bier (bezogen auf die Gesamtbelastung) (UBP)<sup>8</sup> [%]

### 2.9.4.2 Methode nach CML 1992

Das niederländische CENTRUM VOOR MILIEUKUNDE LEIDEN (CML) veröffentlichte 1992 eine Methodik für die Wirkungsabschätzung, welche sich durch einen hohen wissenschaftlichen Anspruch auszeichnet [36; 80]. Sie ist als transparent und aufgrund der Berechnungsweise der Charakterisierungsfaktoren als objektiv einzustufen. Obwohl nur etwas mehr als ein Dutzend von Wirkungskategorien zur Verfügung steht, ist doch ein großer Bereich an Umwelteinwirkungen abgedeckt. Dies erweist sich aber auch als Nachteil, weil dadurch die Methodik sehr komplex und umfangreich wird. Zudem erfordert die Einordnung der Input-Output-Daten nach ihren Umwelteinwirkungen chemisches Fachwissen. Die Methode wurde 1996 überarbeitet [81].

<sup>8</sup> Die zu 100 % fehlenden Einzelbelastungen sind in dieser Grafik nicht aufgeführt.

Aufgrund des umfangreichen theoretischen Hintergrundes der Methodik wird hier auf eine ausführliche Darstellung verzichtet und auf die Grundlagenliteratur verwiesen [36].

Ursprünglich stehen 14 Wirkungskategorien zur Auswahl, von denen für dieses Beispiel (neben dem Energieverbrauch) drei ausgewählt werden:

- Humantoxizität
- Ökotoxizität Wasser
- Treibhauseffekt

Abb. 12 bis Abb. 15 zeigen für das Beispiel Bierherstellung die jeweils fünf stärksten Belastungen innerhalb einer Wirkungskategorie. Abb. 16 schlüsselt die insgesamt größten Einzelbelastungen auf. Die Prozentangaben beziehen sich auf den durchschnittlichen Anteil der jeweiligen Belastung an allen Wirkungskategorien.

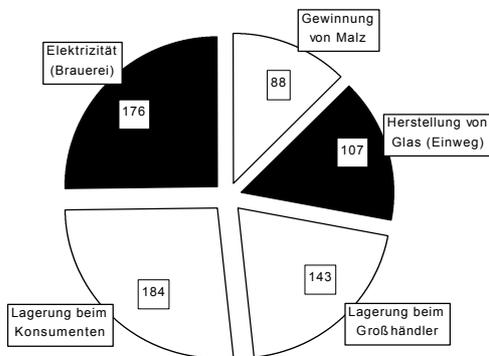


Abb. 12: Energieverbrauch (CML) [MJ]

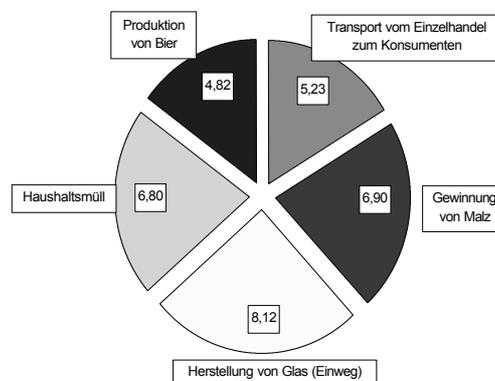


Abb. 13: Treibhauseffekt (CML) [kg Kohlendioxid-Äquivalente]

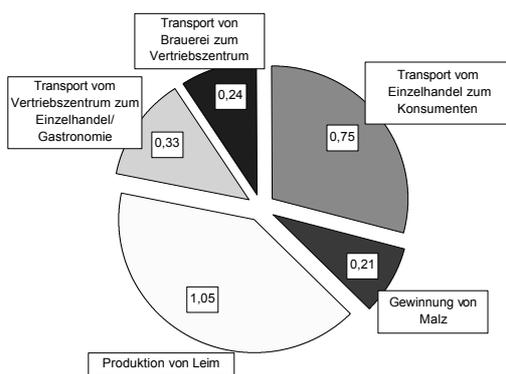


Abb. 14: Humantoxizität (CML) [kg Körpergewicht]

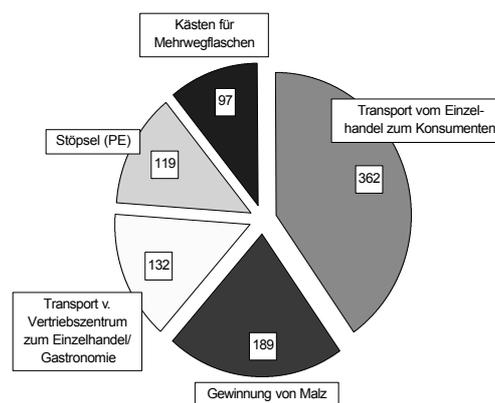
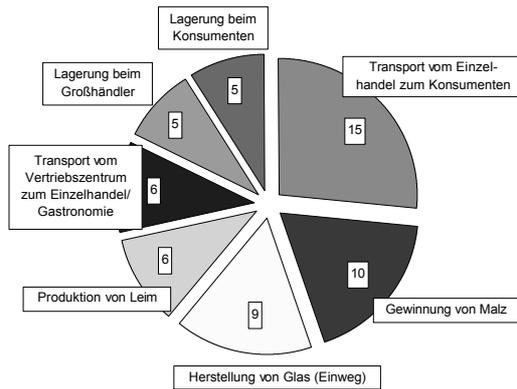


Abb. 15: Wassertoxizität (CML) [m<sup>3</sup> Wasser]



**Abb. 16:** Die größten Einzelbelastungen im Lebensweg von Bier (CML)<sup>9</sup> [%]

### 2.9.5 Auswertung

Die Ökobilanz nach der UBP-Methode zeigt, daß die größten Umweltbelastungen durch Luft- und Wasseremissionen hervorgerufen werden (Abb. 5). Besonderen Anteil an der Luftbelastung haben der Hausmüll sowie die Transportprozesse (Abb. 6). Es gibt verschiedene Transportwege. Neben dem Transport innerhalb der Brauerei fällt dann zunächst der Vertrieb von der Brauerei zum Vertriebszentrum an, der mit LKW und mit dem Zug bewältigt wird. Der Transport zum Einzelhandel erfolgt ebenfalls mit dem LKW. Beim privaten Konsumenten wird davon ausgegangen, daß er seine Bierkästen mit dem PKW beim Einzelhandel abholt.

Die eigentliche Produktion von Bier innerhalb der Brauerei führt zu einer starken Wasserbelastung (Abb. 7) und einem hohen Abfallaufkommen (Abb. 8). Energie wird vor allem für die Brauerei, für die Kühlung beim Großhändler sowie bei dem privaten Konsumenten benötigt (Abb. 9). Ein Bodenverbrauch (Kategorie Fläche) ergibt sich zum größten Teil, bedingt durch die erforderliche Stellfläche, aus der Wiederverwertung von Mehrweg-Glasflaschen (Abb. 10).

Wie die abschließende Übersicht zeigt, ist die eigentliche Produktion von Bier die Hauptquelle der Umweltbelastungen (Abb. 11). Darauf folgen der Müll und die Transporte. Die Herstellung von Malz sowie die der Glasflaschen für Einweg und Mehrweg sind weitere Umweltbelastungen.

Die Ökobilanz nach CML 1992 weist als die größten Energieverbraucher auch die Lagerhaltung beim Großhändler und beim Konsumenten aus sowie die Brauerei selbst (Abb. 12). Die Ergebnisse sind bei beiden Methoden aufgrund der Berechnungsverfahren gleich. Einen bedeutenden Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt liefern vor allem die Produktion von Einweg-Glasflaschen, die Malzbereitung sowie der im privaten Haushalt anfallende Müll (Abb. 13). Auffallend ist der Anteil der Transportprozesse und der Leimerstellung für die Humantoxizität (Abb. 14). Ähnliches gilt auch für die Wassertoxizität

<sup>9</sup> Die zu 100 % fehlenden Einzelbelastungen sind in dieser Grafik nicht aufgeführt.

(Abb. 15). Hier machen die Transporte einen hohen Beitrag zur Wassertoxizität aus. Weitere Wasserbelastungen entstehen aus der Malz-Produktion und der Produktion von Polyethylen-Flaschenverschlüssen (in der Schweiz für 0,5-Liter-Flaschen üblich).

Bei der CML-Methode erweist sich der Transport vom Einzelhandel zum Konsumenten, die Aufarbeitung von Malz sowie die Produktion von Einwegflaschen und Leim als die größten Einzelbelastungen im Lebensweg von Bier (Abb. 16). Es folgen der LKW-Transport sowie die Lagerung beim Konsumenten (Kühlschrank) und beim Großhändler.

Ein Vergleich der jeweils stärksten Einzelbelastungen beider Methoden zeigt die Bedeutung des Transports. Bei einem Transport mittels PKW oder LKW werden diverse Luftemissionen (z. B. Kohlendioxid, NMVOC und fluorierte Kohlenwasserstoffe) freigesetzt, welche von beiden Methoden als relevante Luftbelastungen erkannt werden. Die Herstellung der Autos sowie der Reifenabrieb (Nickelemission) sind ebenfalls in den Systemgrenzen eingeschlossen. Aufgrund der auftretenden Luftemissionen sind nach der UBP-Methode die Transporte zum großen Teil für die gesamte Luftbelastung verantwortlich. Die Wirkungsabschätzung nach der CML-Methode zeigt zudem, daß die Transportprozesse zum Treibhauseffekt, zur Human- und Wassertoxizität beitragen. Für den Beitrags zum Treibhauseffekt ist die Abgabe von Kohlendioxid verantwortlich, für die Humantoxizität die Freisetzung von NMVOC und Nickel sowie für die Wassertoxizität die entstehenden Aromaten, Phenole und PAKs.

Die Verarbeitung von Malz und die Produktion von Einweg-Flaschen stellen nach beiden Methoden bedeutende Umweltbelastungen dar. Die Herstellung von Malz ist aufgrund der freigesetzten NMVOC, des Distickstoffmonoxid und diverser Schwermetalle umwelt-relevant.

Die Produktion von Einweg-Glasflaschen trägt wegen des entstehenden Kohlendioxid, Methan und Bromotrifluormethan (Halon 1301) zum Treibhauseffekt bei. Ähnliches gilt auch für die Produktion von Mehrweg-Flaschen, welche jedoch nicht zu den fünf größten Belastungen gehört und daher nicht in Abb. 16 erscheint. Bei der UBP-Methode wird neben der Luftbelastung auch der Flächenbedarf für die Lagerung der Getränkekästen berücksichtigt, so daß sich hierdurch deren Gesamtbelastung erhöht, und daher sowohl Einweg als auch Mehrweg (zufällig) gleich hoch abschneiden.

Die Herstellung von Leim zum Abringen des Etiketts auf der Flasche erscheint nicht bei der UBP-Methode, obwohl dieser Prozeß für über 60 % aller NMVOC-Emissionen verantwortlich ist. Dies liegt daran, daß innerhalb der UBP-Methode die NMVOC nur als Summenparameter mit einem relativ niedrigen Ökofaktor erfaßt werden, während bei der CML-Methode in der Wirkungskategorie Humantoxizität die Kohlenwasserstoffe weiter in nicht- bzw. halogenierte aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe aufgeschlüsselt werden und z. T. einem vergleichsweise höheren Charakterisierungsfaktor besitzen.

Die Produktion von Bier ist nur nach der UBP-Methode einer der größten Einzelbelastungen. Verantwortlich ist die Abgabe von Phosphat ins Abwasser, welche bei der CML-Methode nicht in der Wirkungskategorie Wassertoxizität erfaßt wird, sondern in der Wirkungskategorie Eutrophierung. Da diese für das vorliegende Beispiel aber nicht berechnet wurde, kann somit die Phosphatmission auch nicht in der Übersicht zur Gesamtbelastung erscheinen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß von beiden Methoden annähernd die größten Umweltbelastungen erkannt wurden.

## **2.10 Zusammenfassung des Abschnitts**

Ökobilanzen sind ein Instrumentarium zur Bestimmung der potentiellen Umweltbelastungen von Produkten. Die Anforderungen an eine Ökobilanz sind in den DIN EN ISO-Normen 14040 bis 14043 erläutert. Wesentliche Elemente sind die Sachbilanz als Sammlung umweltrelevanter Inputs und Outputs. Auf der Basis der Sachbilanz erfolgt in der Wirkungsabschätzung die Ermittlung möglicher Umweltbelastungen. Hierzu ist eine besondere methodische Vorgehensweise erforderlich. Für diese Arbeit wurde die Methode der Umweltbelastungspunkte ausgewählt. Eine andere ist die von CML. Beide wurden in einem Fallbeispiel (Herstellung von Bier) gegenüber gestellt.

## 3 Didaktisch-methodische Grundlagen

### 3.1 Einführung

Ökobilanzen haben als Thema bisher kaum Eingang in die Unterrichtspraxis gefunden. Die Gründe dürften in der für Außenstehende auf den ersten Blick undurchsichtigen und komplizierten Vorgehensweise sowie in der mangelnden Erfassung der Bedeutung von Ökobilanzen liegen. EILKS sagt dazu:

*"Der Vorgang der Ökobilanzierung ist so komplex, dass ein umfassendes und detailliertes Verständnis oder gar eine Aufstellung von Ökobilanzen nicht das Ziel des Chemieunterrichts sein kann."* [82]

Dem kann so nur teilweise zugestimmt werden. Tatsächlich kann es nicht Ziel des Chemieunterrichts sein, ein bis ins Detail gehendes Verständnis der Erstellung von Ökobilanzen zu erreichen. Ziel muß es daher sein, den Schülern überhaupt ein Grundwissen über dieses Thema zu vermitteln. Es gilt vor allem aufzuzeigen, was eine Ökobilanz ist und wie sie erstellt wird. Hierbei ist es zunächst notwendig, daß im Rahmen einer didaktischen Reduktion die Inhalte für die Lernenden sinnvoll ausgewählt und strukturiert werden müssen. Ferner kann es im Unterricht nicht um die bloße Vermittlung fachlicher Grundlagen der Ökobilanzierung gehen. Es muß auf Probleme aus der Lebensumwelt der Schüler zurückgegriffen und es müssen neue Lösungsmöglichkeiten gesucht werden.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf den Sachkundeunterricht der Grundschule und den Chemieunterricht der Sekundarstufe I und II. Berufsschule und Erwachsenenbildung werden hier nicht berücksichtigt (zum Einsatz der Thematik Ökobilanzen dort siehe MESCHENMOSE, TEICHERT und FLEISCHER [83; 84; 85]). Bei der Untersuchung der Rahmen- und Kursstrukturpläne auf die schulischen Einsatzmöglichkeiten wird sich exemplarisch auf das Bundesland Hessen beschränkt. Didaktische und methodische Grundsätze gelten jedoch generell uneingeschränkt für alle Bundesländer. Eine Übersicht über die deutschen Lehrpläne findet sich bei STEINER und BADER [86].

Es wird zunächst eine ausführliche didaktische Begründung des Themas Ökobilanzen gegeben. Dem schließt sich eine Betrachtung zur Notwendigkeit der Elementarisierung an. Ausgehend von den Aufgaben und Zielen der genannten Fächer wird weiterhin gezeigt, welche Aspekte der Thematik sinnvoll im Unterricht mit welchen methodischen Möglichkeiten eingesetzt werden können. Der Schwerpunkt der didaktischen und methodischen Betrachtungen liegt auf dem Chemieunterricht der Sekundarstufe II.

Die Thematik Ökobilanzen wird in den einzelnen betrachteten Schulstufen auf unterschiedlichem Niveau behandelt. Während in der Primarstufe lediglich eine stark vereinfachte rein qualitative ökologische Betrachtung eines ausgewählten Gegenstandes des täglichen Lebens vorgenommen werden kann, ist in höheren Schulstufen eine zunehmend quantitative Bestandsaufnahme von Stoff- und Energieströmen sowie eine Abschätzung der Umweltbelastungen von Lebenswegphasen möglich.

## 3.2 Didaktische Grundlagen

Die nachfolgende didaktische Analyse zum Einsatz der Thematik Ökobilanzen erfolgt im Sinne der bildungstheoretischen Didaktik nach KLAFKI [87, S. 13 ff.; 88, S. 242 ff.; 89]. Danach sollen im Rahmen der Planung von Unterricht sieben Leitfragen zur Begründung der ausgewählten Thematik beantwortet werden:

1. Gegenwartsbedeutung?
2. Zukunftsbedeutung?
3. Exemplarische Bedeutung?
4. Sachstruktur?
5. Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit?
6. Zugänglichkeit?
7. Strukturierung des Lehr-Lern-Prozesses?

Die Frage der exemplarischen Bedeutung und damit nach den Lernzielen (3) wird nur kurz erörtert und wird, wie auch die Möglichkeiten der Zugänglichkeit (6) und der methodischen Strukturierung (7), weiter unten ausführlich behandelt (Abschnitte 3.4 bis 3.6). Die Fragen nach der Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit erworbener Fähigkeiten und Erkenntnisse (5) kann hier nur allgemein behandelt werden.

### Gegenwartsbedeutung

Die Frage nach der Gegenwartsbedeutung ist nach KLAFKI eigentlich die Frage *"nach den von Kindern und Jugendlichen erfahrenen und praktizierten Sinnbeziehungen und Bedeutungssetzungen in ihrer Alltagswelt"* [89, S. 273]. Damit ist gemeint, welche Bedeutung die ausgewählte Thematik für das geistige und praktische Leben der Schüler im Alltag hat.

Das Instrument der Ökobilanz kommt in der Praxis bislang nur vereinzelt an Schulen im Rahmen von Projekten zum Einsatz, um die schulischen Umwelteinwirkungen, wie Energie- und Wasserverbrauch oder Abfallaufkommen, herauszufinden. Dagegen dürften Ökobilanzen aber gerade Schülern der gymnasialen Oberstufe aus der Diskussion der Umweltbelastungen von Getränkeverpackungen [90], grafischen Papieren [91] oder Rapsölmethylester als Treibstoff [38] bekannt sein. Für diese Produkte wurden in den letzten Jahren Ökobilanzen angefertigt. Ergebnisse dieser Studien wurden in der Presse ausführlich behandelt und waren Anlaß für gesellschaftliche und (umwelt)politische Diskussionen. Um den Schülern nicht nur die Möglichkeit zu geben, solche Entscheidungsprozesse zu verstehen, sondern aktiv als mündiger Bürger daran teilnehmen zu können, bedarf es neben Fähigkeiten zur Kommunikation und Diskussion auch der Kenntnis von Fakten und Methoden.

Die gesellschaftliche Bedeutung einer derartigen Umwelterziehung betont wieder KLAFKI. Für ihn ist die *"Umweltfrage"* eines der großen *"epochaltypischen Schlüsselprobleme unserer Gegenwart und der vermutlichen Zukunft"* [89, S. 56]. Er versteht darunter *"die in globalem Maßstab zu durchdenkende Frage nach Zerstörung oder Erhaltung der natürlichen Grundlagen menschlicher Existenz und damit nach der Verantwortbarkeit und Kontrollierbarkeit der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung"* [89, S. 58]. Den

Schülern hierauf Antworten zu geben, kann nicht nur Aufgabe eines gegenwärtigen Chemieunterrichts sein, sondern ist zugleich auch Verpflichtung für die Zukunft.

### Zukunftsbedeutung

Jüngste Studien zur Schulleistung - bekannt sind die TIMSS<sup>10</sup> und PISA-Studien<sup>11</sup> [92; 93] - zeigen deutlich, welche Forderungen an eine zukünftige Entwicklung in den naturwissenschaftlichen Schulfächern gestellt werden müssen. Dabei stehen besonders die Fähigkeiten im Vordergrund, daß Schüler selbständig Probleme lösen und vernetzt denken können. Damit werden sie in die Lage versetzt, im wesentlich höheren Maße als bisher, Transferleistungen (bekannte Sachstrukturen sollen auf neue Sachverhalte übertragen werden) im Chemieunterricht erbringen zu können.

Neben dieser Forderung an ein Lernen mit Zukunftsbedeutung muß auch die inhaltliche Komponente gesehen werden. Beide Aspekte sollen hier für das Thema Ökobilanzen unter dem Gesichtspunkt des Ansatzes von KLAFFKI näher betrachtet werden.

In einem Zeitalter, wo nach KLAFFKI zugespitzt formuliert *'alles mit allem'* verknüpft ist, das heißt Gesellschaft, Technik, Politik, Wirtschaft und Umwelt über vielfältige *"Wechselwirkungszusammenhänge"* miteinander verbunden sind, ist es erforderlich, vernetzendes Denken im Unterricht zu lehren. Aufgrund der elementaren Bedeutung ist die auch von ihm als *"Zusammenhangsdenken"* bezeichnete Fähigkeit eine der elementaren Komponenten der Allgemeinbildung [89, S. 63 ff.]. KLAFFKI sieht die Fähigkeit zum vernetzenden Denken als wichtige Voraussetzung zur Lösung der globalen ökologischen, ökonomischen und sozialen Probleme, wie *"Klimaveränderung, weltwirtschaftliche Wechselwirkungen und Entwicklungsdiskrepanzen zwischen sogenannter Erster und Dritter Welt"*. Damit liegt KLAFFKI im Trend nach der Forderung einer umfassenden dauerhaften, nachhaltigen Entwicklung.

Zunächst ist es daher erforderlich, die beiden zentralen Begriffe des vernetzenden Denkens (im folgenden nach OSSIMITZ vernetztes Denken genannt) und der Nachhaltigkeit näher zu erläutern.

Unter dem Begriff "vernetztes Denken" soll im Sinne von OSSIMITZ die Fähigkeit verstanden werden, in einem vernetzten System indirekte Wirkungen und Rückwirkungen

---

<sup>10</sup> Im Rahmen der TIMSS-Studie (Third International Mathematics and Science Study) wurden die Schulleistungen in der Grundschule, Sekundarstufe I und II gleichzeitig in 45 Ländern untersucht (Zeitraum 1994 bis 95). Die deutsche Stichprobe der 7. und 8. Klasse umfaßt etwa 7.000 Schüler aller Schulformen aus 15 Bundesländern. In den Naturwissenschaften, so ein Ergebnis, gehören deutsche Schüler nur zum Mittelmaß. Im Bereich naturwissenschaftlicher Höchstleistungen sind deutsche Schüler ebenfalls nur durchschnittlich vertreten.

<sup>11</sup> PISA steht für "Programme for International Student Assessment" und ist eine von der ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT (OECD) im Jahr 2000 durchgeführte Studie zur Erfassung grundlegender Kompetenzen bei Schülern. Getestet wurden die mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung, die Lesekompetenz und fächerübergreifende Kompetenzen (z. B. der Umgang mit Computern). Teilgenommen haben 32 Staaten mit jeweils 4.500 bis 10.000 fünfzehnjährigen Schülern (in der Bundesrepublik Deutschland waren es ca. 5.000 Schüler der 9. Klasse). Die naturwissenschaftliche Grundbildung der getesteten Schüler ist im internationalen Vergleich nur unterdurchschnittlich; zudem gibt es eine beträchtliche Streuung der Leistung. Weder leistungsstarke noch -schwache Schüler werden also in geeigneter Weise gefördert.

auf die Ursache zu erkennen sowie schließlich auch "ganze Netze von Wirkungsbeziehungen" aufbauen zu können<sup>12</sup> [94].

VESTER als ein bekannter Verfechter des vernetzten Denkens äußert sich über dessen gesellschaftliche Bedeutung:

*"Um mit unseren heutigen Problemen fertig zu werden, brauchen wir dringend neue Formen des Denkens, neue Formen des Lernens. [...] Was wir anstreben müssen, ist ganz eindeutig, den Schwerpunkt des Unterrichts zu ändern: weniger isoliertes Wissen eintrichtern, um lediglich irgendwelchen aus den Fingern gesogenen Stoffanforderungen zu genügen, als vielmehr ein integrales Verstehen von Zusammenhängen zu erreichen, bei dem auch das bildhafte Erfassen der Wirklichkeit nicht zu kurz kommt, mit dem allein wir in der Lage sind, das Gelernte umzusetzen, diese Wirklichkeit in ihrer realen Vernetzung zu verstehen und unsere Probleme zu meistern."* [95 S. 48, S. 62]

Der Begriff der Nachhaltigkeit wird seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts verstärkt benutzt, um eine langfristig angelegte, zukunftsorientierte Entwicklung in Politik und Wirtschaft zu bezeichnen. Eine geläufige Definition stammt aus dem Brundtland-Bericht der WELTKOMMISSION FÜR UMWELT UND ENTWICKLUNG der VEREINTEN NATIONEN von 1983:

*"Dauerhafte Entwicklung<sup>13</sup> ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können."* [96]

1992 fand die KONFERENZ FÜR UMWELT UND ENTWICKLUNGEN DER VEREINTEN NATIONEN (UNCED) in Rio de Janeiro statt. Zentrales Abschlußdokument ist die Agenda 21, in der die Idee der Nachhaltigkeit weitergeführt und konkretisiert wurde. Darin wird festgestellt, daß angesichts "einer zunehmenden Ungleichheit zwischen Völkern und innerhalb von Völkern, einer immer größeren Armut, immer mehr Hunger, Krankheit und Analphabetentum sowie einer fortschreitenden Schädigung der Ökosysteme" eine globale Zusammenarbeit zur Lösung dieser Probleme notwendig ist. Als Ziele werden daher genannt:

- Deckung der Grundbedürfnisse und Verbesserung der Lebensbedingungen aller Menschen
- größerer Schutz und bessere Bewirtschaftung der Ökosysteme
- gesicherte, gedeihlichere Zukunft

---

<sup>12</sup> Nach OSSIMITZ ist das vernetzte Denken eine von insgesamt vier Schlüsselkomponenten des "systemischen Denkens", welches zudem noch das Denken in Zeitabläufen, das Denken in Modellen und das systemgerechte Handeln einschließt. In dieser Arbeit wird aber nur das vernetzte Denken im engeren Sinne betrachtet.

<sup>13</sup> Im englischen Original als "sustainable development" bezeichnet. Im Deutschen oft mit nachhaltiger oder dauerhafter (zukünftiger) Entwicklung übersetzt.

Der Bildung wird in der Agenda 21 eine besondere Bedeutung zuerkannt:

*"Bildung ist eine unerläßliche Voraussetzung für die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung und die Verbesserung der Fähigkeit der Menschen, sich mit Umwelt- und Entwicklungsfragen auseinanderzusetzen. [...] Um wirksam zu sein, soll sich eine umwelt- und entwicklungsorientierte Bildung/Erziehung sowohl mit der Dynamik der physikalischen/biologischen und der sozio-ökonomischen Umwelt als auch mit der menschlichen Entwicklung [...] befassen."* [97, S. 261 ff.]

In dieser Arbeit wird das vernetzte Denken, also die Fähigkeit zur Erarbeitung komplexer ökonomischer, sozialer und ökologischer Sachverhalte, als eine wichtige Voraussetzung erachtet, um langfristig eine situationsgerechte Handlungsfähigkeit beim einzelnen Schüler anzustreben.

Diese Handlungsfähigkeit muß der jeweiligen Situation angemessen sein und es sollten bei der Beurteilung des Sachverhalts die damit verbundenen vielfältigen Zusammenhänge soweit wie möglich berücksichtigt werden. Ferner kann es notwendig sein, in Diskussionen innerhalb einer Gruppe den eigenen Standpunkt zu vertreten und zu verteidigen.

Ziel kann es also nicht sein, mittels vorgegebener pauschaler Rezepte das individuelle Verhalten zu ändern oder Lösungen für Probleme zu vermitteln, sondern es sollte eine *"situative Urteilsfähigkeit"* angestrebt werden. Voraussetzungen hierfür sind unter anderem die Fähigkeit zur Abstraktion, Kommunikation und Umgang mit Konflikten sowie ferner das Verständnis für gesellschaftliche und natürliche Funktionsmechanismen [98, S. 40 ff.].

An dieser Stelle stellt sich die Frage nach den konkreten unterrichtlichen Möglichkeiten zur Umsetzung der Thematik. Nachhaltigkeit als bloßes Unterrichtsthema an sich ist unter dem eben genannten Zielaspekt wenig sinnvoll, da es nicht mehr als ein gesellschaftliches Leitbild darstellt. Für unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit ausgewählte Themen gilt allerdings, daß sie Einblicke in die komplexen wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Zusammenhänge zumindest ausschnittsweise widerspiegeln sollten.

Freilich ist die Zahl der Unterrichtsthemen, die den geschilderten Ansprüchen genügen, gering. Ein positives Beispiel ist die Thematik der Ökobilanzen, die exemplarisch an einem technischem Produkt die Verknüpfung von Technik und Wirtschaft (Herstellen des Produkts, Rohstoff- und Energieverbrauch) sowie Umwelt (z. B. Abgabe von Schadstoffen) aufzeigt. Hierbei werden zudem soziale Aspekte angesprochen, etwa die Sicherheit am Arbeitsplatz oder die Handlungsmöglichkeiten als Verbraucher. Neben dem Aspekt der Nachhaltigkeit wird zugleich auch der Aspekt des vernetzten Denkens bei der Analyse und Erarbeitung des Produktlebensweges berücksichtigt. Über die intensive Diskussion der Vorgehensweise bei der Erstellung und Auswertung der Ergebnisse - stets vor dem Hintergrund der komplexen Vernetzung von Natur und Technik - kann das Ziel einer situationsabhängigen Urteils- und Meinungsbildung beim Schüler angestrebt werden.

### **Exemplarische Bedeutung**

Für die Begründung der Auswahl eines bestimmten Unterrichtsthemas sind neben den Fragen zur Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung auch jene zur exemplarischen Bedeutung der Thematik zu beantworten. Unter der exemplarischen Bedeutung eines Themas versteht man nach KLAFFKI, daß sich *"allgemeinere Zusammenhänge,*

*Beziehungen, Gesetzmäßigkeiten, Strukturen, Widersprüche und Handlungsmöglichkeiten*" erarbeiten lassen, die sprachlich als allgemeinere oder speziellere Lernziele formuliert werden können [89, S. 275]. Auf eine ausführliche Einordnung der Thematik vor dem Hintergrund der Lehrpläne allgemeinbildender Schulen wird an dieser Stelle verzichtet. Sie ist Gegenstand der Abschnitte 3.4 bis 3.6.

### Sachstruktur

Die Fragen zur Sachstruktur sowie zur Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit von Lernzielen bilden nach der oben abgehandelten *"Begründungsproblematik"* den zweiten großen Bereich der *"thematischen Struktur"*.

Die thematische Strukturierung umfaßt eine Reihe von Teilfragen, von denen nachfolgend nur ausgewählte - für die Thematik Ökobilanzen relevante - beantwortet werden sollen. Dies sind besonders die Fragen nach der Perspektive der Bearbeitung, nach der immanenten Struktur, welche eventuell verbunden ist mit einer logischen Abfolge, sowie der Angabe der begrifflichen Voraussetzungen für die Behandlung der Thematik.

Es stehen eine Reihe unterschiedlicher inhaltlicher Zugänge zur Verfügung, mit der das Thema Ökobilanzen angegangen werden kann. Alle Zugänge weisen eine Verbindung zur Alltagswelt des Schülers auf:

- Fachchemie: Chemische Verbindungen als Schadstoffe im Abwasser, Abluft oder Boden
- Landwirtschaft: Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden; gentechnisch veränderte Produkte
- Industrie: sparsamer Umgang mit Rohstoffen und Energie; Produktentwicklung (Materialauswahl); Produktion; Umgang mit Abfällen (Recycling, Entsorgung)
- Dienstleistungsbereich: Verkehr (Vergleich von Bussen und Bahnen gegenüber PKW)
- Schüler als Verbraucher: Produktwahl unter ökologischen Gesichtspunkten; Umgang mit den eigenen Abfällen

Von besonderem Interesse für den Chemieunterricht sind die Themen, welche zugleich einen gesellschaftlichen, fachlichen und einen Schüler-Bezug aufweisen. Ein solches Thema ist die Verpackungsproblematik, womit die Frage nach dem ökologisch richtigen Umgang mit Verpackungen gemeint ist. Der Schüler ist hierbei als Verbraucher direkt eingebunden. Durch den Kauf eines Produktes wird in der Regel zugleich eine Verpackung mitgekauft, welche in irgendeiner Art und Weise entsorgt oder recycelt werden muß. Es treten weitere Aspekte hinzu, so beispielsweise die Frage nach alternativen Materialien oder geeigneten technischen Recyclingverfahren. Diese Punkte sind zugleich auch Gegenstand gesellschaftlicher und politischer Diskussion (z. B. Duales System).

Um einen Zugang zur Thematik Ökobilanzen im Chemieunterricht zu schaffen, wurde bisher meist eine nichtexperimentelle Herangehensweise gewählt, beispielsweise durch qualitative Bewertung von Verpackungen, Zeitungsartikeln oder Filmen über aktuelle

Umwelt- und Verkehrsprobleme. Darüber hinaus kann auch ein experimenteller Zugang gewählt werden, wie er in dieser Arbeit gezeigt wird (Kapitel 4).

Es existiert eine *"immanent-methodische Struktur"* (KLAFKI) der ausgewählten Thematik. Diese Struktur ist abhängig davon, mit welcher Tiefe und welchem Umfang das Unterrichtsthema behandelt werden soll. Je nach Zielsetzung ist zunächst eine rein qualitative Betrachtung des Produktes möglich (z. B.: Je mehr Masse das Produkt besitzt, desto mehr Rohstoffe werden verbraucht, desto schlechter ist es für die Umwelt). In der nächsten Stufe ist eine quantitative Auswertung der Umwelteinwirkungen denkbar (z. B.: Verbrauch elektrischer Energie, Massenverlust ins Abwasser oder Abluft). Schließlich kann eine quantitative Erfassung der Umweltbelastungen im Sinne einer vereinfachten Ökobilanz durchgeführt werden. Während erstere überwiegend im Grundschulbereich einzusetzen ist, kann letztere in der Sekundarstufe II ihren Platz finden. Die fachliche Methodik für den Ablauf einer Ökobilanz ist immer gleich, auch wenn aufgrund der iterativen Vorgehensweise nachträgliche Änderungen beispielsweise an der Zielsetzung oder den Systemgrenzen vorgenommen werden dürfen. Es liegt also eine streng kausale Abfolge der einzelnen methodischen Komponenten einer Ökobilanz vor, welche nacheinander abgehandelt werden.

In den Sekundarstufen I und II dürfte sicherlich die Komplexität der Methodik sowie die des ausgewählten Produktsystems ein Hauptgrund für einen erschwerten Zugang der Schüler zur Thematik sein. Daher ist es erforderlich, in einem schrittweisen Aufbau an solche Systeme heranzuführen, wie es in dieser Arbeit demonstriert wird. Eine weitere große Hürde ist ein notwendiges Maß an Wissen über Inputs und Outputs, über deren experimentelle oder rechnerische Erfassung und schließlich zumindest grundlegender Kenntnisse von Modellen, wie Inputs/Outputs und verschiedene Umweltbelastungen zusammenhängen. Daher ist eine vorherige Erarbeitung von grundlegenden chemischen und ökologischen Kenntnissen erforderlich, deren Ausmaß von der Lerngruppe mit ihren fachlichen Kenntnissen und der Fähigkeit zum komplexen Denken abhängig ist.

### **Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit von Lernzielen**

Die Frage nach der Überprüfbarkeit von Lernzielen befaßt sich damit, wie und an welchen Leistungen beurteilt werden kann, ob die angestrebten Ziele erreicht wurden. Es soll an dieser Stelle nur die Überprüfbarkeit von beispielhaft ausgewählten Feinzielen gezeigt werden. Unter Feinzielen werden die am detailliertesten ausgearbeiteten fachspezifischen Bildungsziele verstanden. Es wird zwischen Grundschule (Sachunterricht), Sekundarstufe I und Sekundarstufe II differenziert.

Kognitive Lernziele betreffen die Erkenntnis und die Methode ihrer Gewinnung. Dies könnten beispielsweise sein:

Die Schüler sollen ...

- im Sachunterricht: einfache Maßnahmen zum Umweltschutz nennen können (z. B. Trennen von Abfällen; Wasser und Energie nicht verschwenden)
- in Sekundarstufe I: die Lebenswege verschiedener Produkte vereinfacht und beschreibend wiedergeben können (z. B. Kunststoffe, Stahl, Papier); ausgewählte Umwelteinwirkungen aufzählen sowie Möglichkeiten der Vermeidung wiedergeben können (z. B. Filter gegen Luft- und Wasserschadstoffe)

in Sekundarstufe II: Ablauf einer Ökobilanz sowie Funktion der einzelnen Abschnitte erläutern können; Möglichkeiten und Grenzen von Ökobilanzen beschreiben können

Psychomotorische Lernziele beziehen sich auf alle willkürlich gesteuerten Bewegungsabläufe, welche auch immer die entsprechenden geistigen Fähigkeiten voraussetzen. Von allgemeinem Interesse für den Chemieunterricht ist die Handhabung chemischer Geräte. Psychomotorische Lernziele sind beispielsweise:

Die Schüler sollen ...

im Sachunterricht: das Experimentieren lernen und üben; unterschiedliche Abfälle richtig entsorgen können (z. B. nach Restmüll, Kunststoffe/Metalle, Papier/Pappe)

in Sekundarstufe I: den Lebensweg eines Produktes anhand schriftlicher Informationen visualisieren können

in Sekundarstufe II: experimentell gewonnene Meßwerte zur Auswertung grafisch darstellen können

Affektive Lernziele umfassen den gefühlsbezogenen Bereich. Dieser schließt aber nicht nur die eigenen Gefühle, sondern auch Einstellungen und Wertungen ein. Affektive Feinziele können u. a. sein:

Die Schüler sollen ...

im Sachunterricht: Interesse an den Naturwissenschaften sowie eine positive Einstellung gegenüber der Natur entwickeln

in Sekundarstufe I: Verantwortung für den persönlichen Umweltschutz übernehmen können: z. B. beim Einkauf von Flaschen Mehrweg- gegenüber Einwegsystem bevorzugen; Interesse an lokalen Umweltschutzmaßnahmen zeigen, z. B. bei der Pflege des Schulgartens mit-helfen

in Sekundarstufe II: Verständnis für komplexe Systeme aufbringen, z. B. bei komplexen Themen - etwa aus den Bereichen Umwelt - nicht resignieren, sondern Möglichkeiten zur Veranschaulichung entwickeln (was hängt wie von wem ab?); das eigene Verhalten reflektieren sowie dessen Möglichkeiten und Grenzen einschätzen können

Während sich kognitive und psychomotorische Lernziele über mündliche, schriftliche und praktische Lernzielüberprüfungen abfragen lassen, sieht dies bei den affektiven Lernzielen weitaus schwieriger aus. KLAFFKI schlägt hierfür vor, daß Schüler und Lehrer zusammen eine "*Symptomatologie*" erarbeiten, anhand der dort festgehaltenen Kriterien und Symptome das Erreichen des Lernziels beurteilt werden kann [87, S. 27 ff.]. Das kann beispielsweise sein, den eigenen Hausmüll richtig zu trennen und Sondermüll (wie Altbatterien) ordnungsgemäß zu entsorgen oder ein Urteil über einen Sachverhalt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Standpunkte abzugeben.

Der Erfolg solcher Handlungen ist aber nur längerfristig zu beurteilen und entzieht sich daher der eher kurzfristig angelegten Lernzielkontrolle des Lehrers.

**Fazit:** Die didaktische Analyse nach KLAFKI hat deutlich gezeigt, warum die Thematik Ökobilanzen im Unterricht Beachtung finden sollte. Dies liegt zum einen an der gegenwärtigen Bedeutung für die Schüler, die sich in der aktuellen Diskussion (z. B. über die ökologische Bedeutung unterschiedlicher Getränkeverpackungen) zeigt. Zum anderen ist das Thema für das zukünftige Leben bedeutsam, weil das vernetzte Denken der Schüler gefördert wird, welches wiederum als Voraussetzung zum Verständnis komplexer Vorgänge und somit für ein verantwortliches nachhaltiges Verhalten erachtet wird.

### 3.3 Notwendigkeit der Elementarisierung

Der Chemie im Unterricht geht der Ruf voraus, sie sei ein "*Lerngegenstand mit einem hohen Abstraktionsniveau und vorprogrammierten Verständnisschwierigkeiten*" [88, S. 197]. Bekannte Schwierigkeiten für die Schüler im Chemieunterricht sind etwa die Anwendung der Fachsprache und die von Symbolen. Aber auch die Fülle an Stoff und die große Zahl fachspezifischer Begriffe - oft mit anderen Bedeutungen im Leben - führen zu Problemen.

Vor dem Hintergrund des Gesamtwissens der Chemie ist es selbstverständlich, daß in jedem Lernabschnitt eine sinnvolle Auswahl der zu vermittelnden Gegenstände getroffen werden muß. Dies alleine genügt aber nicht, um Chemie lernbar zu machen. Entsprechend dem Adressatenkreis ist es auch notwendig, die Komplexität zu reduzieren. Beide Vorgänge - Auswahl und Reduktion der Komplexität - werden Elementarisierung oder didaktische Reduktion genannt.

An die Elementarisierung werden einige grundlegende Forderungen gestellt: Die Ergebnisse einer derartigen didaktischen Reduktion sollen zum einen fachlich richtig sein, also nicht im Widerspruch zu fachlichen Erkenntnissen stehen. Zum anderen sollte das Ergebnis fachlich ausbaufähig sein. Beispielsweise darf eine in der Sekundarstufe I erlernte Definition der Ökobilanz nicht im Widerspruch stehen zu einer in der Sekundarstufe II vermittelten. Schließlich sollte das Ergebnis dem (außer)schulischen Vorwissen sowie dem geistigen/körperlichen Entwicklungsstand der Schüler angepaßt sein.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Elementarisierung [nach 88, S. 197 ff.]. Diese sind:

- **Vernachlässigung:**  
Elementarisierung durch Vernachlässigung meint die Beschränkung auf das Wesentliche durch Außerachtlassen von zunächst unrelevanten Nebensächlichkeiten, die einen komplexen Sachverhalt vereinfacht darstellen lassen.
- **Beschränkung auf die qualitative bzw. halbquantitative Ebene:**  
Die Beschränkung auf die qualitative beziehungsweise halbquantitative Ebene bringt es mit sich, daß mathematische Berechnungen nicht durchgeführt werden müssen. Einordnungen und Vergleiche über "besser/schlechter" oder "je mehr ... desto" können gerade anfänglich im Unterricht und in den unteren Schulstufen ausreichend sein.

- **Rückgriff auf historische Erkenntnisstufen:**  
Historische Erkenntnisstufen sind im Vergleich zum heutigen Wissensstand häufig fachlich weniger anspruchsvoll und dadurch für den Schüler leichter zugänglich.
- **Partikularisierung:**  
Partikularisierung bedeutet, daß aus der Gesamtheit aller Aspekte einer Thematik nur ein bestimmter Teilaspekt betrachtet wird.
- **Generalisierung:**  
Generalisierung dagegen meint eine Form der Verallgemeinerung, bei der unter einem Gesichtspunkt eine Reihe von Aspekten zusammengefaßt wird, ohne vorhandene Unterschiede zu berücksichtigen.

Nachfolgend werden die so eben genannten Möglichkeiten der Elementarisierung auf ihre Eignung im Zusammenhang mit der Thematik Ökobilanzen hin untersucht.

### Vernachlässigung

Aufgrund der Komplexität und Vielfalt der Ökobilanzmethode und Produktlebenswege ist eine inhaltliche Reduzierung für alle Schulstufen unabdingbar. Für die Primarstufe hat das eigentliche (Gebrauchs-)Produkt im Mittelpunkt zu stehen. Der Lebensweg wird also auf die Gebrauchsphase beschränkt (vgl. Anmerkung zur Partikularisierung). Es gilt, bekannte Gegenstände aus der Lebensumwelt der Schüler unter einfachen ökologischen Gesichtspunkten neu zu hinterfragen, z. B. welche Materialien finden sich im Müppchen oder in welcher Verpackung ist das Essen eingepackt? Auf die Anwendung von Fachbegriffen (wie Sachbilanz oder Emission) sollte verzichtet werden.

In den Sekundarstufen I und II kann, ausgehend von der Gebrauchsphase, die Betrachtung eines Lebensweges weiter ausgedehnt werden. So können etwa ökologische Fragestellungen zur Herstellung oder zum Recycling eines Produktes hinzutreten. In der Sekundarstufe I wird auf die Betrachtung einzelner für den Schüler zunächst nicht faßbarer Abschnitte verzichtet (z. B. auf die Herstellung der Vorkomponenten). Der Lehrer trifft also für den Schüler eine Vorauswahl wesentlicher Lebenswegabschnitte. In der Sekundarstufe II kann dann der vollständige Lebensweg (ab Gewinnung der Rohstoffe bis zur Entsorgung) in Betracht gezogen werden. Jedoch sollte ein Produkt mit einem insgesamt überschaubaren Lebensweg gewählt werden, um zusätzliche Verständnisschwierigkeiten bei den Schülern aufgrund zu vieler zu erfassender Prozesse zu vermeiden.

In der Sekundarstufe I kann nur eine Sachbilanz erstellt werden; in der Sekundarstufe II ist zusätzlich auch eine Wirkungsabschätzung möglich. Notwendige mathematische Berechnungen zur Ermittlung der Umweltbelastungen werden dadurch zumindest in den unteren Klassen vermieden. Die hierzu entwickelten Schulexperimente, welche die erforderlichen Input-Output-Daten liefern, sind soweit wie möglich vereinfacht worden, um zum einen die kognitiven Anforderungen hinsichtlich der quantitativen und qualitativen Erfassung der Umwelteinwirkungen auf das Notwendige zu begrenzen, zum anderen, um die motorischen Ansprüche an die Schüler in Bezug auf Aufbau, Umgang mit Chemikalien sowie Durchführung ebenfalls in Grenzen zu halten.

Selbst in der Sekundarstufe II geht das Aufstellen einer Ökobilanz nach den oben dargestellten ISO-Normen vor allem aus zeitlicher und kognitiver Sicht weit über das Machbare hinaus. Daher ist es erforderlich, eine Checkliste mit den wichtigsten

Komponenten aufzustellen. Die Checkliste dient sowohl zur Planung als auch als Leitfaden für die Durchführung der vereinfachten Ökobilanz im Chemieunterricht (siehe im Anschluß Abschnitt 3.7).

Mit der Thematik müssen auch eine Reihe neuer Begriffe in den Unterricht eingeführt werden, die zusätzlich zur chemischen Fachsprache zu benutzen sind. Von der Möglichkeit des Verzichts auf eine solche begriffliche Differenzierung wird besonders in der Primarstufe Gebrauch gemacht. So ist zum Beispiel eine Unterscheidung zwischen Umwelteinwirkung und Umweltbelastung oder zwischen Technosphäre und Umwelt nicht erforderlich. Ebenfalls vollkommen ausreichend ist an dieser Stelle die Beschränkung auf die halbquantitative Ebene. Es genügt, sich auf (selbst hypothetische) Aussagen in der Art "besser/schlechter für die Umwelt" zu beschränken. Erst in der Sekundarstufe I können dann quantitative Äußerungen hinzutreten, die zunächst nur die Ebene der Umwelteinwirkungen (z. B. Emissionen) umfassen. In der Sekundarstufe II können dann auch quantitative Aussagen in Hinsicht auf Umweltbelastungen auf der Basis einer Wirkungsabschätzung hinzukommen.

### **Historischer Rückgriff**

Ein Rückgriff auf historische Erkenntnisstufen wird bei der Auswahl der Methode der Umweltbelastung für die Wirkungsabschätzung vorgenommen. Sie ist eine vom Entstehungsdatum her ältere Methode, welche nicht dem heutigen "Stand der Technik" entspricht. Sie wurde aber für den Unterricht ausgewählt, weil sie im Vergleich zu anderen Methoden unter fachlichen Gesichtspunkten vor allem als praktikabel eingestuft wird [47; 48; 49]. Die Berechnung der Ökofaktoren auf der Basis von realen Emissionen und Grenzwerten sowie die eigentliche Ermittlung der Umweltbelastung, ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten, kann variiert und eigenen Bedürfnissen angepaßt werden. Die Methode deckt die grundlegenden Umweltbelastungen ab, beispielsweise Luft- und Wasserbelastung oder Energieverbrauch, welche für eine vereinfachte ökologische Beurteilung von Prozessen ausreichen (siehe hierzu ausführlich Abschnitt 2.8). Ein Vergleich mit der eher ökotoxikologisch ausgerichteten Methode nach CML 1992 (Abschnitt 2.9.4.2) verdeutlicht die Vorteile, denn die Einführung englischer Fachtermini, die Einarbeitung in einen weit umfangreicheren theoretischen Hintergrund sowie die Durchführung besonders umfangreicher mathematischer Berechnungen im Unterricht entfallen.

### **Generalisierung**

Ebenfalls für die Wirkungsabschätzung wird auf die Möglichkeit der Elementarisierung durch Generalisierung zurückgegriffen. Beispielsweise wird im Rahmen der Methode der Umweltbelastungspunkte angenommen, daß Emissionen immer zu einer Umweltbelastung führen (gilt so auch für andere Wirkungsabschätzungsmethoden). Andere Wege bleiben unberücksichtigt. So wäre für freigesetztes Kohlendioxid auch die Aufnahme durch eine photosynthesetreibende Pflanze denkbar, ohne daß dieses zu dem anthropogenen Treibhauseffekt beitragen würde. Sicherlich trifft das auf einen Teil des weltweit emittierten Kohlendioxids auch zu, der hier aber unberücksichtigt bleiben soll. Es wird also eine generalisierte, allgemein gültige Annahme für das Verhalten von Substanzen in der Umwelt getroffen.

### **Partikularisierung**

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung wird sich auf die jeweils wichtigsten Emissionen beschränkt, welche zum Beispiel für die Luft-, Wasser- oder Lärmbelastung verantwortlich sind. So beschränkt man sich bei letzterer allein auf den LKW- und PKW-Verkehr als

bedeutende Lärmquellen. Es wird also lediglich ein Teilaspekt des Ganzen betrachtet (Partikularisierung). Eine solche Vorgehensweise wird auch angewendet, wenn es darum geht, den umfangreichen Lebensweg eines Produktes so zu reduzieren, daß eine einfache Ökobilanz im Unterricht überhaupt möglich wird. Daher wird sich in dieser Arbeit zum Beispiel bei der ökologischen Betrachtung von Kunststoffen auf die Phasen der Produktion und des Recycling beschränkt, in der Annahme, daß hier die relevanten Umwelteinwirkungen auftreten (und nicht etwa in der Phase des Gebrauchs oder bei Transporten).

**Fazit:** Erst eine umfassende und weitreichende Elementarisierung ermöglicht es, ausgewählte Inhalte der Thematik Ökobilanzen im Unterricht zu behandeln. Von den zur Verfügung stehenden verschiedenen Möglichkeiten der Elementarisierung ist es vor allem die Vernachlässigung, von der Gebrauch gemacht wird. Maßnahmen der Vereinfachung sind notwendig bei der exemplarischen Auswahl eines für den Unterricht geeigneten Produktes (einschließlich des Lebensweges) sowie dem Ermitteln der Umwelteinwirkungen beziehungsweise Umweltbelastungen.

### 3.4 Sachunterricht der Grundschule

#### 3.4.1 Aufgaben und Ziele des Sachunterrichts

Im Rahmenplan Grundschule des Landes Hessens heißt es zu den Zielen des Sachunterrichts:

*"Der Sachunterricht soll den Kindern helfen, sich mit Sachverhalten aus ihrer sozialen, natürlichen und technischen Umwelt auseinanderzusetzen. Die Kinder sollen lernen, die individuelle und gesellschaftliche Lebenswirklichkeit zu verstehen und kompetent in ihr zu handeln."* [99, S. 122]

Die Kinder sollen über die Auseinandersetzung mit Problemen in die Lage versetzt werden, *"Fragen zu entwickeln und nach Erklärungen und alternativen Handlungsmöglichkeiten zu suchen"*. Hierüber sollen sich *"Wissen und Kompetenz aufbauen, die den Kindern helfen, ihre aktuelle und zukünftige Lebenswirklichkeit selbständig und kooperativ zu gestalten"*.

#### 3.4.2 Inhalte des Sachunterrichts

Die Inhalte des Sachunterrichts sind in zwölf Lernfeldern zusammengefaßt, dazu gehören beispielsweise die Bereiche Pflanzen, Tiere, Arbeit, Technik und Naturphänomene. Daneben sind eine Reihe von Qualifikationen (Fähigkeiten, Fertigkeiten) beschrieben, welche die Schüler zur Bearbeitung der Probleme benötigen, beispielsweise Beobachten, Vergleichen, Unterscheiden, Messen, Experimentieren und Informationen sammeln. Lernfelder und Qualifikationen werden über die konkrete Lernsituation im Unterricht miteinander verknüpft. Von allen Lernfeldern seien hier vier beispielhaft vorgestellt, welche inhaltlich Bezüge zu dem Thema Ökobilanzen aufweisen.

Lernfeld (mit Schwerpunkten)	Mögliche Umsetzung
<b>Arbeit</b> Produktion erkunden	- einfachen Produktionsablauf planen - arbeitsteilig ein Produkt herstellen (Marmelade, Apfelsaft, Bauklötze)
<b>Naturphänomene</b> Materialien/Materialeigenschaften	- verschiedene Materialien vergleichen sowie deren Verwendung in Schule und Haushalt erkunden
<b>Technik</b> Nutzen von Energie	- Stromquellen und Verbraucher in Schule und Haushalt suchen - Spielzeug (Kran, Auto) mit Strom oder Batterie antreiben - alternative Energiequellen ausprobieren (Wind- und Wasserkraft, Sonnenenergie)
<b>Wasser</b> Wasserversorgung/-vorkommen Erfahrungen/Versuche mit Wasser	- Reinigen von Abwasser in der Kläranlage - Ursachen für Wasserverschmutzung zusammentragen

Für besondere Bildungs- und Erziehungsaufgaben wurden fächerübergreifende Aufgabengebiete geschaffen, welche ebenfalls im Rahmenplan behandelt werden. Eines davon - die Umwelterziehung - soll an dieser Stelle kurz vorgestellt werden, da ebenfalls inhaltliche Anknüpfungsmöglichkeiten zu dem Thema Ökobilanzen bestehen.

In das Aufgabengebiet Umwelterziehung fließt ein Teil der Ziele und Inhalte aus den Lernfeldern ein, welche erforderlich sind, das Thema *"mehrperspektivisch, fächerverbindend und fächerüberschreitend"* zu behandeln.

*"Umwelterziehung in der Grundschule hat die Aufgabe, Kindern über die Auseinandersetzung mit ihrer natürlichen und der vom Menschen geschaffenen Umwelt Einsichten und Sachkompetenz sowie Werte und Normen zu vermitteln, die sie zu umweltbewußtem Denken und Handeln führen."* [99, S. 274 ff.]

Für die Umwelterziehung werden vier im Unterricht zu berücksichtigende Schwerpunkte genannt [99, S. 275]:

- Naturerfahrung
- Ökologische Kreisläufe
- Schutz der Umwelt
- Umweltgerechte Gestaltung des Lebensraumes Grundschule

Als ökobilanzrelevantes Beispiel wird für den Schwerpunkt "Ökologische Kreisläufe" das Entwickeln von Problembewußtsein zur Müllentsorgung genannt. Besonders zur umweltgerechten Gestaltung der Schule werden eine Reihe wichtiger Lernziele als Beispiele aufgeführt:

- in der Schule selbst vermeiden, was die Umwelt belastet oder ihr schadet
- umweltfreundliche Produkte und Arbeitsmittel verwenden
- Abfall vermeiden beziehungsweise getrennt sammeln
- Papierverbrauch reduzieren beziehungsweise Altpapier wiederverwenden
- bei Feiern Porzellangeschirr und Metallbesteck verwenden
- im Winter alternative Streumittel einsetzen
- sparsam mit Energie (Heizung, Wasser) umgehen

Der Sachunterricht ist also aufgrund seiner Ziele das geeignete Fach zum Behandeln der Thematik Ökobilanzen. MITZLAFF sieht *hier* "den wichtigsten Ort beziehungsweise den zentralen Impulsgeber der Umweltbildung" [100, S. 174].

GÄRTNER und HELLBERG-RODE führen den Gedanken weiter und fordern für die Grundschule:

*"Eine Bewahrung der natürlichen Lebensgrundlagen als Grundoption für nachhaltige Entwicklung setzt fundierte Kenntnisse ökologischer Systeme, Prinzipien und Strategien voraus. [...] [Diese] ökologische Elementarbildung erfordert die Berücksichtigung ökologischer Fragestellungen in allen relevanten Bildungsbereichen und Disziplinen und konsequente Förderung vernetzten Denkens."* [101, S. 112 f.]

Eine Unterrichtseinheit zur Thematik Ökobilanzen im Sachunterricht beschränkt sich auf eine äußerst vereinfachte ökologische Betrachtung eines konkreten, faßbaren und dem Schüler bekannten Produktes. Ziel kann es daher nur sein, auf rein qualitativer (z. B. gut oder schlecht) oder halbquantitativer Ebene (z. B. besser als) Aussagen über eine mögliche Umweltbelastung von gegenständlichen Produkten zu erhalten. Ausgangspunkt muß die häusliche oder schulische Lebensumwelt der Schüler sein, zu der sie unmittelbaren Zugang haben.

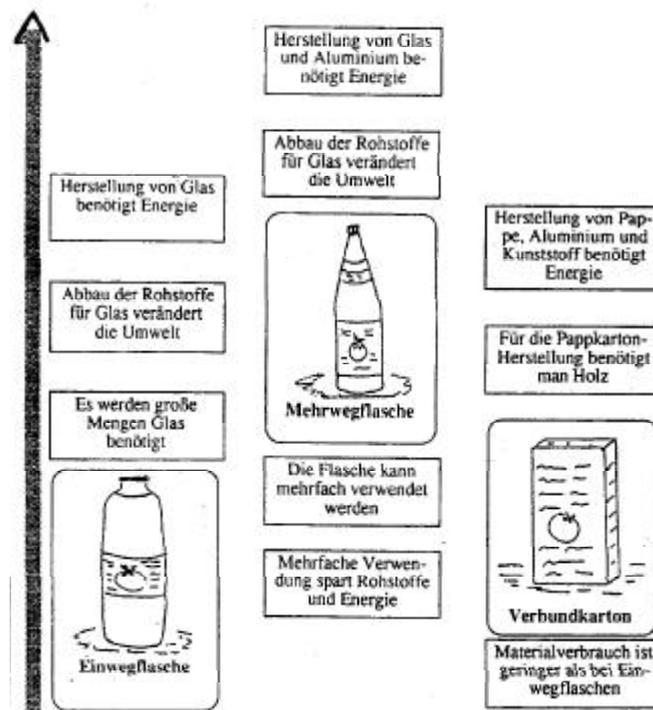
Als Gegenstand der Betrachtung eignen sich daher den Schülern bekannte Verpackungen (z. B. für Getränke) oder unmittelbare alltägliche Gebrauchsgegenstände (z. B. Schreibgegenstände). Unter dem Blickpunkt der Ökobilanz zentriert sich in der Grundschule die Betrachtung auf den Gebrauch und die Herstellung eines Produktes. Darüber hinaus können ausgewählte Inputs bestimmt (wo werden Strom und Wasser gebraucht?) sowie sich mit diversen Outputs auseinander gesetzt werden (welche Abfälle fallen an oder wie gehe ich mit Wasserverschmutzungen um?).

### 3.4.3 Methodische Vorschläge zum Sachunterricht

Zum Einstieg können von Verpackungen, welche die Schüler zu Hause gesammelt haben, bestimmte Eigenschaften (z. B. Farbe, Härte, Geruch, Klang, Oberflächenbeschaffenheit) mit den Sinnen bestimmt werden [102]. Die Masse der Verpackung wird mit Hilfe einer Waage ermittelt und ihr Volumen durch Befüllen mit Wasser oder über Volumenverdrängung von Wasser bestimmt. Die Ergebnisse werden auf einem Arbeitsblatt eingetragen. Ergänzend erhalten die Schüler Informationen zur Einweg-

/Mehrwegproblematik, zum Transport, zur Flaschenreinigung und zum Müllaufkommen. Diese Informationen haben überwiegend qualitativen Charakter, das heißt zum Beispiel, daß das Verhältnis Volumen, Gewicht und Zusammensetzung einer Verpackung im Unterricht nur angesprochen und diskutiert werden kann. Auf ein Bezug aller im Unterricht erhaltenen Daten auf eine funktionelle Einheit wird verzichtet.

Darauf aufbauend wird eine ökologische Beurteilung der Verpackungen in Form eines "Umweltbarometers" vorgenommen. Die Schüler hängen dabei die Verpackungen an einer Wand des Klassenraumes unter dem Kriterium des Materialverbrauches entweder höher (weniger Material gleich umweltschonender) oder tiefer (mehr Material gleich umweltbelastender) (Abb. 17).



**Abb. 17:** Beispiel für ein "Umweltbarometer" auf Basis des Materialverbrauchs (KAHLERT)

Eine weitere Möglichkeit ist die "quantitative Analyse" von unmittelbar dem Schüler zugänglichen Materialsammlungen, wie etwa das Federmäppchen oder der Inhalt des Schulranzens. Hierbei wird eine Vielzahl von Materialien gefunden, welche sich etwa in Wertstoffe (z. B. Kunststofflineal, Metallkappe) und Restmüll (z. B. Tintenkiller, Kugelschreibermine) unterteilen lassen. Die möglichen Müllfraktionen können mit einer Waage gewogen und die Ergebnisse grafisch als Balkendiagramme dargestellt werden [103, S. 119 ff.]. Dem kann sich eine Auswertung der im Klassenraum vorhandenen Mülleimer anschließen, bei der die Schüler mittels Zollstock die Müllmengen im Abfalleimer bestimmen. Falls erforderlich, wird der Müll mittels Pappdeckel flach gedrückt (Handschuhe sind dabei zu tragen). Die Ergebnisse werden grafisch als Säulendiagramm aufgetragen und diskutiert [104, S. 102 ff.].

Darauf aufbauend kann ein "Einkaufsspiel" durchgeführt werden, bei dem Schüler aus mehreren Verpackungen für eine Lebensmittelgruppe (beispielsweise Milch- oder Obst-

verpackungen) diejenige auswählen, welche die Umwelt ihrer Meinung nach am wenigsten belastet [nach 109, S. 28 ff.]. Abb. 18 zeigt exemplarisch die Produktgruppe Milch.



**Abb. 18:** Beispiel für eine Produktgruppe aus dem "Einkaufsspiel" (BUWAL)

Die Thematik lässt sich auch experimentell angehen. Dabei kann den Schülern praktisch gezeigt werden, wie erstens ein ihnen bekanntes Produkt hergestellt oder Verfahren durchgeführt wird, und zweitens, welche Materialien und Substanzen hierfür notwendig sind. Beispiele sind - wie oben zum Teil aufgeführt - das Herstellen von Apfelsaft oder Marmelade, das Schöpfen von Papier oder die Reinigung von Schmutzwasser. Der spielerische Umgang mit alternativen Energiequellen, wie Wind-, Wasser- oder Sonnenkraft, ist ebenfalls möglich. Für die letztgenannten Themen sind für den Grundschulbereich vollständig ausgerüstete Experimentierboxen zu erwerben, welche in Klassenstärke bereits alle notwendigen Geräte und Chemikalien enthalten<sup>14</sup>.

Eine die Einheit abschließende Exkursion ermöglicht einen Einblick in die Praxis. Mögliche Ziele sind Getränkeabfüller, Abfallsortieranlagen oder Kläranlagen, welche unmittelbar Anknüpfungspunkte an das bereits Erlernete liefern.

<sup>14</sup> Cornelsen Experimenta, Berlin

## 3.5 Chemieunterricht der Sekundarstufe I (Gymnasium)

### 3.5.1 Aufgaben und Ziele des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe I

Das Schulfach Chemie wird in Hessen in der Sekundarstufe I in fünf Halbjahren unterrichtet. Der Chemieunterricht reicht von der achten Klasse (epochal) bis zur einschließlich zehnten Klasse.

Im Rahmenplan Chemie der Sekundarstufe I des Landes Hessen heißt es zu den Zielen des Chemieunterrichts:

*"Dem allgemeinen Erziehungsziel folgend, die Schülerinnen und Schüler zur Bewältigung zukünftiger Lebenssituationen und zur Teilnahme an demokratischen Entscheidungsprozessen als mündige Bürger zu befähigen, fällt dem Chemieunterricht die Aufgabe zu, die materiale Umwelt zu erschließen sowie Verständnis und Kompetenz zu vermitteln im alltäglichen Umgang mit Stoffen."* [105, S. 5]

Unter der Vorgabe, *"Problembewußtsein, Einstellungen und Handlungsbereitschaft zu wecken"*, können die genannten Ziele weiter präzisiert werden [105, S. 6 f.]. Der Chemieunterricht soll zum einen Kenntnisse und Einsichten vermitteln über

- die Eigenschaften, Reaktionen und den Aufbau der Stoffe
- die alltägliche beziehungsweise technische Nutzung der Stoffe
- die Einbindung von Stoffen in das Kreislaufgeschehen der Ökosphäre
- die Systematik der Stoffe

Neben diesen kognitiven Zielen sollen auch affektive Ziele angestrebt werden:

- Verantwortung gegenüber der Natur
- Gefahrenbewußter und sicherer Umgang mit Stoffen
- Engagement zum Schutz der Umwelt
- Beteiligung an politischen Entscheidungsprozessen

Der Chemieunterricht in der Sekundarstufe I sollte sich nicht ausschließlich an der Fachwissenschaft orientieren. Über dessen Inhalte und typische Denk- und Arbeitsweisen hinaus ist ein *"inhaltlich offener"* Unterricht unter dem Blickwinkel *"mehrerer analytischer Perspektiven"* - den Erschließungskategorien - anzustreben. Dies ist zum einen die Technologie, und hier besonders die chemische Industrie *"als eine der tragenden Säulen unserer Industriegesellschaft"*. Zum anderen ist dies der Alltag, denn Schüler *"entwickeln besonders leicht und schnell einen Bezug zu den Unterrichtsthemen, wenn deren Einordnung in den alltäglichen Erfahrungshorizont möglich ist"*. Schließlich kommt dem Bereich Umwelt eine besondere Bedeutung zu, denn das *"Verständnis komplexer stofflicher Systeme erleichtert den [...] Umgang mit natürlichen Lebensgrundlagen"*.

### 3.5.2 Inhalte des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe I

Im Gegensatz zum Sachunterricht der Primarstufe ist in dieser Schulstufe eine zwar noch von der Lebenswelt (und somit vor allem von der Gebrauchsphase) ausgehende ökologische Betrachtung von Produkten möglich, jedoch kann der Lebensweg auf andere Ausschnitte ausgeweitet werden. Ferner können Kriterien erarbeitet werden, an denen die Umwelteinwirkung nun quantitativ gemessen werden kann, zum Beispiel Energie- oder Wasserverbrauch, anfallende Schadstoffe oder Abfallmengen. Diese Inputs- und Outputs sind zu sammeln und entsprechend zu ordnen. Schließlich kann dann auf Sachbilanz-Ebene eine Aussage über die Umwelteinwirkung getroffen werden.

Im einzelnen sollten folgende Aspekte im Rahmen der Thematik behandelt werden:

- Lebensweg eines Produktes
- Übersicht der Inputs und Outputs
- Möglichkeiten der Bestimmung der Inputs und Outputs (auf Ebene der Umwelteinwirkungen)
- Zusammenstellung der Inputs und Outputs als Sachbilanz
- Aussagekraft einer Sachbilanz
- Vor- und Nachteile der Methodik

Entsprechend den oben dargelegten Erschließungskategorien für den Chemieunterricht in der Sekundarstufe I werden die vorgesehenen Inhalte zu vier Bereichen zusammengefaßt: Fachwissenschaft, Technologie, Alltag und Umwelt. Sie sollen hier kurz mit exemplarisch ausgewählten Schwerpunkten, die einen inhaltlichen Bezug zu dem Thema Ökobilanzen geben, vorgestellt werden.

**Fachwissenschaft:** Energetische Betrachtung von Stoffumwandlung

**Technologie:** Chemische Produktion im Spannungsfeld Ökologie-Ökonomie

**Alltag:** Umgang mit Trinkwasser; Umgang mit Abfällen

**Umwelt:** Eingriffe des Menschen

- Nutzung und Belastung von Boden, Wasser, Luft
- Einbringung künstlicher Stoffe in die Ökosphäre
- Erschließung stofflicher Ressourcen
- Umgang mit fossilen Energieträgern

Die Kategorie Umwelt bietet gute Möglichkeiten zur Behandlung der Thematik, wobei der Aspekt der menschlichen Eingriffe in die Natur und die daraus resultierenden Auswirkungen betont wird:

*"Chemieunterricht muß [...] einerseits die materialen Strukturen von Atmosphäre, Hydrosphäre und Pedosphäre mit ihren Wechselwirkungen und funktionalen Bezügen thematisieren und andererseits das interessebedingte Eingreifen des Menschen in diese drei Bereiche mit seinen Folgen für die Umwelt und die Rückwirkungen auf den Menschen darstellen."* [105, S. 10]

Nicht zu unterschätzen ist die Bedeutung des Alltags für die Auswahl der Unterrichtsinhalte. Es bietet sich an, konkrete Gegenstände aus dem Haushalt (z. B. Verpackungen, Waschmittel, Papier) im Unterricht als Fallbeispiele für ökologische Betrachtungen auszuwählen. Sie können als Ausgangspunkt dienen, um die notwendigen *"Kenntnisse über die Rohstoff-, Energie- und Abfallproblematik chemisch-industrieller Produktion"* zu vermitteln. In der Gesellschaft als "heiße Eisen" diskutierte Themen -beispielsweise die mögliche Einführung von Pfand für Getränkeflaschen aufgrund der Ergebnisse einer vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Produktökobilanz - sollten im Unterricht aufgegriffen und differenziert sowie sachbezogen diskutiert werden. Es ist dabei erforderlich, in Diskussionen den eigenen Standpunkt zu vertreten, eventuell falsche persönliche Vorlieben oder Vorurteile abzubauen, um dann letztlich auf der Basis naturwissenschaftlicher Ergebnisse zu einer Entscheidung zu kommen.

Die angesprochenen Rückwirkungen auf die Natur stellen den Effekt der Rückkopplung in einem hochvernetzten System, wie das von Mensch und Umwelt, heraus. Zwar heißt es hier ganz deutlich, daß das Unterrichtsfach die materielle Umwelt erschließen soll, dennoch sei auch der ökonomische und soziale Kontext zu betrachten. Zu dessen Umsetzung heißt es weiter:

*"Für das Verständnis dieser Komplexität sollen Schülerinnen und Schüler eine deutliche Vorstellung von den vielfältigen Vernetzungen entwickeln. Dies kann nicht nur in Kooperation mit anderen Fächern, z. B. in Form fächerübergreifenden Unterrichts geschehen, sondern sollte auch innerhalb des Fachunterrichts Chemie durch Einbeziehung fachfremder Betrachtungsweisen und Problemzusammenhänge möglich sein."* [105, S. 13]

Das Einbeziehen fachfremder Inhalte sei hier am Beispiel Papier gezeigt. Im Chemieunterricht der Sekundarstufe I kann beispielsweise eine vereinfachte Ökobilanz von grafischem Papier (z. B. Schreibpapier) erstellt und ausgewertet werden. Daneben sind folgende fachfremde Inhalte aus den Fächern Biologie, Erdkunde sowie Werken/Kunst denkbar.

Biologie	Auswirkungen von bei der Papierherstellung anfallenden Schadstoffen auf Gewässer; Gewässergütebestimmung; Aufbau eines Baumes (Was ist Holz?)
Erdkunde	Einfluß von Schadstoffen auf Böden; regionale Auswirkungen intensiver Monokulturen (Nadelholz-Anbau); Globalisierung der Märkte und daraus resultierende wirtschaftliche Probleme
Werken/Kunst	Papierherstellung durch Schöpfen und Veredelung sowie anschließende Bearbeitung

Im Gegensatz zum Sachunterricht der Primarstufe, in der sich auf eine qualitative oder halbquantitative Beurteilung von Umwelteinwirkungen beschränkt wurde, ist nun im Chemieunterricht der Sekundarstufe I eine quantitative Herangehensweise möglich. Im Rahmen der Thematik Ökobilanzen können in der Sekundarstufe I einfache Produktsysteme erarbeitet werden (z. B. die Herstellung und das Recycling eines Kunststoffes), ferner Umwelteinwirkungen wie der Verbrauch an elektrischem Strom oder Massendifferenzen gemessen und die Ergebnisse grafisch ausgewertet werden. Damit läßt sich

bereits auf dieser Stufe eine grobe Aussage über das betrachtete Produkt erhalten. Eine Erfassung der Umweltbelastungen über eine Wirkungsabschätzung wird in dieser Schulstufe wegen der zusätzlich notwendigen Kenntnisse über das Modell der Umweltbelastungspunkte nicht für sinnvoll erachtet.

Freilich setzt selbst dieser Weg ein bestimmtes Fachwissen und experimentelle Fähigkeit bei den Schülern voraus. Das Thema Ökobilanzen läßt sich daher erst sinnvoll in Klasse 10 einsetzen. In den Jahrgängen 8 und 9 werden die im Rahmenplan Sekundarstufe I genannten und zum Verständnis notwendigen Grundlagen erarbeitet [105, S. 21 ff.]. Die nachfolgende, am Rahmenplan orientierte Auflistung des als notwendig erachteten Vorwissens ist insofern idealisiert, als daß Unterricht nicht derart strukturiert stattfindet, das heißt, in Wirklichkeit können bestimmte Wissensinhalte beim Schüler fehlen.

In Klasse 8 (Rahmenthema Stoffe) ist als praktisches Beispiel der Abfalltrennung die Müllsortierung vorgesehen. Durch Exkursionen zu abfallverwertenden Firmen oder Müllverbrennungsanlagen werden die Schüler anschaulich mit den Auswirkungen des Konsumverhaltens konfrontiert, wenn deutlich wird, zu welchen Müllmengen sich selbst die vermeintlich wenigen Verpackungen aus dem eigenen Gebrauch/Verbrauch aufhäufen.

Die Kompostierung von Abfällen, welche ebenfalls behandelt wird, ist eine Möglichkeit der Entsorgung, zu der sich aber nur biologisch abbaubare Produkte eignen. Hierbei müssen die Schüler die biologische Abbaubarkeit gegen andere Eigenschaften (Aussehen, Haltbarkeit) abwägen und eine erste Beurteilung vornehmen.

In Jahrgangsstufe 9 (1. Halbjahr) werden mit dem Rahmenthema Luft die für die Ökobilanz relevanten Umweltschäden Saurer Regen, Smog und Treibhauseffekt behandelt. Der Themenbereich Verbrennung wird um die praktischen Betrachtungen "energetische Nutzung", "Umgang mit stofflichen Energieressourcen" und "Emissionsfolgen bei Verbrennungsvorgängen" anschaulich erweitert. Die Schüler erhalten die notwendigen Grundlagen für den Bereich Energie-Input innerhalb der Ökobilanz.

In Klasse 9 (2. Halbjahr) ist das Rahmenthema Wasser vorgeschrieben. Bedeutende Aspekte dabei sind die Gewässerbelastung (etwa durch Wasch- oder Lösemittel) und die Technik der Abwasserbehandlung. Die Belastung von Gewässern gehört in den Bereich des Schadstoff-Outputs der Ökobilanz. Eine Kläranlage ist ein Verfahren zur Verringerung der Schadstoffbelastung von Gewässern.

In der Jahrgangsstufe 10 (1. Halbjahr) sind innerhalb des Rahmenthemas Boden weitere Umweltschäden (Versalzung, Versauerung und Überdüngung) im Unterricht vorgesehen. Die zu behandelnden Stoffkreisläufe von Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Wasser schaffen die Grundlage zum Verständnis globaler atmosphärischer Vorgänge und daraus resultierender Umweltschäden.

Die folgende Übersicht zeigt die Voraussetzungen zur Behandlung des Themas Ökobilanzen im Chemieunterricht (Abb. 19).



**Abb. 19:** Wesentliche Voraussetzungen für die Thematik Ökobilanzen in Klasse 10/2

Innerhalb der Sekundarstufe I sollte die Thematik Ökobilanzen in der Klasse 10 (2. Halbjahr) behandelt werden. Dazu bietet sich das Rahmenthema Werkstoffe und Wertstoffe an, welches die Frage des Energieeinsatzes und der Emissionen bei der Herstellung und dem Recycling verschiedener Werkstoffe (Metalle, Kunststoffe, Naturfasern) vorsieht. Zur Umsetzung der Thematik im Chemieunterricht der Sekundarstufe I werden nachfolgend einige Möglichkeiten diskutiert.

### 3.5.3 Methodische Vorschläge zum Chemieunterricht in der Sekundarstufe I

Anknüpfend an gesellschaftliche Diskussionen um die Umweltrelevanz diverser Produkte (wie PVC, Getränkeverpackungen, Papier) kann im Unterricht die Frage aufgegriffen werden, wie Umwelteinwirkungen von Produkten überhaupt bestimmt werden können. Sicherlich dürfte den Schülern das Stichwort Ökobilanz bekannt sein, ohne daß sie jedoch detaillierte Kenntnisse des Instruments haben.

Das Thema Ökobilanzen kann entweder über einen experimentellen oder einen nicht-experimentellen (am gegenständlichen Produkt orientierten) Weg im Unterricht erschlossen werden.

Einfache Versuche zum Recycling von Tetrapacks und Milchschläuchen aus Polyethylen (PE) und zur Herstellung von Glas im Hinblick auf Ökobilanzen sind bereits von BASCHEK beschrieben [106, S. 26 ff.]. Die Experimente erlauben nur eine qualitative Aussage zu Umwelteinwirkungen. Ökologische Vergleiche industrieller Produkte (wie Glasflasche, Getränkekarton und Schlauchbeutel) erfolgen halbquantitativ. Ein Beispiel für eine vergleichende Darstellung des Rohstoff-, Energie- und Wasserbedarfes für drei unterschiedliche Getränkeverpackungen zeigt Abb. 20 (die relative Größe der Symbole entspricht in etwa der jeweiligen Input-Menge).

		Glas- flasche 	Getränke- karton 	Schlauch- beutel 
Rohstoffe	nachwachsende 			
	fossile 			
Energie				
Wassereinsatz				

**Abb. 20:** Beispiel einer Darstellung zum Rohstoff- und Energieverbrauch verschiedener Verpackungen (BASCHEK)

Eine methodische nichtexperimentelle Annäherung stellt das bereits für die Grundschule vorgestellte "Umweltbarometer" dar, das abgewandelt auch in der Sekundarstufe I eingesetzt werden kann [107]. Grundlage ihrer Beurteilung sind auch hier zunächst die von den Schülern ermittelten Eigenschaften der Verpackungen unter Berücksichtigung von Transport, Flaschenreinigung und Müllaufkommen. Hierzu erhalten die Schüler

ausgewählte Daten aus der Ökobilanz von Getränkeverpackungen des Umweltbundesamtes von 1995 (Verbrauch an Energie, Wasser und Holz sowie Emission von Treibhausgasen und Abfallmenge). Schließlich kann auf Basis aller qualitativen und quantitativen Informationen das Umweltbarometer erstellt werden (siehe Abb. 17, S. 88).

Zur weiteren Vertiefung kann ein Rollenspiel im Unterricht stattfinden, in dem auf Basis der eigenen Ergebnisse sowie eventuell anderer hinzugezogener Ökobilanzen die ökologischen Vor- und Nachteile des betrachteten Produktes sowie mögliche praktische Konsequenzen diskutiert werden. Vorstellbar ist ein Forum aus Vertretern der Industrie, Verbrauchern, Umweltverbänden und staatlichen Umweltbehörden. Über eine derartige verbalargumentative Auseinandersetzung gelingt es, die eher unanschaulichen theoretischen Resultate in konkrete Handlungsanweisungen für den Alltag der Schüler umzusetzen. Diese könnten zum Beispiel lauten: "Wir wollen mehr Mehrwegflaschen verwenden, um die Menge an Restmüll an unserer Schule zu senken." oder: "Es soll nur noch Recyclingpapier zum Kopieren verwendet werden, um Holz und Wasser einzusparen."

Es bieten sich ferner auch Exkursionen zu Kunststoffherstellern und -verarbeitern, Glasproduzenten, Müllverbrennungsanlagen, Deponien oder Recyclingbetrieben an, um den Praxisbezug weiter zu festigen.

Möglichkeiten zur Anwendung einer Wirkungsabschätzung in der Sekundarstufe I zeigen das Schweizer BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) ([108]; [109]) und BLAß [110, S. 47 ff.]. BLAß beschreibt das Aufstellen einer Wirkungsabschätzung auf der Basis ausgewählter Sachbilanzdaten (nur Luft- und Wasseremissionen) zu Milchverpackungen. Der zeitliche Aufwand wird allerdings vom Autor selbst als hoch eingestuft.

Die Erstellung einer Wirkungsabschätzung in den Klassen 5 bis 10 - wie sie dort vorgeschlagen wird - wurde in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, da der erforderliche fachliche Wissenshintergrund in der Schulstufe aus zeitlichen und inhaltlichen Gründen schwierig zu vermitteln ist. Die grundlegenden Aspekte einer Ökobilanz lassen sich auch ohne diesen Schritt darstellen. Der Vorteil einer Wirkungsabschätzung liegt zwar in der Reduktion großer Datenmengen der Sachbilanz auf wenige umweltrelevante Aussagen. Dem stehen aber besonders in dieser Schulstufe bedeutende Nachteile gegenüber:

- Die Durchführung einer Wirkungsbilanz bedeutet einen zusätzlichen zeitlichen Mehraufwand, ohne daß dieser Schritt wesentlich zum angestrebten Ziel (Darstellung der grundlegenden Vorgehensweise) beitragen würde.
- Die Ergebnisse einer Wirkungsabschätzung stellen für die Schüler zusätzlich aufzunehmende und zu verstehende Informationen dar.
- Bei den vorgestellten Versuchen ist die Zahl der Sachbilanzpositionen überschaubar. Eine Wirkungsabschätzung führt an dieser Stelle nicht automatisch zu mehr Klarheit, zumal die dahinterstehende Theorie die Schüler kognitiv überfordert.

Sinnvoll dagegen erscheint das vom BUWAL vorgestellte Einkaufsspiel, welches in vereinfachter Version bereits auch schon für die Grundschule beschrieben wurde [109, S. 28 ff.].

## 3.6 Chemieunterricht der Sekundarstufe II

### 3.6.1 Aufgaben und Ziele des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II

Chemie wird in der gymnasialen Oberstufe (Jahrgangsstufen 11 bis 13) des Landes Hessen entweder im Grundkurs mit 3 Stunden pro Woche oder im Leistungskurs mit 5 Stunden in der Woche unterrichtet. Einige Schulen haben in der 11. Klasse noch kein Kurssystem. Chemie wird dann ebenfalls mit drei Stunden unterrichtet. Im hessischen Rahmenplan für die Gymnasiale Oberstufe heißt es zur Zielsetzung des Unterrichtsfaches Chemie:

*"Aufgabe des Chemieunterrichtes ist es dabei, daß die Schülerinnen und Schüler lernen, sich sachlich fundiert und kritisch-konstruktiv mit den damit verbundenen Problemen und Phänomenen auseinandersetzen. Hierdurch werden Kritikfähigkeit und Handlungsbereitschaft gefördert, mit dem Ziel, daß die Schülerinnen und Schüler in komplexen Situationen selbständig Entscheidungen treffen oder wenigstens nachvollziehen können und gegebenenfalls ein Korrigieren gewohnter Entscheidungen im eigenen Handeln resultiert. [...]"*

Im Gegensatz zur Sekundarstufe I hat der Chemieunterricht in der Sekundarstufe II eine eindeutig wissenschaftspropädeutische Funktion. Er dient als Vorbereitung und Einführung in die Denk- und Arbeitsweisen der Naturwissenschaft Chemie. Dennoch bleibt ein Bezug zur Lebenswelt der Schüler weiterhin vorhanden.

*Um diese [wissenschaftspropädeutische] Aufgabe bewältigen zu können, müssen die Schülerinnen und Schüler nicht nur fachliche Kenntnisse und Fähigkeiten erwerben und Einsichten in fachsystematische Erkenntnisweisen und Methoden gewinnen, sie müssen ebenso lernen, die Komplexität beispielhafter Gegenstände aufzuschlüsseln und die gefundenen Ergebnisse wieder in das komplexe Geschehen des Alltags zurückzuführen." [111, Teil III, S. 1]*

An dieser Stelle wird wieder die dualistische Vorgehensweise gewählt, wie sie bereits für die Sekundarstufe I angewendet wurde. Alltag bezieht sich hierbei nicht nur auf die direkte Lebensumwelt des Schülers, sondern ist weitergefaßt und schließt auch soziale, technisch/wirtschaftliche und ökologische Aspekte einer Thematik mit ein.

### 3.6.2 Inhalte des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II

In der Sekundarstufe II ist eine im Vergleich zu den anderen Schulstufen abstrakte Herangehensweise an die Thematik möglich. Gegenstand der Betrachtung müssen nun nicht mehr faßbare Gegenstände aus der Lebensumwelt sein, sondern es können auch für Schüler weniger anschauliche Produkte (z. B. Gase) und Prozesse (z. B. Abläufe im Ionenaustauscher) hinzukommen. Zusätzlich zu einer quantitativen Betrachtung der Umwelteinwirkungen (auf Sachbilanzebene) treten nun die Umweltbelastungen hinzu, die ebenfalls quantitativ über eine Wirkungsabschätzung ermittelt werden. Ihr wesentlicher Vorteil liegt darin, daß sie eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Umwelteinwirkungen (z. B. Luftemissionen und Energieverbrauch) ermöglicht.

Der wissenschaftspropädeutische Charakter des Chemieunterrichts der Sekundarstufe II darf nicht zu der Absicht führen, in der gymnasialen Oberstufe eine auf den DIN-ISO-Normen basierende, ausführliche Ökobilanz "nach allen Regeln der Kunst" erstellen zu wollen. Auch hier - wie in den unteren Schulstufen - greift die Elementarisierung. Neben der grundlegenden Vorgehensweise der Erstellung einer Ökobilanz sollen auch die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens demonstriert werden. Das aber geschieht freilich tiefergehend, detaillierter und abstrakter als es in den unteren Schulstufen der Fall war. Die in Abschnitt 3.7 vorgestellte Checkliste zur Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz im Chemieunterricht der Sekundarstufe II hat daher die Funktion eines Leitfadens, welcher stichwortartig die wesentlichen inhaltlichen Punkte aufführt.

Geht man exemplarisch vom hessischen Rahmenplan für die gymnasiale Oberstufe aus, sollte die Thematik Ökobilanzen eher in der Jahrgangsstufe 12/13 als 11 eingesetzt werden, wie im folgenden gezeigt wird.

Für die Jahrgangsstufe 11 ist ausschließlich der umfassende Inhaltsbereich "Chemische Reaktion und chemische Bindung" mit den Themen Protolyse, Redox-Reaktionen, Atombau, chemische Bindung sowie ausgewählte Kohlenstoffverbindungen vorgesehen. Bereits erworbene grundlegende Arbeitstechniken werden weiter vertieft. Dazu gehören das Verifizieren und Falsifizieren von Hypothesen mittels Experimenten und das Anwenden von Erlerntem auf neue Probleme. Eine in Bezug auf Ökobilanzen wichtige erzieherische Zielsetzung ist das *"Aufschlüsseln komplexer Gegenstände und die Rückführung der Ergebnisse in das komplexe Geschehen des Alltags"* [111, Kap. III, S. 9].

Für die Jahrgangsstufen 12 und 13 sind drei Inhaltsbereiche vorgeschrieben. Dem Lehrer steht es frei, in welcher Reihenfolge diese bearbeitet werden. Verbindlich sind die inhaltlichen Vorgaben

- Chemisches Gleichgewicht,
- Elektrochemie und
- Kohlenstoffchemie.

Möglichkeiten für den Einsatz der Thematik Ökobilanz finden sich an verschiedenen Stellen:

- Beispielsweise heißt es für den Inhaltsbereich Chemisches Gleichgewicht, daß *"Einblicke in ökonomische und ökologische Probleme chemischer Produktionsprozesse"* zu vermitteln sind [111, Kap. III, S. 23]. Die Thematik Ökobilanzen kann an dieser Stelle eine quantitative Betrachtung der Umwelteinwirkungen und -belastungen ermöglichen. Somit ist es zum Beispiel möglich, die Bedeutung einzelner Prozesse etwa aufgrund ihres Ressourcenverbrauchs in der Produktionsphase gegenüber dem gesamten Lebensweg aufzuzeigen. Zugleich wird man auch der an dieser Stelle geforderten *"Verantwortung des Naturwissenschaftlers/Technikers für jetzige und zukünftige Generationen"* gerecht.
- Als eine Zielsetzung im Bereich Elektrochemie ist der *"sinnvolle und ressourcenschonende Umgang mit Energie"* genannt. Die Ermittlung des Energieverbrauchs (sowie des -gewinns) ist wichtiger Teil jeder Ökobilanz. Der Verbrauch von Sekundärenergie in Form von Strom und Wärme ist zum einen mit indirekten Umweltbelastungen verknüpft (Gewinnung und Aufbereitung der Primärenergieträger), zum anderen ist dies auch ein bedeutender finanzieller Aspekt.
- Der Bereich Kohlenstoffchemie eröffnet die besten Einsatzmöglichkeiten für die Thematik Ökobilanzen. Der sich über zwei Halbjahre erstreckende Kurs bietet neben ausreichend Zeit auch eine Reihe von inhaltlichen Anknüpfungsmöglichkeiten.

Besonders folgende Zielsetzungen des zuletzt genannten Inhaltsbereiches Kohlenstoffchemie sprechen für die Behandlung von Ökobilanzen [111, Kap. III, S. 17]:

- Einblicke in ökonomische und ökologische Bedingungen chemischer Produktion
- Schonender Umgang mit wertvollen Ressourcen
- Umweltgerechte Entsorgung; Müll und Abfall (Vermeidung, Recycling)
- Chemische Produktion und Gesundheit am Arbeitsplatz

Wie oben gezeigt, sind Ökobilanzen aufgrund ihrer ganzheitlichen Betrachtungsweise allgemein in der Lage, auch bei komplexen Lebenswegen Schwachstellen aufzudecken und Optimierungspotentiale offen zu legen. Dies kann dann, beispielsweise aufgrund alternativer Produktions- oder Entsorgungsprozesse, zu Einsparungen an Ressourcen und Verminderung von Emissionen oder Abfällen führen. Die Gesundheit kann über die direkte Belastung durch Schadstoffe sowie Lärm erfaßt und beurteilt werden. Im Unterricht können diese Ziele jedoch nur an exemplarisch ausgewählten Beispielen und nur ansatzweise behandelt werden.

Im Rahmen der Kohlenstoffchemie bietet der Themenbereich "synthetische Makromoleküle" einen weiteren Anknüpfungspunkt zu der Thematik Ökobilanzen. Die immer wieder auch gesellschaftlich geführte Diskussion über die umweltrelevanten Probleme bei der Produktion, der Anwendung und dem Recycling von Kunststoffen (z. B. PVC) kann nun im Chemieunterricht auf der Basis von Fakten aus der Ökobilanz wieder aufgegriffen und vertieft werden.

### 3.6.3 Methodische Vorschläge zum Chemieunterricht in der Sekundarstufe II

Der Chemieunterricht der gymnasialen Oberstufe erlaubt - wie bereits erläutert - eine umfassende und intensive Erarbeitung der Thematik Ökobilanzen, weshalb sie hier auch bevorzugt behandelt werden sollte. Gegenüber den unteren Schulstufen ist nun erstmals eine Bewertung von Umweltbelastungen möglich. Die Schüler verfügen in der Regel über ein Grundwissen der organischen und anorganischen Chemie, über theoretische und praktische Kenntnisse chemischer Trennungsvorgänge und die Fähigkeit zum Erfassen komplexer Inhalte.

Eine methodische Annäherung an die Thematik Ökobilanzen im Chemieunterricht der Sekundarstufe II beruht vor allem auf den Medien Experiment und Computer. Beide bringen in Bezug auf ihren Einsatz im Unterricht jeweils bestimmte Vor- und Nachteile mit. Mit einem Experiment ist in der Regel ein zeitlicher und materieller Aufwand für die Vorbereitung, die Durchführung und die Entsorgung sowie das Aufräumen verbunden. Dem steht gegenüber, daß das Experiment eine grundlegende Funktion in der Naturwissenschaft Chemie besitzt, es ist das *"eigentliche Wesen der Chemie"* [88, S. 292]. Die eigenhändige Tätigkeit beim Experimentieren fördert das Lernen und stärkt die Motivation. Im hier vorgestellten Zusammenhang kommt dem Experiment eine weitere wichtige Funktion als Quelle von Input-Output-Daten für die Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz durch die Schüler zu.

Ein möglicher Einsatz eines Computers im Chemieunterricht erfordert es, daß eine geeignete Hardware und Software vorhanden sind und diese auch durch die Schüler und den Lehrer bedient werden können. Beides sollte heutzutage in der gymnasialen Oberstufe kein Problem mehr darstellen, zumal bei dem in Kapitel 5 vorgestellten Programm ÖKO-BILLY keine überaus großen technischen Anforderungen gestellt werden und es zudem so entwickelt wurde, daß es von den Schülern selbständig bedient werden kann. Die Vorteile eines Computers liegen in der einfachen und schnellen Auswertung von Daten. Berechnungen können automatisiert werden und Ergebnisse grafisch ausgewertet werden. Dies ist vor allem für den Unterricht von Bedeutung, da in aller Regel die Zeit begrenzt ist und somit das Berechnen verschiedener Varianten (Abhängigkeit des Ergebnisses von den Eingangsgrößen) ohne Computereinsatz kaum möglich ist.

Aufgrund der überwiegenden Vorteile der beiden Medien sind die Durchführung von Experimenten und der Einsatz eines speziellen Computerprogramms wesentliche Bestandteile der nachfolgend vorgestellten Konzeption. Ausgangspunkt sind die Experimentalblöcke zur Herstellung von entionisiertem Wasser (Ökobilanz entionisiertes Wasser) sowie zur Darstellung und zum Recycling von Kunststoffen (Ökobilanz Kunststoffe). Ziel ist die Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz durch die Schüler auf der Grundlage experimentell ermittelter Daten.

Der erste Block umfaßt Experimente zur Destillation von Wasser sowie zum Ionenaustausch. Dies sind zwei Verfahren zur Herstellung von entionisiertem Wasser. Es treten verschiedene Umwelteinwirkungen auf, zum Beispiel bei der Destillation der Verbrauch an elektrischer Energie, beim Ionenaustausch die Abgabe von Säuren- und Laugen.

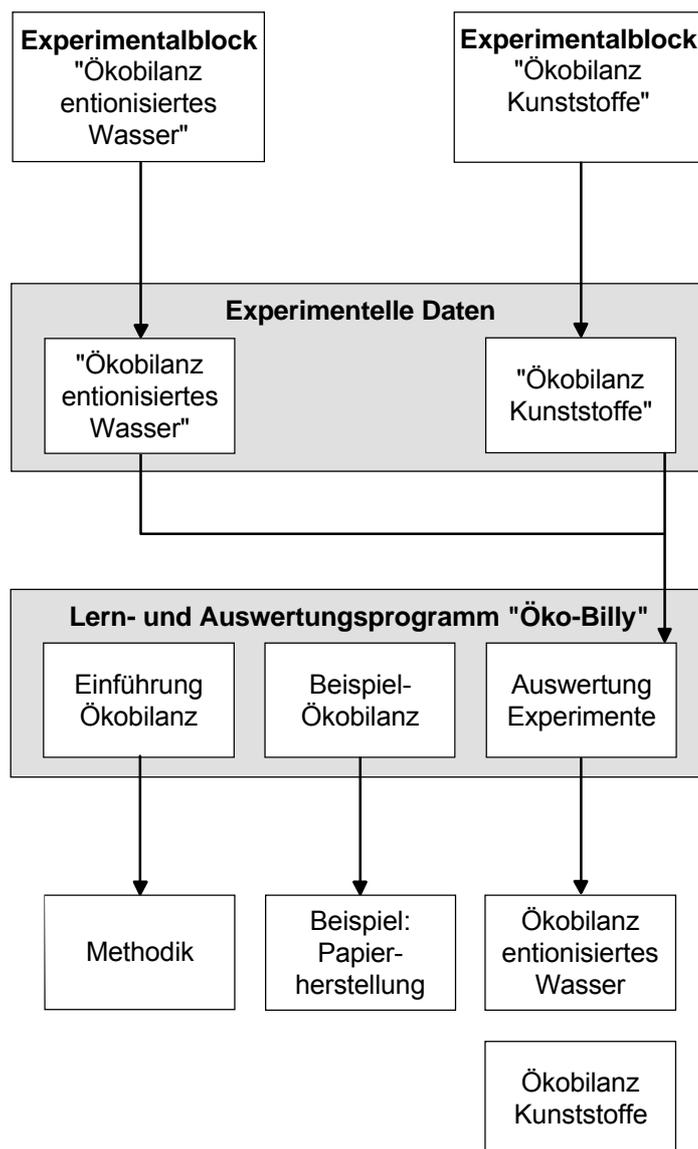
Der zweite Block beinhaltet mehrere Experimente zur Darstellung und zum Recycling von Kunststoffen. Verschiedene Kunststoffe können im Rahmen von Schülerversuchen hergestellt und im kleinen Maßstab werkstofflich, rohstofflich oder energetisch recycelt werden. Neben dem Verbrauch an Energie (Strom, Gas) sind auch Parameter wie Massenverlust in die Atmosphäre oder Abfälle zu erfassen.

Die experimentellen Daten werden in ÖKO-BILLY zusammengeführt und ausgewertet. ÖKO-BILLY ist ein Lern- und Auswertungsprogramm für die schulische Behandlung des Themas Ökobilanzen. Die Schüler können selbständig die von ihnen durchgeführten Experimente auswerten und eine vereinfachte Ökobilanz erstellen. Sie können über Änderungen an den Input-Output-Daten und an den Ökofaktoren die Einflüsse verschiedener Parameter auf das Ergebnis testen. Der Bereich Auswertung umfaßt eine mathematische Berechnungshilfe für die Auswertung der Schulversuche, gegebenenfalls die Umrechnung in geeignete Einheiten sowie abschließend die Erstellung einer Ökobilanz einschließlich grafischer Darstellung der Ergebnisse.

Es stehen somit zwei unterschiedliche Vorgehensweisen für die Behandlung der Thematik Ökobilanzen zur Verfügung, welche alternativ abgearbeitet werden können (Abb. 21):

1. Gesamtkonzeption:
  - a) Experimentalblöcke – ÖKO-BILLY (Einführung, Beispiel und Auswertung)
2. Teile der Konzeption:
  - a) Experimentalblock – ÖKO-BILLY (Auswertung)
  - b) ÖKO-BILLY (Einführung und/oder Beispiel)

Vorteil der Gesamtkonzeption ist eine umfassende und tiefgehende Erarbeitung des Themas. Sie ist jedoch aufgrund der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Experimente zeitlich aufwendiger im Gegensatz zur Behandlung einzelner Teile der Konzeption. Ansatz 2.a umfaßt den Einsatz von Experimenten sowie deren Auswertung. Ansatz 2.b vermag lediglich eine kurze Vorstellung von der Idee der Ökobilanz zu vermitteln und ist daher nicht geeignet, wenn es um praktische Erfahrungen beim Erstellen von Ökobilanzen geht.



**Abb. 21:** Übersicht Konzeption "Thematik Ökobilanzen in Sekundarstufe II"

### 3.7 Checkliste zur Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz im Chemieunterricht der Sekundarstufe II

Die Checkliste dient sowohl zur Planung als auch als Leitfaden für die Durchführung der Ökobilanz im Chemieunterricht. Der auf den DIN-ISO-Normen basierte Ablauf (14040 bis 14043) wurde im Rahmen der Elementarisierung stark vereinfacht und gestrafft.

Ziel war es hierbei, sich zum einen auf die für den Unterricht in der Sekundarstufe II als notwendig angesehenen Inhalte zu beschränken, zum anderen dennoch alle erforderlichen ökobilanztypischen Komponenten (Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung) behandeln zu können.

Die strenge Trennung der einzelnen Punkte innerhalb der Checkliste wurde hier nur aus Gründen der besseren Übersicht vorgenommen. Für den abschließenden Bericht können diese auch zusammengefasst und stichwortartig behandelt werden. Im Einzelfall kann gegebenenfalls auch auf einzelne als momentan für den Unterricht weniger relevant

eingestufte Aspekte verzichtet werden, beispielsweise auf die Beurteilung der Datenqualität.

## **1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**

- 1.1 Ziel der Ökobilanz
- 1.2 Untersuchungsrahmen
  - 1.2.1 Funktionelle Einheit, Referenzfluß
  - 1.2.2 Produktsystem (Beschreibung, Grenzen, Module)
  - 1.2.3 Anforderungen an Daten
    - 1.2.3.1 Erfassungsbereich (zeitlich, geographisch, technologisch)
    - 1.2.3.2 Datenqualität (Genauigkeit, Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz, Nachvollziehbarkeit)
  - 1.2.4 Vergleich der Systeme
- 1.3 Wirkungsabschätzung
  - 1.3.1 Methodik
  - 1.3.2 Auswahl der Wirkungskategorien
- 1.4 Annahmen und Einschränkungen

## **2 Sachbilanz**

- 2.1 Vorbereitung der Datensammlung (Fließbild des Produktsystems, Modulbeschreibung, Quellen)
- 2.2 Sammeln der Daten
- 2.3 Bezug der Daten (auf funktionelle Einheit)
- 2.4 Datenzusammenfassung
- 2.5 Einschätzung der Datenqualität

## **3 Wirkungsabschätzung**

- 3.1 Wahl der Methode
- 3.2 Auswahl der Wirkungskategorien
- 3.3 Klassifizierung (Zuordnung der Sachbilanzdaten zu Wirkungskategorien)
- 3.4 Charakterisierung (Modellierung der Sachbilanzdaten innerhalb der Wirkungskategorien)

## **4 Auswertung**

- 4.1 Ergebnisse der Sachbilanz (Darstellung und Beurteilung; Ermittlung signifikanter Parameter)
- 4.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Darstellung und Beurteilung; Ermittlung signifikanter Parameter)
- 4.3 Qualitative Beurteilung der Datenqualität (siehe 1.2.3.2)
- 4.4 Schlußfolgerungen, Empfehlungen

## **5 Bericht**

- 5.1 Hintergrund (Auftraggeber, Ersteller, Datum)
- 5.2 Beschreibung sowie Ergebnisse der Punkte 1 bis 4

### **3.8 Zusammenfassung des Abschnitts**

Ökobilanzen sind eine Thematik, welche durchaus einen Platz im Sachunterricht und Chemieunterricht einnehmen kann. Wichtig ist eine der Schulstufe angemessene didaktische Reduktion des fachlich sehr umfangreichen und komplexen Stoffes. Je nachdem, wie umfangreich und tiefgehend die theoretische Behandlung im Unterricht erfolgt, können schon Grundschüler an die Thematik herangeführt werden. Hierbei steht aber noch die Ausbildung eines grundlegenden naturwissenschaftlichen Verständnisses im Vordergrund. Mit höherer Schulstufe ist eine zunehmende Vertiefung möglich. Als Schwerpunkt für die unterrichtliche Auseinandersetzung mit Ökobilanzen wird die Sekundarstufe II gesehen, weil hier sowohl die notwendigen fachlichen Voraussetzungen als auch beispielsweise die Fähigkeit zum Denken in Modellen und zur Abstraktion gegeben sind.



## 4 Experimenteller Zugang zum Thema Ökobilanzen

### 4.1 Einführung

Der Chemieunterricht verfügt heutzutage über eine große Zahl von Schulexperimenten aus vielen Bereichen der Chemie. Es fehlt jedoch bislang an geeigneten Versuchen, die als Basis dafür dienen können, unter schulischen Bedingungen eine vereinfachte Ökobilanz zu erstellen. Die wenigen Publikationen, welche sich der Thematik Ökobilanz praktisch nähern, sind ungeeignet, da sie zu schwierig in der Durchführung sind oder keine geeignete Datengrundlage liefern.

- Das *"Umweltbarometer"* von KAHLERT sowie die Versuche zum Recycling unterschiedlicher Verpackungen von BASCHEK sind bereits im Rahmen der methodischen Möglichkeiten für den Chemieunterricht in der Sekundarstufe I vorgestellt worden (Abschnitt 3.5) [107; 106]. Beide zielen jedoch nur auf eine qualitative Betrachtung der Umwelteinwirkungen und geben ergänzend ausgewählte quantitative Angaben.
- STEINER und SCHMELZER entwickelten Schulversuche zur Demonstration der Entstickung und Entschwefelung in Kohlekraftwerken [112]. Die Modellversuche erlauben nach eigenen Aussagen der Autoren jedoch nur eine qualitative ökologische Beurteilung. Ergänzend werden Massenbilanzen zweier bayerischer Kohlekraftwerke gegeben.
- HARSCH und HEIMANN haben mit dem *"Estercyclus"* eine zyklische Abfolge von Reaktionen mit der Absicht erstellt, das *"ressourcenbewußte Denken und Handeln"* bei den Schülern zu schulen [113]. Am Beispiel der alkalischen Hydrolyse von Essigsäureethylester und erneuter Veresterung des Ethanol mit intermediär hergestellter Essigsäure werden eine Stoff- und Energiebilanz des Prozesses erstellt.

Die grundlegenden experimentellen Aspekte der nachfolgend vorgestellten Versuche (Darstellung und Recycling von Kunststoffen, Destillation oder Ionenaustausch) sind bereits vielfach in Schulversuchen behandelt worden. Neu ist jedoch in diesem Zusammenhang die Ausrichtung auf die Thematik Ökobilanz und somit auf das Ziel, brauchbare Sachbilanzdaten in möglichst kurzer Zeit unter möglichst einfachen schulexperimentellen Bedingungen zu erhalten. Die allgemeinen didaktischen Ansprüche an Experimente, wie sie in Kapitel 3 behandelt wurden, sind hierbei ebenfalls zu berücksichtigen.

Unter dem Blickpunkt dieser Kriterien wurden zwei Experimentalblöcke erarbeitet, welche nachfolgend vorgestellt werden:

- Gewinnung von entionisiertem Wasser durch Destillation und Ionenaustausch (Abschnitt 4.2)
- Darstellung und Recycling von Kunststoffen (Abschnitt 4.3)

## 4.2 Entionisiertes Wasser durch Destillation und Ionenaustausch

### Technischer Hintergrund

In der Technik, Chemie und Pharmazie wird oftmals Wasser benötigt, welches eine höhere Reinheit als das sonst zur Verfügung stehende Leitungswasser aufweist. Zur technischen Wasseraufbereitung stehen die Destillation, der Ionenaustausch und die Reverse Osmose (Umkehrosmose) zur Verfügung [114]. Für die folgenden Versuche werden nur die Verfahren der Destillation und des Ionenaustausches eingesetzt, da bei der Umkehrosmose mit hydrostatischen Drücken von zwei bis zehn MPa [115] gearbeitet wird, weshalb dieses Verfahren für die Schule ungeeignet ist.

Es wird ein einführender Versuch zur Destillation vorgestellt, bei dem mehrere unterschiedliche Varianten der Kühlung und Energiezufuhr miteinander verglichen werden, mit dem Ziel, das jeweils optimale Verfahren für das weitere Vorgehen zu finden. Dies wird mit dem Ionenaustausch verglichen, bei dem man ohne Energiezufuhr aber unter Verbrauch von Säuren und Laugen sowie unter Abgabe von Abwasser zu entionisiertem Wasser<sup>15</sup> gelangt.

### Zugänglichkeit der Thematik

Entionisiertes Wasser ist den Schülern im Chemieunterricht von Anfang an als Lösungsmittel vertraut. Im Alltag wird es beispielsweise zum Befüllen von Dampfbügeleisen benutzt. Außerdem fällt es als Abfallprodukt beim Wäschetrocknen im Kondensationswäschetrockner an.

Das Verfahren der Destillation ist Schülern bereits aus dem chemischen Anfangsunterricht aus der schulexperimentellen Trennung eines Alkohol-Wasser-Gemisches oder der Aufbereitung von Salzwasser bekannt. Ebenso ist die fraktionierte Destillation zur Rohölaufbereitung fester Inhalt im Chemieunterricht der Mittelstufe.

Ionenaustauscher sind Schülern oftmals aus dem Umgang mit der häuslichen Geschirrspülmaschine bekannt, bei der in regelmäßigen Abständen Regeneriersalz nachgefüllt werden muß, damit eine Wasserenthärtung im laufenden Spülprozeß gewährleistet ist. Grundlegende Aspekte des Ionenaustausches dürften die Schülern auch von Böden kennen, welche die Eigenschaft haben, als Kationenaustauscher zu wirken. In der Mittelstufe wird vielfach Abwasser mittels Ionenaustausch gereinigt, ohne daß den Schülern der komplexe Aufbau der Austauscherharze bekannt sein muß.

Im nachfolgenden Experimentalblock "Entionisiertes Wasser durch Destillation und Ionenaustausch" werden zunächst die zu der Thematik entwickelten Experimente vorgestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse schulexperimenteller gegenüber industrieller Verfahren erfolgt auf Sachbilanzebene im Anschluß. Auf Grundlage der experimentell erhaltenen Daten kann abschließend eine vereinfachte Ökobilanz erstellt werden. Sie erlaubt lediglich eine Aussage für die zu Grunde gelegten Schulversuche (Ablauf, Maßstab, Umwelteinwirkungen).

---

<sup>15</sup> In dieser Arbeit wird qualitativ nicht zwischen vollentsalztem (deionisiertem, demineralisiertem) Wasser durch Ionenaustausch und entsalztem (destilliertem) Wasser durch Destillation unterschieden. Es wird die gemeinsame Bezeichnung "entionisiert" für das Produkt aus beiden Verfahren verwendet.

### 4.2.1 Einführung in die Problematik - Vorversuch zur Destillation

In diesem einführenden Versuch sollen verschiedene Varianten der Kühlung und der Energiezufuhr für die Destillation getestet werden. Es kommt hier weniger auf die absoluten Ergebnisse an, als darauf, die Schüler mit dem Einfluß unterschiedlicher Parameter (Kühlung, Energiezufuhr) vertraut zu machen.

Ziel dieser Folge von Experimenten ist es, zum einen zu zeigen, daß eine unvollständige Kühlung nicht zu einer vollständigen Kondensation des Wasserdampfes und damit zum Austritt von Dampf aus der Versuchsanordnung führt; zum anderen soll gezeigt werden, daß verschiedene Arten der Energiezufuhr hinsichtlich des Verhältnisses von zugeführter zu theoretisch erforderlicher Energiemenge unterschiedlich ausfallen.

Mit einer optimierten Verfahrensweise soll dann die kontinuierliche Destillation im nächsten Versuch (siehe Abschnitt 4.2.2) durchgeführt werden. Es ist zu beachten, daß es sich hierbei um Schulversuche handelt, welche bezüglich ihrer Ergebnisse nicht unbedingt Rückschlüsse auf den technischen Maßstab zulassen.

#### Geräte:

Zweihals-Rundkolben (100 und 250 ml), Heizpilz (250 ml/120 W), Stockthermometer mit Quickfit, Destillieraufsatz, Vakuumvorstoß (gebogen), Destillationsbrücke, Liebig-Kühler, Reduzierstück, Meßzylinder (25, 50 und 100 ml), Becherglas (500 ml), Siedesteine, Bunsenbrenner, Küchentücher, eventuell Energiemeßgerät (ELV Energie-Monitor EM 94)

#### Durchführung:

Es werden für die Gewinnung von entionisiertem Wasser mehrere Varianten der Energiezufuhr und Kühlung experimentell miteinander verglichen.

Für die Energiezufuhr werden untersucht:

- Bunsenbrenner
- Heizpilz

Für die Kühlung werden betrachtet:

- Kühlung der Destillationsbrücke mit Luft
- Kühlung der Destillationsbrücke mittels nasser Tücher und Wasserbad ("Nasse Kühlung")
- Liebigkühler

Somit stehen sechs experimentelle Kombinationen zur Verfügung, deren Energie- und Wasserverbrauch bestimmt werden.

1. Erwärmung mittels Brenner und Kühlung der Destillationsbrücke mit Luft
2. Erwärmung mittels Brenner und Kühlung der Destillationsbrücke mittels nasser Tücher
3. Erwärmung mittels Brenner und Kühlung über Liebigkühler
4. Erwärmung mittels Heizpilz und Kühlung der Destillationsbrücke mit Luft

5. Erwärmung mittels Heizpilz und Kühlung der Destillationsbrücke mittels nasser Tücher
6. Erwärmung mittels Heizpilz und Kühlung über Liebigkühler

Die sechs unterschiedlichen Apparaturen zur Gewinnung von entionisiertem Wasser werden nacheinander, oder in Schülergruppen auch parallel, aufgebaut. In jeder Apparatur werden 100 ml Wasser in den Destillationskolben gefüllt und entweder mit dem Bunsenbrenner oder dem Heizpilz zum Sieden erhitzt. Es wird ab Siedebeginn jeweils 5 min destilliert.

Die Energie zum Aufheizen des Wassers bis zum Siedebeginn wird vereinfachend nicht erfaßt, um eine schnellere Versuchsdurchführung zu gewährleisten.

Folgende Input-Output-Daten müssen im einzelnen ermittelt werden (als Bezugsgröße wird ein Milliliter Destillat gewählt):

- Destillatmenge
- Verbrauch an Kühlwasser
- Energieverbrauch des Brenners und des Heizpilzes
- Abgabe von Heißwasserdampf

sowie zusätzlich

- Thermische Ausbeute

Die Größen Kühlwasserverbrauch sowie Energiebedarf sind aufgrund des jeweils damit verbundenen Ressourcenverbrauchs bedeutsam. Die Untersuchung einer eventuellen Abgabe von Heißwasserdampf gibt Aufschluß über die Effektivität des Verfahrens, da idealerweise kein Dampf austreten sollte. Die Betrachtung der thermischen Ausbeute erlaubt eine Aussage in ähnlicher Richtung, da diese als das Verhältnis des tatsächlichen Energieverbrauchs für das Aufheizen und Verdampfen einer bestimmten Wassermenge zum theoretischen Energieverbrauch definiert wird. Im Idealfall beträgt die thermische Ausbeute gleich eins. In der Realität ist sie aufgrund von Verlusten bei der Wärmeleitung größer als eins.

### **Hinweise zur Bestimmung des Energieverbrauchs**

Die Zufuhr thermischer Energie erfolgt mittels Bunsenbrenner oder Heizpilz.

Zur Bestimmung des Gasverbrauches des Brenners wird dessen Gasregler in die gewünschte Stellung gebracht. Die Luftzufuhr wird zur Messung geschlossen. Man öffnet die Gaszufuhr und fängt das Gas pneumatisch über einen Schlauch in einem Meßzylinder auf. Es wird die Zeit gemessen, bis der Zylinder mit Gas gefüllt ist. Daraus läßt sich der

Gasverbrauch und somit der Energieverbrauch pro Minute errechnen<sup>16</sup>. Beim Gebrauch des Brenners wird dessen Luftzufuhr dann wie gewünscht geöffnet.

Der Verbrauch an elektrischer Energie durch den Heizpilz kann über die Leistungsangabe auf dem Heizpilz entnommen werden, oder man schaltet ein Energiemeßgerät zwischen Heizpilz und Steckdose.

Für die Berechnung der thermischen Ausbeute müssen sowohl der tatsächliche als auch der theoretische Energieverbrauch bekannt sein. Der theoretische Energieaufwand für die Verdampfung von Wasser ist in diesem Fall gleich dessen Verdampfungsenthalpie, da der Energiebedarf zum Aufheizen vernachlässigt wird ( $\Delta H_{\text{Verd(Wasser)}} = 2.676 \text{ kJ/kg}$  (1 bar, 100 °C)) [116, S. D36].

Die nicht kondensierte Menge an heißem Wasserdampf wird aus der Differenz der noch im Destillationskolben zurückgebliebenen Menge an Wasser und der Menge an Destillat ermittelt. Hierbei kann es zu Fehlbestimmungen ("negative" Mengen) kommen, wenn die abgegebene Wasserdampfmenge sehr gering ist und eventuell noch im Liebigkühler vorhandenes Destillat trotz bereits abgestellter Energiezufuhr nachfließt. In diesem Fall wird die freigewordene Menge an Heißwasserdampf auf Null gesetzt.

### **Hinweise zur Bestimmung des Kühlwasserverbrauchs**

Eine Kühlung kann mit Hilfe von Luft, nassen Tüchern oder einem Liebigkühler vorgenommen werden.

Bei einer Kühlung mittels Luft wird kein Kühlwasser benötigt, da mit einer einfachen Destillationsbrücke gearbeitet wird.

Für eine Kühlung mittels nasser Tücher wird die Destillationsbrücke mit zwei bis drei Lagen Küchentücher umwickelt und mittels einer Spritzflasche feucht gehalten. Das Wasser, welches am unteren Ende des Kühlers wieder aus den Tüchern herausfließt, kann in einer Schüssel aufgefangen werden (eine Gutschrift erfolgt jedoch nicht). Es sollte ferner darauf geachtet werden, daß beim Kühlen kein Wasser in den Heizpilz fließt. Zusätzlich steht der kleinere Kolben in einem Wasserbad (dessen Wassermenge nicht berücksichtigt wird).

Die Durchflußmenge des Kühlwassers durch einen Liebigkühler kann in einfacher Weise dadurch bestimmt werden, daß der Durchfluß von einer Minute in einem geeigneten Meßzylinder aufgefangen und bestimmt wird.

### **Ergebnis:**

Je nach Wahl der Energiezufuhr und der Kühlung ist die entstehende Destillatmenge unterschiedlich. Sie ist am niedrigsten, wenn nur mit Luft gekühlt wird. Hierbei kommt es zum Austritt von Wasserdampf aus der Apparatur (je nach Menge besteht sogar die Gefahr der Verbrühung). Werden zur Kühlung nasse Tücher oder ein Liebigkühler

---

<sup>16</sup> Die Verbrennungsenthalpie von Methan beträgt  $\Delta H_{\text{Verbr(Methan)}} = -890,8 \text{ kJ/mol}$  [117, Kap. 5, S. 89]. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung errechnet sich ein Molvolumen von 24,5 l bei einer Temperatur von 25 °C.

verwendet, steigt die Destillatmenge. Bei Verwendung eines Liebigkühlers ist kein Austritt von Wasserdampf mehr zu beobachten, jedoch nimmt der Wasserverbrauch deutlich zu.

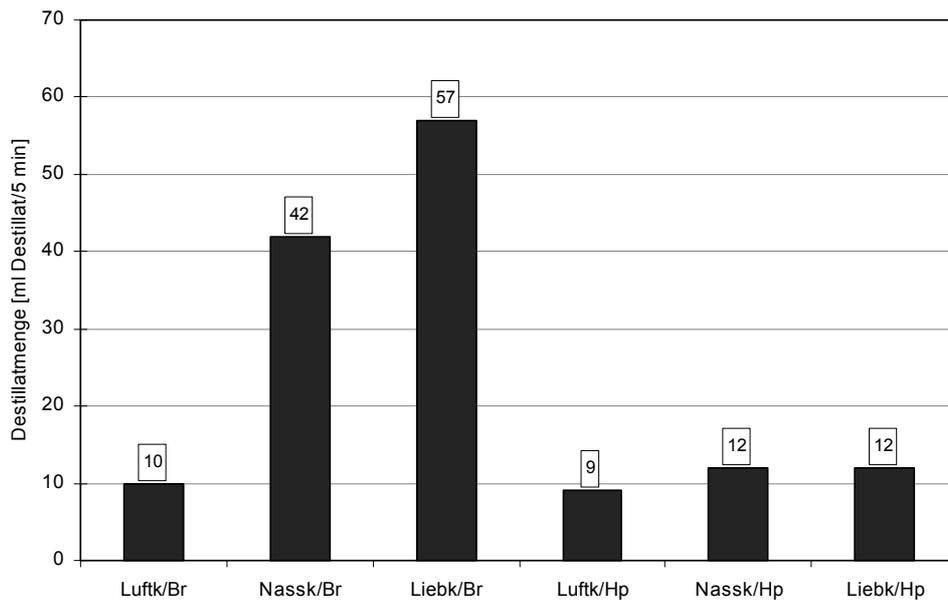
Die nachfolgende Tab. 9 zeigt typische Meßwerte einer Versuchsreihe, welche zum besseren Verständnis in den Abbildungen 22 bis 26 teilweise grafisch umgesetzt sind<sup>17</sup>. Bis auf Abb. 22 (Destillatmenge pro 5 Minuten) sind alle Angaben in den Grafiken auf 1 ml Destillat bezogen.

**Tab. 9:** Ergebnisse der Destillation (Vorversuch)

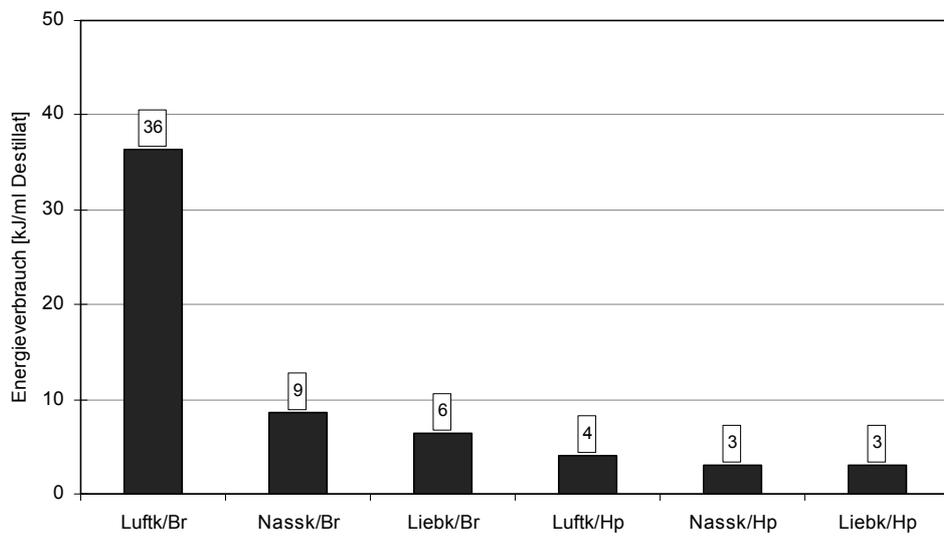
	Luftkühlung/ Brenner	Nasse Kühlung/ Brenner	Liebigkühler/ Brenner	Luftkühlung/ Heizpilz	Nasse Kühlung / Heizpilz	Liebigkühler / Heizpilz
Destillatmenge [ml/(5 min)]	10	42	57	9	12	12
Energieverbrauch [kJ/(5min)]	364	364	364	36	36	36
Energieverbrauch [kJ/(ml Destillat)]	36,4	8,7	6,4	4,0	3,0	3,0
Kühlwasserverbrauch [ml/(5min)]	0	700	2500	0	600	2500
Kühlwasserverbrauch [ml/(ml Destillat)]	0	16,7	43,9	0	50,0	208,3
Abgabe Heißwasserdampf [kJ/(5min)]	37,0	17,0	3,0	2,0	0	0
Abgabe Heißwasserdampf [kJ/(ml Destillat)]	3,7	0,4	0,1	0,2	0	0
thermische Ausbeute [-]	13,6	3,2	2,4	1,5	1,1	1,1

<sup>17</sup> Erläuterung der Abkürzungen für die Grafiken des Vorversuchs (Abb. 22 bis 26)

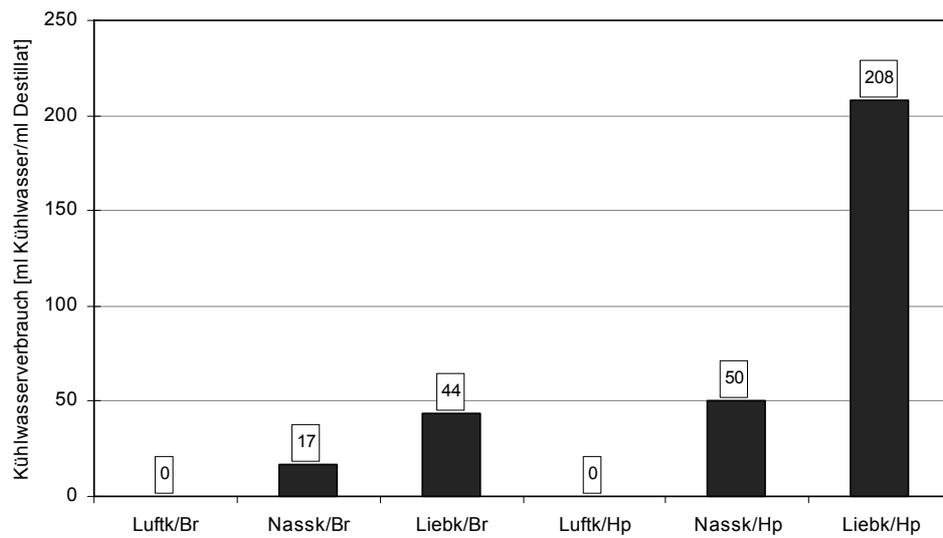
Abkürzung	Bedeutung
Luftk	Kühlung mit Luft
Nassk	"Nasse Kühlung" mittels nasser Tücher und Wasserbad
Liebk	Kühlung mittels Liebigkühler
Br	Heizen mit Bunsenbrenner
Hp	Heizen mit Heizpilz



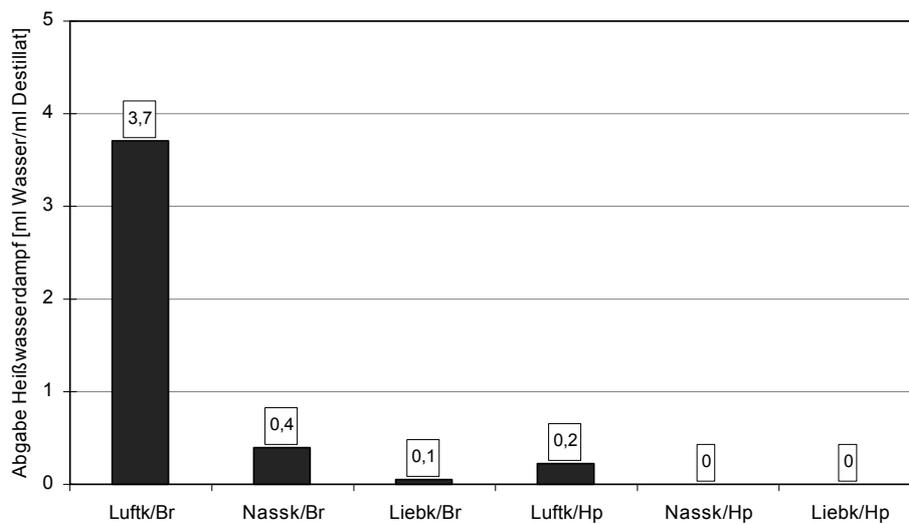
**Abb. 22:** Destillatmenge [ml/5 min] für verschiedene Varianten der Destillation



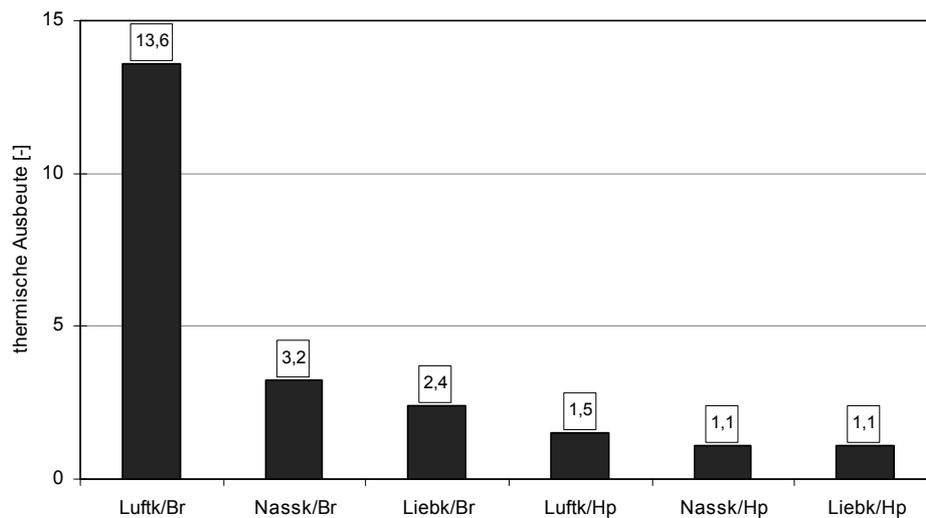
**Abb. 23:** Energieverbrauch [kJ/ml Destillat] für verschiedene Varianten der Destillation



**Abb. 24:** Kühlwasserverbrauch [ml Kühlwasser/ml Destillat] für verschiedene Varianten der Destillation



**Abb. 25:** Abgabe Heißwasserdampf [ml Wasser/ml Destillat] für verschiedene Varianten der Destillation



**Abb. 26:** Thermische Ausbeute für verschiedene Varianten der Destillation (nur Verdampfen)

### Auswertung:

Im Rahmen dieses Schulversuches zur Destillation wurden verschiedene Methoden der Erwärmung (Bunsenbrenner, Heizpilz) und der Kühlung (Kühlung mit Luft, "nasse Kühlung" mittels nasser Tücher, Liebigkühler) miteinander verglichen. Es wurden die Input-Output-Faktoren Destillatmenge, Verbrauch an Kühlwasser, Energieverbrauch des Brenners und des Heizpilzes sowie die Abgabe von Heißwasserdampf erfaßt. Ferner wurde die thermische Ausbeute ermittelt. Die nachfolgende Auswertung erfolgt aus Schülersicht.

Im Vergleich zum Heizen mit Hilfe eines Heizpilzes ist die Destillatmenge bei Verwendung eines Brenners höher (Abb. 22). Über einen Brenner kann im gleichen Zeitraum vergleichsweise viel an thermischer Energie zugeführt werden, besonders wenn - wie hier - die elektrische Leistung des Heizpilzes gering ist. Entsprechend der größeren durch den Brenner zugeführten Energiemenge verdampft auch mehr an Wasser.

Die Erwärmung mittels Heizpilz ist jedoch das effizientere Verfahren. Der relative Energieverbrauch ist bei Verwendung eines Heizpilzes deutlich niedriger (Abb. 23). Bei Einsatz eines Brenners wird nicht nur der Kolben erwärmt, sondern heiße Verbrennungsgase und erwärmte Luft streichen ungenutzt an der Apparatur vorbei. Es wird also Energie verschwendet. Beim Heizpilz entfällt dieser Nachteil, da direkt über die Glaswand das im Destillationskolben vorhandene Wasser erhitzt wird. Dies spiegelt sich in der thermischen Ausbeute wieder (Abb. 26). Am ungünstigsten erweist sich das Verfahren der Luftkühlung und Erwärmen mit einem Bunsenbrenner. Besser ist stets die Beheizung mit einem Heizpilz, welche gerade in Verbindung mit einer optimierten Kühlung die niedrigste thermische Ausbeute zeigt.

Zwar steigt - wie zu erwarten - der Kühlwasserverbrauch mit verbesserter Kühlung stark an (Abb. 23), jedoch führt dies nicht nur zu einer Erhöhung der Destillatmenge (Abb. 22), sondern auch zu einer verringerten Abgabe von Heißwasserdampf (Abb. 25). Will man also die Verschwendung von thermischer Energie durch das ungenutzte Entweichen von

heißem Dampf eindämmen und im Gegenzug mehr Destillat gewinnen, dann muß die Kühlung durch Einsatz von Kühlwasser verbessert werden. Zur Optimierung des Verfahrens kann es im Kreislauf geführt werden und wäre also nicht ständig zu erneuern. Eine Alternative wäre eine sehr langsame Destillation, so daß auch eine schlechte Kühlung ausreicht, den entstehenden Dampf zu kondensieren.

Unter dem Gesichtspunkt der Ökobilanzierung erlaubt dieser Versuch lediglich eine Betrachtung auf Sachbilanzebene. Zwar lassen sich schon aufgrund dieser Ergebnisse Rückschlüsse auf die Vor- und Nachteile der Destillation sowie der untersuchten Varianten der Energie- und Kühlwasserzufuhr ziehen. Für die Aufstellung einer Ökobilanz ist es jedoch erforderlich, über die Betrachtung der Umwelteinwirkung (z. B. Verbrauch an Energie und Kühlwasser) hinsichtlich der Ermittlung der Umweltbelastungen hinauszugehen (welche potentiellen Schäden sind in der Umwelt zu erwarten?). Interessant wäre ferner - in Anlehnung an die technische Praxis - die Betrachtung eines kontinuierlich arbeitenden Destillationsverfahrens. Weiterhin wären der Einfluß verschiedener Heizpilzgrößen (mit jeweils unterschiedlicher Leistung) auf den Energieverbrauch sowie die Abwärme zu betrachten, da dieser Aspekt hier nicht untersucht wurde. In diesem Zusammenhang sollte auch der primärenergetische Aufwand zur Bereitstellung des elektrischen Stroms berücksichtigt werden. Da die Destillation nicht das einzige Verfahren zur Herstellung von entionisiertem Wasser ist, wäre darüber hinaus ein Vergleich mit anderen Verfahren zur Wasseraufbereitung (z. B. Ionenaustausch) von Interesse. Diese o.g. Ziele sollen mit dem nächsten Versuch zur Aufstellung einer vereinfachten Ökobilanz zur Herstellung von entionisiertem Wasser erreicht werden.

#### 4.2.2 Die kontinuierliche Destillation von Trinkwasser

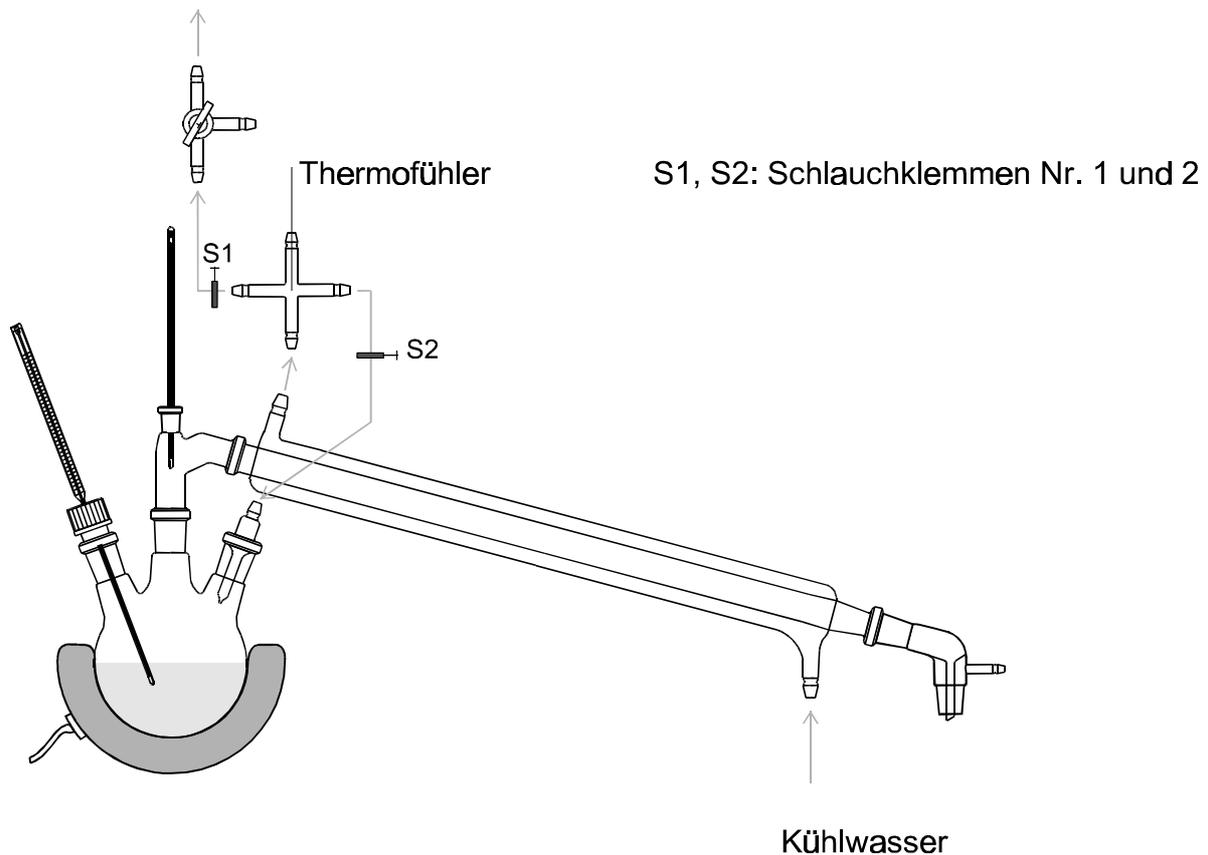
Aufbauend auf dem vorangegangenen Versuch, bei dem unterschiedliche Verfahren der Energiezufuhr und Kühlung für die Destillation getestet wurden, soll nun ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren betrachtet werden. Basis ist eine Destillationsapparatur aus Rundkolben, Destillieraufsatz, Liebig-Kühler und Vakuumvorstoß. Es wird mit vier laborgängigen Größen für Heizpilze und Destillationskolben gearbeitet (100, 250, 500 und 1.000 ml). Die Kühlung erfolgt ausschließlich über einen wassergekühlten Liebigkühler. Kühler und Destillationskolben sind miteinander verbunden, so daß der Wasserstand im Kolben während der laufenden Destillation immer wieder durch Entnahme von warmem Kühlwasser ausgeglichen werden kann.

##### Geräte:

Dreihals-Rundkolben (100, 250, 500 und 1.000 ml), Heizpilze (100 ml/100 W, 250 ml/120 W, 500 ml/200 W und 1.000 ml/300 W), Destillieraufsatz, Vakuumvorstoß (gebogen), Liebig-Kühler, Meßzylinder (10 und 50 ml), 4-Wege-Glasstück, 3-Wege-Hahn, 2 Schlauchklemmen, Schlauchschellen, Siedekapillare (gekürzt), Stockthermometer mit Quickfit, Übergangsstücke (Kern-Hülse), Normschliff-Thermometer (NS 14,5), Aluminiumfolie, Siedesteine, digitales Temperaturmeßgerät (LEIPOLD HERAEUS Nr. 666 210) mit NTC Widerstandselement (Meßbereich -20 bis +120°C), eventuell Energiemeßgerät (ELV Energie-Monitor EM 94)

**Durchführung:**

Die Destillationsapparatur wird entsprechend Abb. 27 aufgebaut. Das Kühlwasser wird nach dem Durchlauf durch den Kühler zu einem 4-Wege-Stück geleitet, an dem ein Thermofühler die Temperatur mißt. Die Befüllung des Kolbens erfolgt über die gekürzte Siedekapillare. Auf diese Weise kann das Befüllen mit bereits vorgeheiztem Kühlwasser erfolgen und der Rundkolben muß zu diesem Zweck nicht geöffnet werden. Die Destillation wird somit kontinuierlich betrieben.



**Abb. 27:** Aufbau der Destillationsapparatur und Kühlwasserführung

Mit Hilfe der Schlauchklemme S 2 wird der Wasserzufluß so eingestellt, daß der Wasserstand konstant bei 50 % der maximalen Füllmenge bleibt. Bei niedriger Durchlaufmenge muß durch leichtes Zudrehen der Schlauchklemme S 1 ein geringer Druck aufgebaut werden, so daß eine Befüllung erfolgen kann. Die Füllhöhe im Kolben sollte konstant gehalten werden.

Die Messung der Kühlwassertemperatur dient dazu, die Abwärme zu erfassen. Für eine exakte Temperaturmessung mit dem Thermofühler ist darauf zu achten, die Schlauchverbindung zwischen Kühler, Thermofühler und Siedekapillare möglichst kurz zu halten.

Das Destillat wird im Meßzylinder aufgefangen. In den Kolben werden vor Beginn der Destillation zwei bis drei Siedesteine gegeben. Rundkolben und Destillieraufsatz werden zur Isolation mit Aluminiumfolie umwickelt.

Für jede Heizpilzgröße sind bei den Durchflußmengen 25, 50, 75 und 100 ml/min folgende Input-Output-Faktoren zu erfassen (jeweils in 5-Minuten-Abständen):

- die Destillatmenge
- die Erwärmung des Kühlwassers
- der Verbrauch an Kühlwasser
- der Energieverbrauch des Heizpilzes

Die Durchflußmengen sind so gewählt, daß sie zum einen im unteren Bereich des Kühlwasserverbrauchs liegen, zum anderen aber gerade noch meßbar sind. Drei bis fünf Meßwerte sind pro Durchgang ausreichend. Es sollte darauf geachtet werden, daß die Ausgangstemperatur des Kühlwassers während des Versuchs annähernd gleich bleibt.

Für die Ermittlung des Energieverbrauchs kann als gute Näherung die Angabe der Leistung (Watt) auf dem Heizpilz genommen werden, welche für die Versuchsdauer als konstant angesehen wird. Für eine genauere Bestimmung wird ein Energiemeßgerät zwischen Heizpilz und Steckdose geschaltet.

Zur exakten Einstellung des Wasserdurchflusses hat sich ein zwischen Wasserhahn und Liebigkühler geschalteter Dreiwegehahn bewährt. Die Durchflußmenge des Kühlwassers kann dadurch bestimmt werden, daß der Durchfluß von 30 oder 60 sec im Meßzylinder aufgefangen wird. Die Kühlwassermenge sollte während eines Versuchsdurchlaufes konstant gehalten werden.

Der Verbrauch an Kühlwasser und elektrischer Energie wird zur Auswertung auf 1 ml Destillat umgerechnet. Die mit dem erwärmten Abwasser abgeführte Energiemenge (Abwärme) wird aus der gemessenen Temperatur des Kühlwassers wie folgt errechnet:

$$W = C_p \times m \times \Delta T$$

$W$  Mit dem Kühlwasser abgegebene Energiemenge (bezogen auf 1 ml Destillat) [J]

$C_p$  Spezifische Wärmekapazität von Wasser bei konstantem Druck [J/g\*K]

$m$  Kühlwassermenge pro ml Destillat [g/ml Destillat]

$\Delta T$  Temperaturdifferenz zwischen dem ein- und ausfließenden Kühlwassers [K]

Bei der Berechnung wird beispielhaft von einer Eingangstemperatur für das Kühlwasser von 10 °C ausgegangen (alternativ kann auch die aktuell gemessene Wassertemperatur verwendet werden). Für  $C_p$  wurde für den Temperaturbereich von 10 bis 50 °C ein Wert von 4,18 J/(g\*K) errechnet [117, Kap. 6, S. 3], welcher für die Schule eine ausreichende Genauigkeit besitzt. Für die Kühlwassermenge  $m$  wurde eine Dichte von 1,0 g/cm<sup>3</sup> angenommen, so daß die Masse in Gramm gleich dem Volumen in Milliliter ist.

Die Auswertung erfolgt aus Schülersicht.

**Ergebnis:**

Tab. 10 gibt eine Übersicht über die erhaltenen Ergebnisse der Destillation. Leichte Schwankungen in den Angaben zum Energieverbrauch sind durch Meßungenauigkeiten und Rundung bedingt. Die fünf wichtigen Größen Destillatmenge, Verbrauch an elektrischer Energie, Verbrauch an Kühlwasser sowie dessen Endtemperatur und Abwärme werden als Blockdiagramm gegen die Durchflußmenge aufgetragen (Abb. 28 bis Abb. 31).

**Tab. 10:** Ergebnisse der Destillation

Größe Rundkolben / Heizpilz [ml]	Durchflußmenge Kühlwasser [ml/min]	Verbrauch Kühlwasser [ml/ml Destillat]	Verbrauch elektrische Energie [Wh/min]	Verbrauch elektrische Energie [kJ/ml Destillat]	Endtemperatur Kühlwasser [°C]	Abwärme [kJ/ml Destillat]	Destillatmenge [ml Destillat/min]
100	25	21	1,3	3,9	25,3	1,3	1,2
	50	38	1,3	3,6	23,0	2,1	1,3
	75	58	1,3	3,6	20,6	2,6	1,3
	100	77	1,3	3,6	19,0	2,9	1,3
250	25	10	2,0	3,0	34,3	1,1	2,4
	50	20	1,9	2,7	28,5	1,5	2,5
	75	31	1,9	2,9	25,2	2,0	2,4
	100	42	2,0	3,0	22,7	2,2	2,4
500	25	7	3,3	3,1	48,2	1,1	3,8
	50	13	3,3	3,0	38,6	1,5	3,9
	75	20	3,4	3,3	32,7	1,9	3,7
	100	26	3,3	3,1	29,4	2,1	3,8
1.000	25	4	5,0	2,8	54,6	0,7	6,4
	50	8	5,0	2,8	49,2	1,3	6,4
	75	12	5,0	2,8	42,8	1,6	6,4
	100	16	5,0	2,8	37,9	1,8	6,4

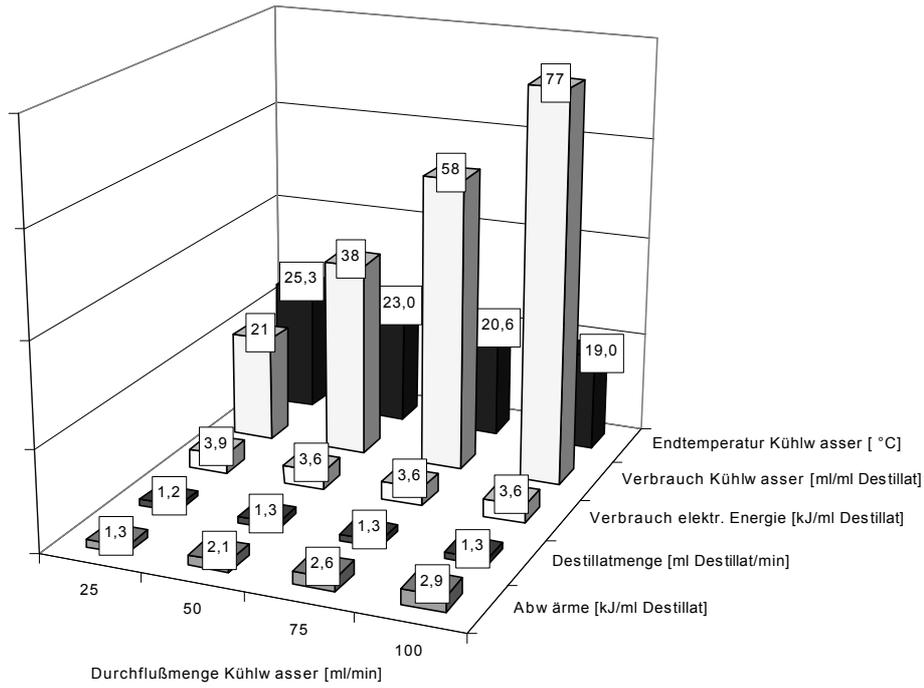


Abb. 28: Ergebnisse der Destillation mit 100-ml-Rundkolben

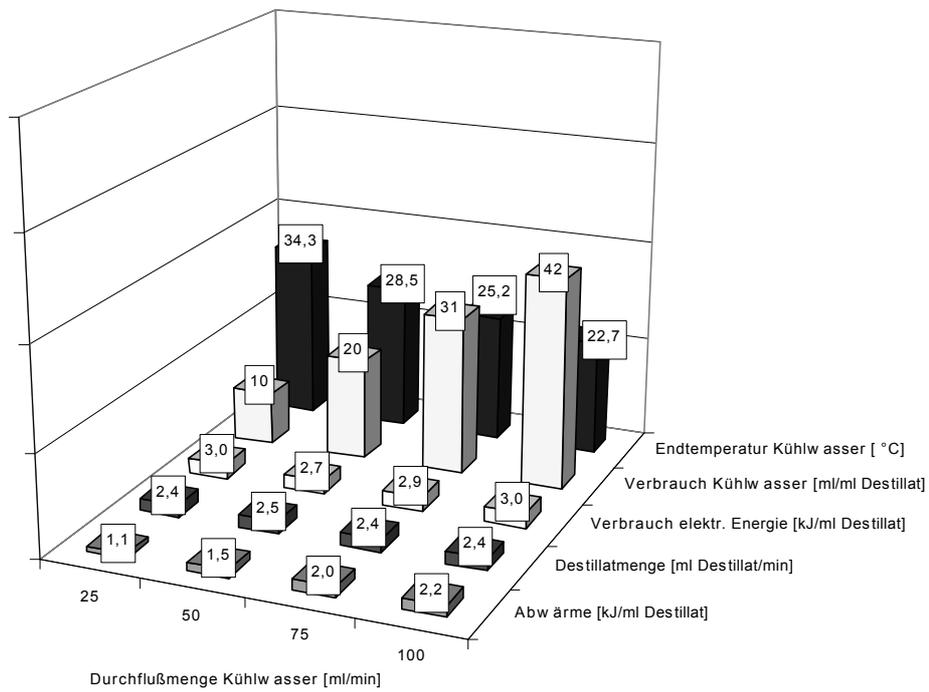


Abb. 29: Ergebnisse der Destillation mit 250-ml-Rundkolben

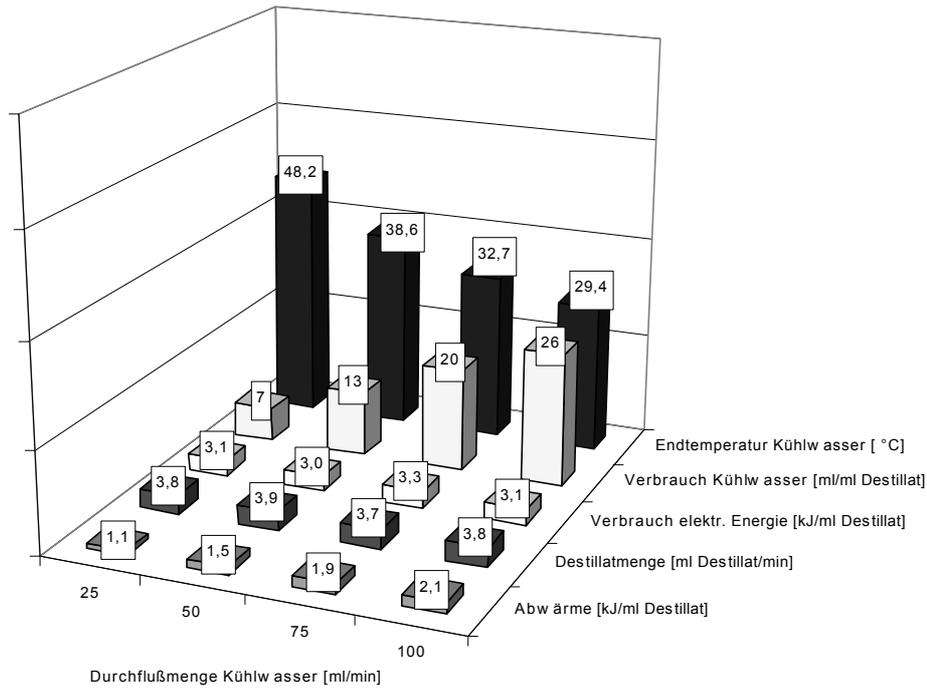


Abb. 30: Ergebnisse der Destillation mit 500-ml-Rundkolben

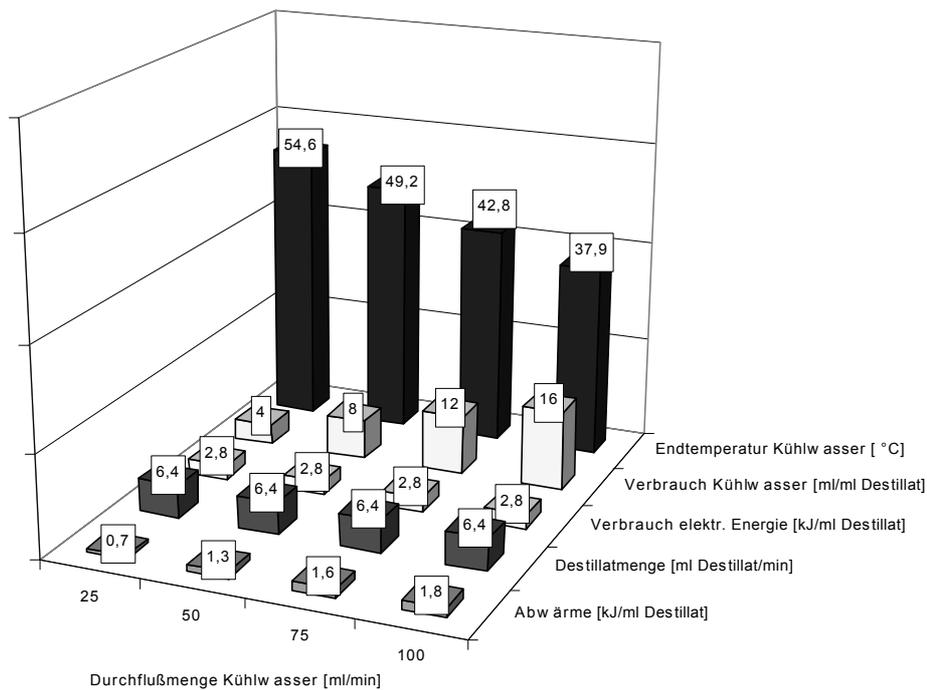


Abb. 31: Ergebnisse der Destillation mit 1-Liter-Rundkolben

**Auswertung:**

Für jede Rundkolben- bzw. Heizpilzgröße gilt, daß mit zunehmender Kühlwassermenge die Endtemperatur des Kühlwassers abnimmt. Je größer die Durchflußmenge des Kühl-

wassers pro Zeiteinheit ist, umso größer ist die Durchflußgeschwindigkeit und umso geringer die Erwärmung des Kühlwassers.

Mit zunehmender Kühlwassermenge steigt die mit dem Kühlwasser abgeführte Abwärmemenge an. Je größer die Durchflußmenge des Kühlwassers, umso mehr Wärme kann in gleicher Zeit abtransportiert werden.

Die Destillatmenge und der Verbrauch an elektrischer Energie bleiben annähernd konstant.

Für einen Vergleich der Ergebnisse untereinander wird der kleinste Kolben als Bezugsgröße gleich 1 gesetzt und es wird vom geringsten Kühlwasserdurchfluß ausgegangen (25 ml/min, Tab. 11). Dabei zeigt sich, wie erwartet, daß mit zunehmender Größe des Rundkolbens mehr Destillat gewonnen wird. Die Destillatmenge hängt in erster Linie von der Heizleistung des Heizpilzes ab. Obwohl der 1 l-Rundkolben das zehnfache Volumen des 100 ml Kolbens besitzt, erhält man dennoch nur die fünffache Destillatmenge.

Größere Heizpilze haben einen absolut höheren Energieverbrauch als kleinere, da der absolute Energieverbrauch mit zunehmender Größe ansteigt. Der relative Energieverbrauch nimmt dagegen gering ab. Am günstigsten ist dabei der 1.000 ml-Kolben.

Der Verbrauch an Kühlwasser nimmt mit zunehmender Kolbengröße ab. Die hohe Destillationsleistung ist aber auch für die starke Erwärmung des Kühlwassers verantwortlich. Mehr Wasserdampf heizt eine gleiche Menge an Kühlwasser stärker auf. Da jedoch die Destillatmenge ansteigt, nimmt die mit dem Kühlwasser mitgeführte Abwärme bezogen auf die Destillatmenge ab. Hierbei ist zu bedenken, daß der Kühlwasserdurchfluß auf die minimale Menge von 25 ml/min festgelegt wurde.

**Tab. 11:** Vergleich unterschiedlicher Kolbengrößen auf Basis der Input-Output-Daten

Input-Output-Daten		Rundkolben			
		100 ml	250 ml	500 ml	1.000 ml
1	elektrische Leistung der Heizpilze [Wh]	1	1,5	2,5	3,8
2	Verbrauch elektrischer Energie [kJ/min]	1	1,5	2,5	3,8
3	Verbrauch elektrischer Energie [kJ/ml Destillat]	1	0,8	0,8	0,7
4	Verbrauch Kühlwasser [ml/ml Destillat]	1	0,5	0,3	0,2
5	Endtemperatur Kühlwasser [°C]	1	1,4	1,9	2,2
6	Abwärme [kJ/ml Destillat]	1	0,8	0,8	0,5
7	Destillatmenge [ml/min]	1	2,0	3,2	5,3

Der 100 ml-Rundkolben ist gleich eins gesetzt. Es wurde von der geringsten Kühlwasserdurchflußmenge (25 ml/min) ausgegangen.

Zusammenfassend erweist sich der 1 Liter-Rundkolben am günstigsten. Er zeigt den günstigsten Verbrauch an Energie- und Kühlwasser sowie die geringste Abwärme. Zudem

liefert er die meiste Menge an Destillat. Daher wird dieser stellvertretend für das Verfahren der Destillation herangezogen.

Somit ergeben sich für das Verfahren der Destillation folgende Input-Output-Daten (Tab. 12). Der Verbrauch an elektrischer Energie ist zusätzlich auch als Primärenergie angegeben (siehe Abschnitt 2.6.2).

**Tab. 12:** Input-Output-Daten für die Destillation

Angaben gelten für den 1 Liter-Rundkolben bei einer Kühlwassermenge von 25 ml/min (1 g Destillat entspricht 1 ml)

	Destillation
INPUT	
Leitungswasser [g/g Destillat]	1
Kühlwasser [g/g Destillat]	4
Energieverbrauch (elektrischer Strom) [kJ/ g Destillat]	2,8
Energieverbrauch (Primärenergie) [kJ/ g Destillat]	8,1
OUTPUT	
Abwärme [kJ/ g Destillat]	0,7
Destillat [g]	1

### 4.2.3 Der Ionenaustausch zur Gewinnung von entionisiertem Wasser

Der Ionenaustausch ist ein neben der Destillation das zweite hier untersuchte Verfahren zur Gewinnung von entionisiertem Wasser aus Trinkwasser<sup>18</sup>. Ionenaustauscher sind feste Stoffe, die aus einer Elektrolytlösung Anionen oder Kationen aufnehmen und im Austausch dafür eine äquivalente Menge anderer Ionen gleicher Ladung abgeben.

Die im Trinkwasser enthaltenen Kationen und Anionen können mit einem hintereinandergeschaltetem Kationen- und Anionenaustauscher nahezu vollständig entfernt werden. In einem Kationenaustauscher werden Kationen gegen Protonen ausgetauscht, im Anionenaustauscher erfolgt ein Austausch der Anionen gegen Hydroxidionen. Das Wasser wird entsalzt.

Bevor der eigentliche Versuch zur Vollentsalzung von Trinkwasser durchgeführt werden kann, ist es erforderlich, das Ionenaustauscherharz zu waschen und zu regenerieren (Abschnitt 4.2.3.1). Da ein Ionenaustauscher nur eine bestimmte nutzbare Austauscherkapazität hat, ist es vor dem Austausch notwendig, den Gesamtsalzgehalt im Wasser zu

<sup>18</sup> Die Bezeichnung "Trinkwasser" wird für jenes Wasser verwendet, welches von den Wasserwerken an die Verbraucher abgegeben wird. Mit "aqua dest." wird das zum Waschen des Ionenaustauschers verwendete entionisierte Wasser definiert.

bestimmen (Abschnitt 4.2.3.2). Aus dem Gesamtsalzgehalt sowie der vom Hersteller angegebenen Austauscherkapazität läßt sich dann ermitteln, wieviel Trinkwasser mit einer bestimmten Menge an Ionenaustauscher entsalzt werden können (Abschnitt 4.2.3.3). Abschließend muß der Ionenaustauscher wieder regeneriert werden (Abschnitt 4.2.3.4).

Die Vorbehandlung des Ionenaustauscherharzes sowie die Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes des zu behandelnden Wassers können im Rahmen der Unterrichtsvorbereitung vom Lehrer durchgeführt werden. Sie gehen nicht in die Ökobilanz ein. Alternativ kann zur Ermittlung des Gesamtsalzgehaltes, welcher hier mittels Kationenaustausch erfolgt, auch auf eine aktuelle chemische Analyse des betreffenden Trinkwassers auf den Gehalt an Kationen und Anionen zurückgegriffen werden.

#### 4.2.3.1 Vorbereitung und Behandlung der Austauscherpackung

Der Einsatz eines Ionenaustauschers bedarf einiger zeitlicher Vorbereitung. Hier wird kurz die Vor- und Nachbehandlung einer Ionenaustauscherpackung beschrieben.

##### Geräte:

2 Chromatographiesäulen mit Hahn (Höhe 50 cm, Innendurchmesser 1,2 cm), 2 Bechergläser (250 ml)

##### Chemikalien:

Amberlite MERCK IR-120 (stark saurer Kationenaustauscher), Amberlite Merck IRA-416 (stark basischer Anionenaustauscher), Schwefelsäure  $w(\text{H}_2\text{SO}_4)=3\%$  (ätzend, C), Natronlauge  $w(\text{NaOH})=3\%$  (ätzend, C), Glaswolle

##### Durchführung:

Für die folgenden Versuche sind zwei Austauscherpackungen (Kationen- und Anionenaustauscher) mit gleicher Austauscherkapazität (hier 21,25 mval) herzustellen. Dafür läßt man in einem Becherglas 10,00 g (Schüttgewicht) des Kationenaustauschers, in einem anderen 11,02 g (Schüttgewicht) des Anionenaustauschers für mindestens zwei Stunden unter 100 ml aqua dest. quellen. Danach gibt man beide Austauscher in die leicht schräg gehaltene Säule. Der Austauscher sollte stets mit Wasser bedeckt bleiben, damit keine Luftblasen eingeschlossen werden. Zum Abschluß wird der obere Rand des Austauschers mit etwas Glaswolle bedeckt, damit beim Einfüllen in die Säule der Austauscher nicht aufgewirbelt wird. Die Säule wird einige Male mit aqua dest. gewaschen. Das Waschen ist auch nach jedem Beladen notwendig, um überschüssige Reagenzlösung aus dem Ionenaustauscherharz zu entfernen.

Durch das Regenerieren wird der Austauscher wieder in seinen ursprünglichen Zustand überführt. Dazu wird der Kationenaustauscher mit dreiprozentiger Schwefelsäure (oder Salzsäure) und der Anionenaustauscher mit dreiprozentiger Natronlauge in die  $\text{H}^+$ - beziehungsweise  $\text{OH}^-$ -Form überführt. Abschließend erfolgt ein Waschen der Austauscherpackung.

Der verwendete Anionenaustauscher muß vor dem ersten Gebrauch mit dreiprozentiger Natronlauge von der  $\text{Cl}^-$ -Form in die  $\text{OH}^-$ -Form überführt werden.

#### 4.2.3.2 Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes durch Kationenaustausch

Die Summenbestimmung der Kationen- beziehungsweise Anionenäquivalente erfolgt durch einen Kationenaustausch der Wasserprobe. Die Schwierigkeit dabei ist die Pufferung durch Hydrogencarbonationen. Diese puffern die im Kationenaustausch abgegebenen Protonen ab. Daher wird vor dem Ionenaustausch durch Zugabe einer ausreichenden Menge Salzsäure und anschließendes Erhitzen das Hydrogencarbonat als Kohlendioxid aus der Lösung getrieben [nach 118, S. 46 f.; 119, S. 290 ff.].

Durch Rücktitration mit einer Natronlauge-Maßlösung wird der Gehalt an Protonen sowohl vor dem Ionenaustausch als auch danach ermittelt. Die Differenz entspricht der Menge an ausgetauschten Kationen.

##### Geräte:

Fertige Kationenaustauschersäule (aus 4.2.3.1), 10 ml Bürette mit seitlichem Hahn, 3 Erlenmeyerkolben (250 ml), Magnetprüher mit Heizplatte, Magnetprührstübchen, Thermometer, Vollpipetten (5 ml, 10 ml, 50 ml und 100 ml)

##### Chemikalien:

TITRISOL Salzsäure  $c(\text{HCl})=0,1 \text{ mol/l}$  (ätzend, C), TITRISOL Natronlauge  $c(\text{NaOH})=0,1 \text{ mol/l}$  (ätzend, C), pH-Indikatorlösung (MERCK Universalindikator pH 4-10, entzündlich)

##### Durchführung:

100 ml der zu bestimmenden Trinkwasserprobe werden mit 10 ml TITRISOL Salzsäure versetzt und in einem Erlenmeyerkolben unter Rühren auf 90 bis 95 °C erhitzt. Sobald die Temperatur erreicht ist, wird die Lösung von der Heizplatte genommen und vorsichtig unter fließendem kaltem Wasser auf 20 bis 30 °C abgekühlt.

55 ml der Lösung werden direkt mit TITRISOL Natronlauge gegen MERCK Universalindikator (15 Tropfen) rücktitriert (Wert a). Die anderen 55 ml läßt man zunächst über den Kationenaustauscher laufen. Die Austauschermenge beträgt ca. 1 Tropfen pro Sekunde. Es wird mit dreimal 20 ml aqua dest. nachgewaschen. Der gesamte Durchlauf (das von Kationen befreite Wasser sowie das Waschwasser) werden nun ebenfalls mit TITRISOL Natronlauge gegen MERCK-Universalindikator (20 Tropfen) titriert (Wert b).

##### Ergebnis:

Den Verbrauch an Natronlauge beider Titrationen, also vor und nach dem Ionenaustausch, setzt man nun zueinander in Beziehung.

Für den Gehalt an Kationen  $M_k$  in einem Liter Wasser gilt:

$$M_k = (b - a) \times 20 \times c \times t$$

$M_k$  Gehalt an Kationen [mol/l]

a Verbrauch an Natronlauge vor dem Kationenaustausch [l]

b Verbrauch an Natronlauge nach dem Kationenaustausch [l]

c Konzentration der Natronlauge [mol/l]

t Titer der Natronlauge

Das Ergebnis gibt den Äquivalentgehalt an Kationen in einem Liter Wasser an.

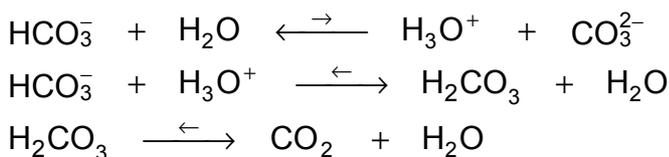
Beispiel: Trinkwasser der Stadt Frankfurt/Main (Riedberg). Die hier verwendeten Werte sind gemittelt.

$$M_K = (0,00546 \text{ l} - 0,00340 \text{ l}) \times 20 \times \frac{0,1 \text{ mol}}{\text{l}} \times 0,984 = 0,00405 \text{ mol} \approx 4,1 \text{ mmol}$$

Daraus folgt: Der Gehalt an Kationenäquivalenten beträgt ca. 4,1 mmol/l. Da das Molverhältnis der Kationen zu Anionen gleich groß ist, beträgt der Gesamtsalzgehalt 8,2 mmol/l.

### Auswertung:

Durch die Zugabe der Salzsäure und das anschließende Erhitzen wird die Kohlensäure als Kohlendioxid aus dem Wasser getrieben. Beim Ansäuern einer carbonathaltigen Lösung wird zunächst das Gleichgewicht zur Seite des Hydrogencarbonats verschoben. Beim weiteren Ansäuern entsteht Dihydrogencarbonat, welches bei genügend hoher Temperatur als Kohlendioxid entweicht [119, S. 350].



Mit der ersten Rücktitration bestimmt man den Gehalt an Protonen, welche nicht mit dem Hydrogencarbonat zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt wurden. Durch Kationenaustausch werden die in einer Wasserprobe vorhandenen Kationen gegen Protonen ausgetauscht. In der nachfolgenden zweiten Rücktitration werden dann zusätzlich noch die Protonen aus dem Ionenaustausch mitbestimmt. Daher muß der erste kleinere Wert von dem zweiten größeren Wert subtrahiert werden. Das Ergebnis gibt die Summe der Kationen im untersuchten Wasser an.

Tab. 13 listet die mengenmäßig wichtigsten Ionen im Trinkwasser auf (Frankfurt/Main, [120]). Die Zahl der Kationenäquivalente müßte theoretisch gleich der Zahl der Anionenäquivalente sein. In der analytischen Praxis sind Abweichungen von 2 bis 3 % noch zulässig (hier 1 %). Diese ergeben sich aus Ungenauigkeiten der eingesetzten analytischen Methoden sowie Rundungsfehlern in der Berechnung. Aufgeführt sind nur die mengenmäßig wichtigsten Ionen.

**Tab. 13:** Zusammensetzung des Trinkwassers (Beispiel Frankfurt/Main)

Ionen (Gehalt >1 mg/l)	Massen- konzentration [mg/l]	Stoffmengen- konzentration [mmol/l]	Äquivalent- konzentration [mmol/l]
<b>Kationen</b>			
Calciumionen	37,4	0,933	1,866
Kaliumionen	1,8	0,046	0,046
Magnesiumionen	22,8	0,938	1,876
Natriumionen	10,2	0,444	0,444
Summe Kationen- äquivalente			4,232
<b>Anionen</b>			
Chloridionen	16,5	0,465	0,465
Hydrogen- carbonationen	203,9	3,342	3,342
Nitrationen	11,8	0,190	0,190
Sulfationen	13,3	0,138	0,277
Summe Anionen- äquivalente			4,274

#### 4.2.3.3 Vollentsalzung

Der folgende Versuch dient vor allem zur Demonstration der Arbeitsweise eines Ionenaustauschers. Die maximale Gesamtmenge des pro Säule behandelbaren Trinkwassers wird aufgrund des Zeitaufwandes nicht experimentell, sondern rechnerisch bestimmt.

Eine Trinkwasserprobe wird über einen Kationen- sowie anschließend über einen Anionenaustauscher gegeben und mit aqua dest. nachgewaschen.

Mittels Ionenaustausch ist eine starke Verringerung des Salzgehaltes zu erreichen, welche über die elektrische Leitfähigkeit des Wassers ausgedrückt werden kann. Kommerzielle Zweibett-Anlagen erzielen eine Leitfähigkeit von 8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Mischbett-Anlagen haben eine wesentlich bessere Leistung. Kationen- und Anionenaustauscher sind hier miteinander vermischt und erlauben einen deutlich besseren Austausch. Es können Leitfähigkeiten bis zu 0,055  $\mu\text{S}/\text{cm}$  erzielt werden [119]. Für den Schulbetrieb eignen sich Mischbettauustauscher nicht, weil sie zur Regeneration aufgetrennt werden müssen, was in kleinerem Labormaßstab zu aufwendig ist.

#### Geräte:

Fertige Anionen- und Kationen-Austauschersäulen (aus 4.2.3.1), Leitfähigkeitsmeßgerät (TECHNOWA CM 25), Leitfähigkeitselektrode (mit bekannter Zellenkonstante  $K$  [ $\text{cm}^{-1}$ ]), 15 Rollrandgläser (Höhe 45 mm, Durchmesser 23 mm)

### Durchführung:

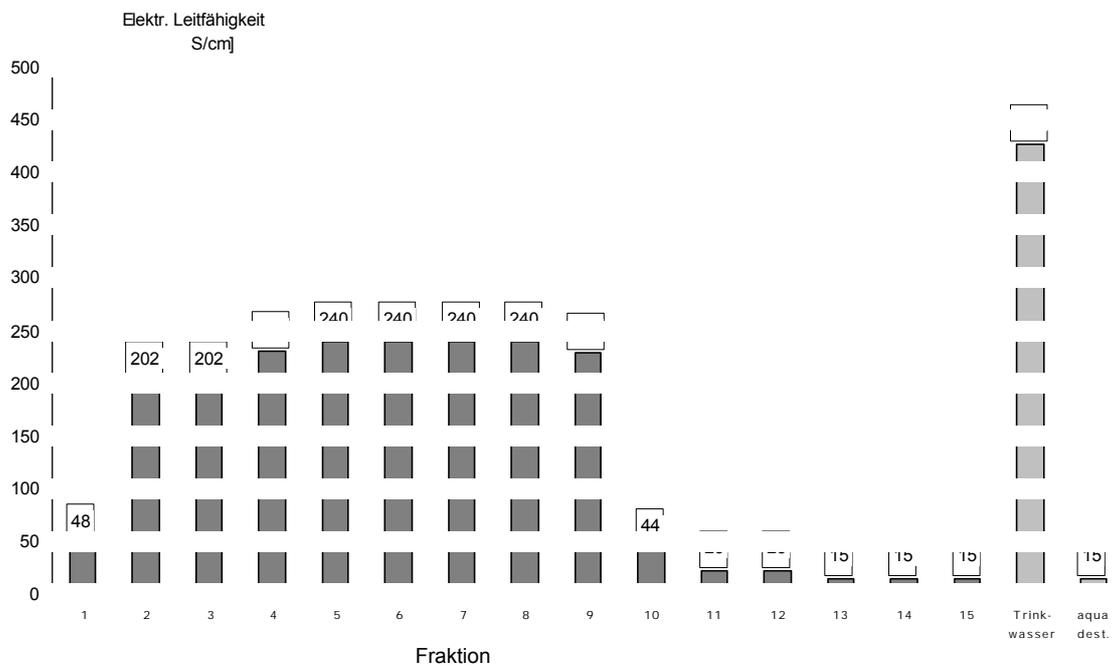
Die Rollrandgläser werden für den Versuch durchnummeriert und mit einer 6 ml-Marke versehen. Die Wassermenge von 6 ml ist so bemessen, daß sie die Mindestmenge darstellt, mit der eine Leitfähigkeitsmessung im Rollrandglas möglich ist. Bei Verwendung einer anderen Leitfähigkeitselektrode ist die Menge eventuell zu ändern.

50 ml Trinkwasser werden mit einer Durchflußmenge von einem Tropfen pro Sekunde über den Kationenaustauscher gegeben. Der Durchlauf wird in Fraktionen von 6 ml in den Rollrandgläsern gesammelt. Anschließend wäscht man mit zweimal 20 ml entionisiertem Wasser nach und fängt dies ebenfalls in Fraktionen auf. Von jeder Fraktion wird die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Jede Fraktion wird nun über den Anionenaustauscher laufen gelassen. Man fängt den Durchlauf wieder in 6 ml fraktioniert auf und bestimmt die Leitfähigkeit.

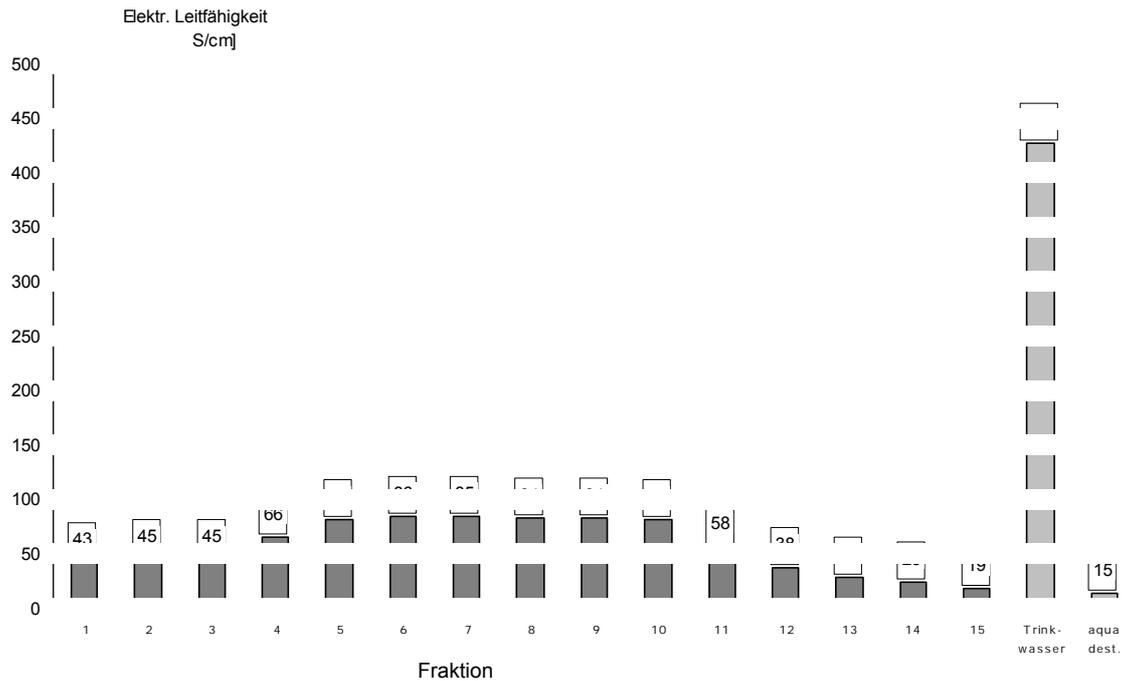
Die Probenmenge wurde auf 50 ml beschränkt, weil ein Ionenaustausch bis zur Erschöpfung des Austauschers mehrere Stunden in Anspruch nimmt und somit in der Schule nicht durchführbar ist. Nimmt man statt dessen kleine Harzmengen, besteht die Gefahr, daß selbst bei einer Durchflußgeschwindigkeit von nur einem Tropfen pro Sekunde die Zeit für den Ionenaustausch zu gering und somit kein vollständiger Austausch möglich ist.

### Ergebnis:

Abb. 32 und Abb. 33 zeigen die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung (nach Kationenaustausch und nach darauf folgendem Anionenaustausch). Aufgetragen ist die Leitfähigkeit der 15 Fraktionen. Zum Vergleich wurde die Leitfähigkeit des Trinkwassers und des aqua dest. mitaufgeführt.



**Abb. 32:** Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung nach Kationenaustausch



**Abb. 33:** Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung nach Anionenaustausch

### Auswertung:

Die elektrische Leitfähigkeit einer Lösung beruht auf dem Gehalt an Ionen. Sie ist abhängig von der Konzentration und dem Dissoziationsgrad der gelösten Elektrolyte, von deren Ladung, der Ionenbeweglichkeit und der Temperatur. Da bei der Messung einer Probe die Wertigkeit der Ionen und die Ionenbeweglichkeit konstant sind, ist bei konstanter Temperatur deren Leitfähigkeit nur von der Konzentration der Ionen abhängig.

Nach dem Kationenaustausch steigt bereits ab der 2. Fraktion die Leitfähigkeit an und fällt nach der 9. Fraktion stark ab. Dies zeigt, daß die Trinkwasserprobe nun durch den Kationenaustauscher durchgewandert ist (Abb. 32). Das nachfolgende Waschen schwämmt die noch verbliebenen Protonen aus dem Ionenaustauscherharz aus. Werden nun die eben erhaltenen Fraktionen über einen Anionenaustauscher geschickt, kommt es ebenfalls zu einem Anstieg der Leitfähigkeit, auch wenn dieser nicht so stark ausfällt (aufgrund der Bildung von Wasser aus den freigesetzten Protonen und Hydroxidionen) (Abb. 33). Die Leitfähigkeit der letzten Fraktionen nimmt rasch ab und nähert sich derjenigen von aqua dest. Da es Ziel des Versuchs war, das Arbeiten mit einem Ionenaustauscher zu demonstrieren, wurde aus zeitlichen Gründen nur mit 15 Fraktionen gearbeitet, und nicht das Eluat solange aufgefangen, bis es die gleiche elektrische Leitfähigkeit wie das aqua dest. aufweist.

Die eingesetzten Austauschersäulen haben eine nutzbare Austauschkapazität von jeweils 21 mval. Nimmt man näherungsweise eine Kationen- beziehungsweise Anionenäquiva-

leitkonzentration von  $c(\text{eq})=4,25 \text{ mmol/l}$  an (Mittelwert der Laborangaben)<sup>19</sup>, so erlaubt die eingesetzte Menge Ionenaustauscher ca. 4,94 l Trinkwasser zu entsalzen. Als Leistung für den Ionenaustausch ergaben sich 4,5 ml/min.

Ab der 14. Fraktion ist die Leitfähigkeit annähernd der des Waschwassers. Vierzehn Fraktionen von jeweils 6 ml ergeben 84 ml. Nach Abzug der eingesetzten Menge Wasser ergeben sich zum Waschen der Säule also 34 ml aqua dest. Dies entspricht einem Verbrauch an Waschwasser für die Entsalzung von  $6,9 \cdot 10^{-3}$  ml pro ml entionisiertes Wasser unter der Annahme, daß die Austauscherkapazität zu 100 % ausgenutzt wird.

In der technischen Praxis wird ein Austauscher bis kurz vor der völligen Erschöpfung genutzt (die Wasserqualität wird in dieser Phase bereits schlechter). Die Ionen brechen durch und die elektrische Leitfähigkeit steigt dann an.

#### 4.2.3.4 Regeneration des Ionenaustauschers

Eine Ionenaustauscherpackung besitzt nur ein bestimmtes Austauschervermögen. Sind alle Austauscherplätze auf der Oberfläche des Ionenaustauschers belegt, so kann kein weiterer Ionenaustausch erfolgen. Der Austauscher ist erschöpft und muß regeneriert werden. Dabei wird er in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt. Die an der Oberfläche des Austauschers gebunden Kationen und Anionen werden dabei abgegeben. Der Bedarf an Säure und Lauge wird rechnerisch ermittelt.

#### Berechnung

Das Regenerieren erfolgt in der Regel mit verdünnter Säure und Lauge. Der Kationenaustauscher wird mit dreiprozentiger Schwefelsäure oder achtprozentiger Salzsäure behandelt. Der Anionenaustauscher wird mit dreiprozentiger Natronlauge regeneriert.

Die jeweils erforderlichen theoretischen Mengen an Säuren und Laugen zur Regeneration der Ionenaustauscher werden für den industriellen Betrieb wie folgt ermittelt [121]:

---

<sup>19</sup> In dem Programm ÖKO-BILLY wird aus technischen Gründen mit dem Wert für den Äquivalentgehalt aus Abschnitt 4.2.3.2 gerechnet. Hierdurch können die darauf basierenden Ergebnisse von den hier vorgestellten abweichen.

$$\text{HCl} = \text{GK} \times 36,5$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{GK} \times 60$$

$$\text{NaOH} = \text{GA} \times 40$$

HCl	Masse Salzsäure ( $w(\text{HCl}) = 100 \%$ ) [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Masse Schwefelsäure ( $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 100 \%$ ) [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
NaOH	Masse Natronlauge ( $w(\text{NaOH}) = 100 \%$ ) [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
GK	Gesamtkationen [ $\text{mmol}/\text{l}$ bzw. $\text{mval}/\text{kg}$ ]
GA	Gesamtanionen [ $\text{mmol}/\text{l}$ bzw. $\text{mval}/\text{kg}$ ]

Die jeweils errechnete Menge bezieht sich immer auf eine Massenkonzentration von  $w = 100 \%$  und ist auf den Gehalt der vorliegenden Handelskonzentration umzurechnen. Der erste Faktor gibt den Gesamtgehalt an Kationen beziehungsweise Anionen an. Es wird mit einem Wert für Gesamtkationen beziehungsweise –anionen von  $4,2 \text{ mmol}/\text{l}$  gearbeitet (zur Berechnung siehe Abschnitt 4.2.3.2). Der zweite Faktor entspricht der Äquivalentkonzentration. Diese ist für Salzsäure und Natronlauge gleich der Molmasse. Für Schwefelsäure, die verdünnt nicht voll dissoziiert vorliegt, wird statt einer Äquivalentkonzentration von 49 mit 60 gerechnet [122, S. 585]<sup>20</sup>.

### Zusammenfassung der Input-Output-Daten

Mit einer Austauscherpackung kann man ca.  $4,94 \text{ l}$  Trinkwasser entsalzen. Somit ergibt sich für die Regeneration folgender Bedarf an Regenerierchemikalien (angegeben in ml und mg pro ml entionisiertes Wasser):

Salzsäure ( $w(\text{HCl}) = 8 \%$ ):	$1,99 \cdot 10^{-3} \text{ ml}/\text{ml}$	$1,92 \cdot 10^{-3} \text{ g}/\text{ml}$
Schwefelsäure ( $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 3 \%$ ):	$8,55 \cdot 10^{-3} \text{ ml}/\text{ml}$	$8,40 \cdot 10^{-3} \text{ g}/\text{ml}$
Natronlauge ( $w(\text{NaOH}) = 3 \%$ ):	$5,78 \cdot 10^{-3} \text{ ml}/\text{ml}$	$5,60 \cdot 10^{-3} \text{ g}/\text{ml}$

Zum Nachwaschen der Säule nach der Regeneration wurde ein Wert von  $100 \text{ ml}$  aqua dest. ermittelt. Dieser fällt höher aus als jener bei der Vollentsalzung, weil mit wesentlich konzentrierteren Lösungen gearbeitet wird. Bezogen wiederum auf  $1 \text{ ml}$  entionisiertes Wasser sind zum Nachwaschen nach der Regeneration  $0,020 \text{ ml}$  aqua dest. erforderlich. Hinzu kommt die erforderliche Menge Waschwasser aus der Vollentsalzung ( $6,89 \cdot 10^{-3} \text{ ml}/\text{g}$  ention. Wasser).

Zusammengefaßt ergeben sich für das Verfahren des Ionenaustausches folgende Input-Output-Daten (Tab. 14).

<sup>20</sup> Bei einer verdünnten Schwefelsäure mittlerer Konzentration ( $c \approx 1 \text{ mol}/\text{l}$ ) ist das erste Proton nahezu vollständig abgespalten. Im Gegensatz dazu liegen beim Hydrogensulfat nur  $1,3 \%$  der Moleküle als Protonen und Sulfationen vor.

**Tab. 14:** Input-Output-Daten für den Ionenaustausch

	Ionenaustausch
INPUT	
Leitungswasser [g/g ention. Wasser]	1
Salzsäure [g/g ention. Wasser]	$1,92 \cdot 10^{-3}$
Schwefelsäure [g/g ention. Wasser]	$8,40 \cdot 10^{-3}$
Natronlauge [g/g ention. Wasser]	$5,60 \cdot 10^{-3}$
Waschwasser [g/g ention. Wasser]	0,027
OUTPUT	
Chlorid im Abwasser [g/g ention. Wasser]	$1,49 \cdot 10^{-4}$
Sulfat im Abwasser [g/g ention. Wasser]	$2,47 \cdot 10^{-4}$
Natrium im Abwasser [g/g ention. Wasser]	$9,65 \cdot 10^{-5}$
entionisiertes Wasser [g]	1

#### 4.2.4 Vergleich der Ergebnisse schulexperimenteller gegenüber industrieller Verfahren (Destillation und Ionenaustausch)

Die im schulischen Maßstab gewonnenen Sachbilanzdaten wurden entweder experimentell mit einfachen Versuchsaufbauten oder rechnerisch ermittelt. Daher stellt sich an dieser Stelle das Problem, in wie weit die für den Unterricht vereinfachten Verfahren mit den analogen industriellen Prozessen vergleichbar sind.

Für den Vergleich werden für die Destillation und den Ionenaustausch jeweils drei industrielle Verfahren ausgewählt, welche sich in erster Linie in ihrer Leistung unterscheiden. Es werden die wichtigsten Daten zu Stoff- und Energieflüssen gegenüber gestellt. Somit erfolgt der Vergleich auf Sachbilanzebene. Dies hat zwar den Nachteil, daß etwa verschiedene Luftemissionen nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Der Vorteil liegt jedoch in der höheren Transparenz, da einzelne Sachbilanzpositionen sichtbar bleiben und nicht hinter dem Ergebnis einer Wirkungsabschätzung "verschwinden". Unterschiedliche Energieträger werden entsprechend ihres Primärenergieverbrauchs miteinander verglichen und sind somit vorher umzurechnen (siehe hierzu Abschnitt 2.6.2).

Die Tab. 15 und 16 fassen die wesentlichen Input- und Output-Daten zusammen und haben folgende Struktur:

- |                     |                                                |
|---------------------|------------------------------------------------|
| 1. Verfahren        | 7. Luftemissionen                              |
| 2. Systemgrenzen    | 8. Wasseremissionen                            |
| 3. Quelle           | 9. Deponieraumverbrauch/Abfälle zur Verwertung |
| 4. Datenqualität    | 10. Bodenverbrauch                             |
| 5. Material-Input   | 11. Lärmemissionen                             |
| 6. Energieverbrauch |                                                |

## Verfahren

### *Destillation*

Die Wasserdestillationsanlage Zyclodest der Firma WALDNER stellt hochreines Wasser für pharmazeutische Zwecke her [123; 124; 125]. Hier wird der Typ ZD 1500 mit einer Leistung von 1800 l/h betrachtet. Zunächst wird das Rohwasser im Gegenstrom zum Destillat fast bis zur Destilliertemperatur vorgewärmt. Von diesem Wärmeüberträger gelangt das Rohwasser in dem Verdampfer. Die hier über Elektroheizstäbe und Heizschlangen erfolgte Energiezuführung ist nur in der Aufheizphase des Prozesses erforderlich. Der Destillatdampf hat nun eine Temperatur von ca. 140 °C und steht unter etwa 3 bar Überdruck. Der Dampf wird anschließend einem Zyklon zugeführt. In diesem Zyklon kommt es aufgrund der sehr hohen Zentrifugalbeschleunigung (500fache Erdanziehung) zur Auftrennung des Dampfes von mitgerissenen Tröpfchen und Partikeln. Nach Durchlauf durch den Kondensator weist das Kondensat noch eine Temperatur von 120 °C und einen Überdruck von 1,3 bar auf. Es wird einem Kühler zugeführt, von dem aus es entnommen werden kann. Die im Kondensator freiwerdende Kondensationswärme wird genutzt, um über einen Sekundärkreislauf wieder Wasser zu verdampfen. Mit Hilfe eines Verdichters wird dieser Dampf auf 180 °C aufgeheizt und im Verdampfer als Heizmedium genutzt. Er kondensiert bei 140 °C und wird dann als Kühlmedium für den Destillatdampf genutzt. Der Dampf kann im Kreislauf geführt werden. Dampf-flüchtige Substanzen werden über eine Entgasungsvorrichtung entfernt. Die Temperatur des Destillates liegt nur ca. 5 °C über der des Rohwassers. Das hochreine Destillat ist pyrogenfrei und zeigt eine Leitfähigkeit von 0,08 µS/cm. Kühlwasser ist bei diesem Verfahren also nicht erforderlich. Abwasser entsteht ebenfalls nicht.

Der vollautomatische Wasserdestillierapparat (Typ 2012) der Firma GFL dient zur Herstellung von Monodestillat und hat eine Leistung von 12 l/h [126]. Die Destillierblase, der Kondensator und das Vorratsgefäß (Fassungsvermögen 12 Liter) sind aus rostfreiem Edelstahl hergestellt. Die Kühlung erfolgt mit Wasser. Zur Energieersparnis wird das erhitzte Kühlwasser zur Destillation herangezogen. Das nicht zum Verdampfen benötigte Wasser läuft durch den Kühlwasserablauf ab. Die Beheizung erfolgt über drei Heizspiralen. Das Destillat ist keimfrei, pyrogenfrei und gasarm. Die elektrische Leitfähigkeit liegt bei 2,3 µS/cm.

Der Wasserdestillationsapparat Landgraf der Firma LANDGRAF kann als Mono- und Bi-destillationsgerät benutzt werden [127]. Die Leistung liegt bei 0,85 l/h. Dampfentwickler und Kondensator sind aus Glas hergestellt und in senkrechter Bauweise angeordnet. Die Beheizung erfolgt über eine Heizspirale. Die Leitfähigkeit des pyrogenfreien Destillates beträgt ca. 1 µS/cm.

### *Ionenaustausch*

Die Angaben zum Ionenaustausch stammen aus den ÖKOINVENTAREN VON ENERGIESYSTEMEN (3. Auflage, 1996) [128]. Hierbei handelt es sich um eine Sachbilanzdatenbank zur Aufstellung von Ökobilanzen. Die Daten zur Wasseraufbereitung beruhen auf der Herstellung von entkarbonisiertem und vollentsalztem Wasser für industrielle Prozesse, beispielsweise zur Kühlung und Reinigung in Wärmekraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen. An dieser Stelle wird nur die Vollentsalzung des bereits entkarbonisierten Wassers über Ionenaustausch behandelt. Die Regeneration erfolgt mit Salzsäure und Natronlauge ( $w(\text{NaOH}) = 50\%$  und  $w(\text{HCl}) = 50\%$ ). Für die Regenerierung und Spülung wird ein Eigenbedarf von 5 % des aufbereiteten Wassers angenommen. Der Harzverbrauch wird auf  $10 \text{ g/m}^3$  Wasser geschätzt (Einsatzdauer beträgt 1 Jahr mit 8.000 Betriebsstunden und einem Wasserdurchsatz von  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Angaben zum Austauschertyp, der Abwasserbehandlung und einem möglichen Verbrauch elektrischer Energie (z. B. für Meßgeräte) liegen nicht vor.

Die Entsalzungsstraße der Firma CSC JÄKLECHEMIE umfaßt einen vorgeschalteten stark sauren Kationen- und einen stark basischen Anionenaustauscher sowie einen nachgeschalteten Mischbettaustauscher [129]. Die Harze sind seit 1988 ohne Unterbrechung im Einsatz (ca. 1.500 Betriebsstunden jährlich). Der Wasserdurchsatz beträgt  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Regeneration des Kationen- und Anionenaustauschers erfolgt nach etwa 9 bis  $10 \text{ m}^3$  Durchlauf (entspricht zweimal täglich). Zur Regeneration der Kationenaustauscher wird Natronlauge ( $w(\text{NaOH}) = 50\%$ ) eingesetzt, für den Anionenaustauscher Salzsäure ( $w(\text{HCl}) = 31\%$ ). Die Regeneration des Mischbettaustauschers kann vernachlässigt werden, da diese nur etwa jedes halbe Jahr erfolgen muß. Ebenfalls kann der Verbrauch an elektrischer Energie von zwei Leitfähigkeitsmeßgeräten vernachlässigt werden. Die Regenerierwässer werden in der betriebseigenen Neutralisationsstufe gesammelt. Durch eine geeignete Mischung der sauren und basischen Eluate sind keine weiteren Chemikalien erforderlich. Die Leitfähigkeit des entionisierten Wassers liegt unter  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Die Mischbett-Ionenaustauscherpatrone SG-700 der Firma SG besitzt eine Kapazität von 700 Litern bei einer Leistung von maximal  $0,08 \text{ m}^3/\text{h}$  [130]. Das Gerät ist für den drucklosen Einsatz konzipiert. Die Regeneration erfolgt mit Salzsäure ( $w(\text{HCl}) = 9\%$ ) und Natronlauge ( $w(\text{NaOH}) = 5\%$ ). Hierzu muß das Mischbettionenaustauscherharz aufgetrennt werden. Dies geschieht durch Aufschwemmen großer Chargen, die sich entsprechend ihrer unterschiedlichen Dichte im Becken übereinanderlagern, dann getrennt abgesaugt und regeneriert werden können. Die Abwässer werden neutralisiert. Die Leitfähigkeit des Produktes liegt im Bereich von  $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

## **Vergleich**

### *Industrielle und schulexperimentelles Verfahren der Destillation*

Es sollen zunächst die industriellen Verfahren untereinander verglichen werden. Die Sachbilanzdaten für die verschiedenen Verfahren der Destillation stammen aus Firmenbroschüren und beziehen sich auf das betrachtete Gerät zur Herstellung von entionisiertem Wasser. Lediglich beim Verfahren der Fa. WALDNER (Zyclodest) muß die ganze Anlage betrachtet werden.

Die Destillationsleistung liegt in einer Bandbreite von 1.800 bis ca. 1 l/h. Als Inputs sind nur Roh- und Leitungswasser sowie elektrischer Strom erforderlich. Außer bei dem Zyclodest-Verfahren sind zwischen 16 und 18 l Kühlwasser für ein Liter entionisiertes

Wasser notwendig. Der Energiebedarf liegt für die Laboranlagen in der Größenordnung von 3 MJ elektrischer Strom (pro Liter). Das Zyclodest-Verfahren benötigt letztlich dank der integrierten Wärmerückgewinnung weniger als 0,1 MJ pro Liter entionisiertes Wasser. Zum Vergleich beträgt die Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 100 °C (1 bar) ca. 2,7 MJ pro kg Wasser.

Die industriellen Produkte sind qualitativ unterschiedlich, wie sich beispielsweise an der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit zeigt. Sie liegt beim Zyclodest-Verfahren bei 0,08  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und erreicht über 2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  beim GFL-Gerät.

Das schulische Verfahren der Destillation benötigt etwa 4 Liter Kühlwasser (Durchfluß 25 ml/min) bis 15 Liter pro Liter entionisiertes Wasser (Durchfluß 100 ml/min). Der letztere Wert liegt in der Größenordnung der industriellen Verfahren. Der Energieverbrauch ist vergleichbar mit den Laborgeräten (GFL, Landgraf). Die Leitfähigkeit ist im Vergleich eine Zehnerpotenz schlechter (11  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Die Destillierleistung ist von allen betrachteten Verfahren am niedrigsten.

#### *Industrielle und schulexperimentelles Verfahren des Ionenaustausches*

Die Leistung der untersuchten Ionenaustauscher-Verfahren reicht von 30 bis 0,08  $\text{m}^3/\text{h}$ . Im Schulversuchsmaßstab können 0,4 l/h Wasser entsprechend  $4 \cdot 10^{-4}$   $\text{m}^3/\text{h}$  entsalzt werden. Die Produkte sind auch qualitativ unterschiedlich, denn sie weisen andere elektrische Leitfähigkeiten auf (Fa. JÄKLE 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Fa. SG 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Die Leitfähigkeit des schulexperimentell hergestellten entionisierten Wassers liegt in der Größenordnung von 15  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Bei den industriellen Verfahren werden zur Regeneration des Austauschers Salzsäure ( $w(\text{HCl}) = 9$  bis 13 %) und Natronlauge ( $w(\text{NaOH}) = 5$  bis 50 %) eingesetzt. Die Daten der Entsalzungsstraße der Fa. JÄKLE entsprechen ziemlich genau den Annahmen der ÖKOINVENTAREN VON ENERGIESYSTEMEN. Lediglich zur Regeneration unterschiedlicher Harze in großen Chargen, wie es bei der Fa. SG betrieben, werden etwa 100 % mehr Regenerierchemikalien benötigt.

Im Vergleich zu den ÖKOINVENTAREN VON ENERGIESYSTEMEN und dem Verfahren der Fa. JÄKLE fallen im schulischen Maßstab nur etwa die Hälfte an Chlorid- und Natriumionen an (pro Liter entionisiertes Wasser). Dies liegt daran, daß die Wasseremissionen auf der Basis des theoretischen Verbrauchs an Säuren und Laugen zur Regeneration berechnet wurden. Der Verbrauch in der (industriellen) Praxis kann bis um das Drei- bis Vierfache höher liegen [121, S. 188].

#### *Fazit:*

Es ist ein Vergleich von industriellen und schulischen Verfahren der Destillation und des Ionenaustausches möglich. Sowohl bei der Destillation als auch beim Ionenaustausch sind die Produkte qualitativ unterschiedlich. Hinsichtlich der Stoff- und Energieströme liegen die schulexperimentellen Verfahren in vergleichbarer Größenordnung. Der Grund dafür liegt in bestimmenden physikalischen Faktoren, wie der Verdampfungsenthalpie (für die Destillation) oder der Austauscherkapazität der Harze (im Falle des Ionenaustausches).

## Daten

**Tab. 15:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zur Destillation

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg destilliertes Wasser

Verfahren	FA. WALDNER Zyclodest (1.800 l/h)	GFL Wasserdestillier- apparat (12 l/h)	LANDGRAF Wasser- destillierapparat (0,9 l/h)	kontinuierliche Destillation von Wasser im Schul- versuch (0,4 l/h)
Systemgrenzen	Anlage	Gerät (Nr. 2012)	Gerät (Modell Landgraf)	Schulversuch
Quelle	u. a. Firmenbroschüre [123]	Firmenbroschüre [126]	Firmenbroschüre [127]	diese Arbeit (siehe Abschnitt 4.2.2)
Datenqualität	gemessen	gemessen	gemessen	gemessen
Rohstoffe*	Rohwasser 1 kg Kühlwasser 0 kg	Leitungswasser 1 kg/kg Kühlwasser 16,5 kg/kg	Leitungswasser 1 kg/kg Kühlwasser 17,7 kg/kg	Leitungswasser 1 kg/kg Kühlwasser 3,9 kg/kg (bei 25 ml/min Durchfluß)
Energieverbrauch (Endenergie)	Elektrizität 0,090 MJ/kg	Elektrizität 2,70 MJ/kg	Elektrizität 3,18 MJ/kg	Elektrizität 2,80 MJ/kg
Energieverbrauch (Primärenergie)	0,12 MJ/kg	7,83 MJ/kg	9,21 MJ/kg	8,12 MJ/kg
Produkt(e)	dest. Wasser 1 kg	dest. Wasser 1 kg	dest. Wasser 1 kg	1 kg Destillat
Luftemissionen	-	-	-	-
Wasseremissionen	-	-	-	-
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung	-	-	-	-
Bodenverbrauch	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Lärmemissionen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

- entfällt  
k.A. keine Angabe

**Tab. 16:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum Ionenaustausch

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg entionisiertes Wasser.

Verfahren	industrielle Vollentsalzung (30 m <sup>3</sup> /h)	industr. Vollentsalzung CSC JÄKLECHEMIE (2 m <sup>3</sup> /h)	Mischbettionenaustausch (0,08 m <sup>3</sup> /h)	Kationen- und Anionen- austausch im Schulversuch (4*10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /h)
Systemgrenzen	Anlage	Anlage	Gerät (SG 700)	Schulversuch
Quelle	ÖKOINVENTARE VON ENERGIESYSTEMEN 1996 [128]	persönl. Mitteilung 1999 [129]	Firmenbroschüre 2001 [130]	diese Arbeit (siehe Abschnitt 4.2.3)
Datenqualität	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet
Rohstoffe	Wasser entkarbon. 1 kg/kg Salzsäure (30 %) 1,3*10 <sup>-3</sup> kg/kg Natronlauge (30 %) 6,7*10 <sup>-4</sup> kg/kg Waschwasser 5,0*10 <sup>-2</sup> kg/kg Harz 1*10 <sup>-5</sup> kg/kg	Leitungswasser 1 kg/kg Salzsäure (31 %) 1,1*10 <sup>-3</sup> kg/kg Natronlauge (51 %) 8,3*10 <sup>-4</sup> kg/kg Waschwasser 5,0*10 <sup>-2</sup> kg/kg	Leitungswasser 1 kg/kg Salzsäure (9 %) 7,9*10 <sup>-3</sup> kg/kg Natronlauge (5 %) 1,4*10 <sup>-2</sup> kg/kg Waschwasser 2,9*10 <sup>-2</sup> kg/kg	Leitungswasser 1 kg/kg Salzsäure (8 %) 1,92*10 <sup>-3</sup> kg/kg Schwefelsäure (3 %) 8,40*10 <sup>-3</sup> kg/kg Natronlauge (3 %) 5,60*10 <sup>-3</sup> kg/kg Waschwasser 2,0*10 <sup>-2</sup> kg/kg
Energieverbrauch (Endenergie)	-	-	-	-
Energieverbrauch (Primärenergie)	-	-	-	-
Produkt(e)	ention. Wasser 1 kg	ention. Wasser 1 kg	ention. Wasser 1 kg	ention. Wasser 1 kg
Luftemissionen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wasseremissionen	Chlorid 0,389 g/kg Natrium 0,115 g/kg	Chlorid 0,336 g/kg Natrium 0,239 g/kg	Chlorid 0,695 g/kg Natrium 0,410 g/kg	Chlorid 0,149 g/kg Sulfat 0,098 g/kg Natrium 0,247 g/kg
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Verfahren	industrielle Vollentsalzung (30 m³/h)	industr. Vollentsalzung CSC JÄKLECHEMIE (2 m³/h)	Mischbettionenaustausch (0,08 m³/h)	Kationen- und Anionen- austausch im Schulversuch (4*10 <sup>-4</sup> m³/h)
Bodenverbrauch	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Lärmemissionen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

### 4.2.5 Ökobilanz der Destillation und des Ionenaustausches

Die Vorgehensweise für die Erstellung dieser vereinfachten schulischen Ökobilanz orientiert sich an der Checkliste "Erstellung einer Ökobilanz im Chemieunterricht (Sek. II)" (Abschnitt 3.7).

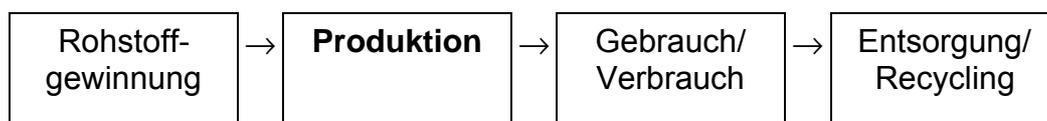
#### 4.2.5.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Aufgabe dieser ersten Phase ist die Festlegung auf das Ziel der Bilanzierung, der räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen sowie der Methode für die Wirkungsabschätzung. Zugleich werden somit unter dem didaktischen Blickpunkt der Elementarisierung eine Auswahl inhaltlicher und methodischer Aspekte getroffen.

Ziel dieser vereinfachten Ökobilanz soll es sein, die Herstellung von entionisiertem Wasser an den exemplarisch ausgewählten Verfahren Destillation und Ionenaustausch zu untersuchen. Die ganze Studie verläuft unter schulischen Bedingungen und ist auf die Zielgruppe Schüler ausgerichtet. Sie erhebt kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Erfassung der tatsächlichen technischen Bedingungen.

Die Daten beruhen unter dem technologischen Gesichtspunkt ausschließlich auf Schulerperimenten. Sie sind somit nicht als repräsentativ für industrielle Verfahren anzusehen. Die Versuchsergebnisse zeigen aufgrund der Durchführungsbedingungen (Materialien, Erfahrung der Experimentatoren, äußere Bedingungen) eine größere Schwankungsbreite als Daten auf der Basis industrieller Verfahren. Somit können auch die Aussagen von Fall zu Fall unterschiedlich sein. Es besteht also eine gewisse Ungenauigkeit. Dies wird jedoch hinsichtlich der eingangs erhobenen Zielsetzung in Kauf genommen. Die Vollständigkeit der Daten ist eingeschränkt, weil nur solche Daten erfaßt werden, welche unter einfachen schulischen Bedingungen sowohl praktisch als auch theoretisch erhoben werden können (z. B. Energieverbrauch, stöchiometrische Massendifferenzen).

Der Untersuchungsrahmen umfaßt nur den Lebenswegabschnitt Produktion.



Die Rohstoffgewinnung (Förderung des Wassers) wird nicht betrachtet, da sie experimentell nicht zugänglich ist. Die Herstellung der Regenerierchemikalien für die Ionenaustauscherharze wird zum einen aus Zeitgründen nicht durchgeführt und bilanziert, und zum anderen, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den industriellen Verfahren herzustellen, für die ebenfalls nur der Bedarf an Regeneriermitteln bekannt ist. Verbrauch und Entsorgung sind nicht im Untersuchungsrahmen eingeschlossen, da keine Umweltbelastungen zu erwarten sind.

Abb. 34 und 35 zeigen die im Rahmen der Destillation sowie des Ionenaustausches erfaßten Inputs und Outputs. Die Systemgrenzen sind so gewählt, daß die experimentell bestimmbar relevanten Stoff- und Energieströme erfaßt werden. Das bilanzierte System umfaßt daher nur die jeweilige Apparatur. Generell werden Teile der Apparatur, wie Glasgeräte, Stativmaterial und Heizpilz nicht erfaßt. Somit sind deren Herstellung einschließlich

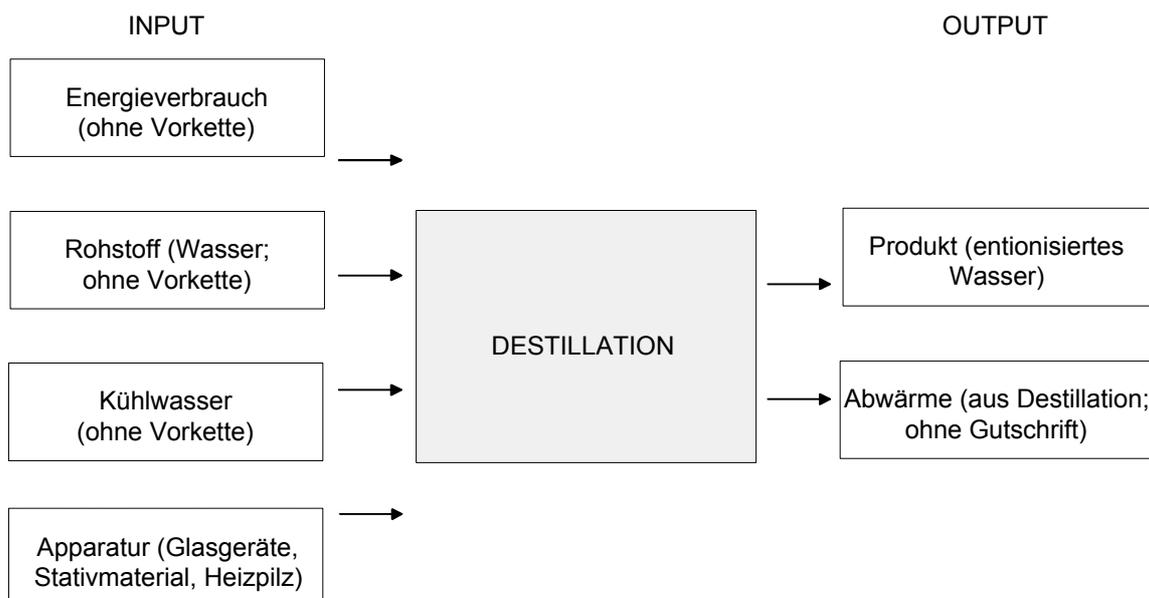
der Gewinnung der Rohstoffe und das Recycling der ausgedienten Geräte nicht im Untersuchungsrahmen enthalten. Die Geräte werden als äußerst langlebig angesehen.

Genereller Materialinput für beide Verfahren ist das zu behandelnde Wasser. Das Hauptprodukt ist bei beiden Verfahren entionisiertes Wasser. Für die Destillation werden weiterhin die Inputs Verbrauch an Energie und Kühlwasser bestimmt. Als Output fällt Abwärme an. Beim Ionenaustausch werden als zusätzliche Inputs der Verbrauch an Säuren und Laugen sowie als Output das Abwasser ermittelt.

Die Vorketten von elektrischem Strom (Herstellung, Transport), von Wasser (Gewinnung, Transport) und von Säuren/Laugen werden nicht berücksichtigt, da sie experimentell nicht zugänglich sind. Der Energieverbrauch des Thermofühlers und des Leitfähigkeitsmeßgerätes werden nicht erfaßt, da diese keinen Einfluß auf die jeweilige Produktmenge haben.

Die bei der Destillation freiwerdende Abwärme wird nicht dem Energieverbrauch gutgeschrieben, da sie experimentell nicht zur Vorerwärmung des Destillationskolbens genutzt wird. Die geringen Wassermengen, welche dem Kühlwasser zum Auffüllen des Kolbens entnommen werden, sind vernachlässigbar.

Abwasser aus dem Ionenaustausch kann Natrium-, Chlorid- oder Sulfationen enthalten (je nach Austauschertyp und Regeneriermittel). Umwelteinwirkungen aufgrund der bei der Regeneration des Ionenaustauschers freigesetzten Ionen, zum Beispiel Calcium, Magnesium, Nitrat und Sulfat, werden nicht berücksichtigt, da deren Mengen im Vergleich zu den eingesetzten Säuren- und Laugenkonzentrationen geringfügig und somit vernachlässigbar sind. Da Kationen- und Anionenaustauscher hintereinander geschaltet sind, kann davon ausgegangen werden, daß keine Protonen oder Hydroxidionen ins Abwasser gelangen, da beide zu Wasser reagieren. Hierbei wird vorausgesetzt, daß die Säulen annähernd die gleiche Austauscherkapazität besitzen und nur von der rechnerisch ermittelten theoretischen Menge an Regenerationsmitteln ausgegangen wird (in der Praxis werden höhere Mengen eingesetzt).



Erläuterung: — Input/Output wird erfaßt bzw. — — wird nicht erfaßt

**Abb. 34:** Für die Destillation erfaßte bzw. nicht erfaßte Inputs und Outputs



Erläuterung: — Input/Output wird erfaßt bzw. — — wird nicht erfaßt

**Abb. 35:** Für den Ionenaustausch erfaßte Inputs und Outputs

Die funktionelle Einheit ist 1 g entionisiertes Wasser, also das Produkt beider Verfahren.

Als Methode der Wirkungsabschätzung wird die Methode der Umweltbelastungspunkte gewählt. Folgende Kategorien werden im allgemeinen betrachtet:

- Fläche
- Abfall
- Energie
- Lärm
- Luftbelastung
- Wasserbelastung

#### 4.2.5.2 Sachbilanz

Innerhalb der Sachbilanz werden alle anfallenden Input-Output-Daten tabellarisch gesammelt und gegebenenfalls grafisch aufbereitet. Abbildungen 36 und 37 zeigen die wesentlichen Ergebnisse der Sachbilanz. Der Energieverbrauch wird in Primärenergie angegeben. Für verschiedene Energieträger erfolgt die Umrechnung entsprechend des primärenergetischen Aufwands für deren Bereitstellung (KEA) (Abschnitt 2.6).

Für beide Verfahren sind jeweils die Input-Daten zusammen abgebildet. Alle Angaben beziehen sich auf ein Gramm durch Destillation beziehungsweise Ionenaustausch hergestelltes entionisiertes Wasser.

Die Auswertung der Destillation ergab, daß der 1 l-Rundkolben gemessen an 1 g Destillat und mit einer Kühlwassermenge von 25 ml/min den günstigsten Verbrauch an Energie- und Kühlwasser aufweist (Tab. 11). Zudem liefert er die meiste Menge an Destillat. Daher wird dieser stellvertretend für das Verfahren der Destillation herangezogen. Die gewählte Verfahrensvariante liefert etwa 0,4 l/h Destillat. Hierfür werden 8,1 kJ Primärenergie und 4 g Kühlwasser (jeweils pro g Destillat) benötigt. Die Abwärmemenge liegt bei 0,7 kJ/g Destillat.

Für die Regeneration des Kationenaustauschers können entweder die o.g. verdünnte Schwefelsäure ( $8,40 \cdot 10^{-3}$  g/g entionisiertes Wasser) oder Salzsäure ( $1,92 \cdot 10^{-3}$  g/g) eingesetzt werden. Der Anionenaustauscher wird mit verdünnter Natronlauge regeneriert ( $5,60 \cdot 10^{-3}$  g/g). Der Waschwasserbedarf beträgt 0,027 g/g ention. Wasser.

Für die nachfolgende Wirkungsabschätzung ist es noch erforderlich, die Abwasserbelastung durch Sulfat-, Chlorid- oder Natriumionen zu ermitteln. Mit dem Abwasser werden  $1,94 \cdot 10^{-4}$  g/g Chlorid bzw.  $1,5 \cdot 10^{-4}$  g/g Sulfat und  $9,65 \cdot 10^{-5}$  g/g Natrium in die Umwelt abgegeben.

Tab. 17 und Tab. 18 zeigen die Sachbilanzen der Destillation und des Ionenaustausches.

**Tab. 17:** Sachbilanz Destillation

Sachbilanzposition	
Primärenergieverbrauch [kJ/g Destillat]	8,1
Kühlwasserverbrauch [g/g Destillat]	4
Abwärme [kJ/g Destillat]	0,7

**Tab. 18:** Sachbilanz Ionenaustausch

Sachbilanzposition	
Waschwasserverbrauch [g/g ent. Wasser]	2,7E-02
Schwefelsäureverbrauch [g/g ent. Wasser]	8,4E-03
Salzsäureverbrauch [g/g ent. Wasser]	1,9E-03
Natronlaugenverbrauch [g/g ent. Wasser]	5,6E-03
Wasseremission Sulfat [g/g ent. Wasser]	2,5E-04
Wasseremission Chlorid [g/g ent. Wasser]	1,5E-04
Wasseremission Natrium [g/g ent. Wasser]	9,7E-05

Die Qualität der in den Schulversuchen gewonnenen Input-Output-Daten entspricht den in der Zielsetzung beschriebenen Anforderungen. Es wurden Literatur-Daten zur Berechnung der erforderlichen Menge an Säuren und Laugen für die Regeneration verwendet.

#### 4.2.5.3 Wirkungsabschätzung

In dieser Stufe erfolgt die Beschreibung und Ermittlung der Umweltbelastungen (zur Berechnung der Ökofaktoren und der Umweltbelastungen nach der Methode der UBP siehe Abschnitt 2.8). Grundlage sind die in der Sachbilanz gesammelten Daten zu Material- und Energieströmen.

Die Verfahren Destillation und Ionenaustausch zeigen keine Belastung der Luft. Der Ionenaustausch führt je nach Art der eingesetzten Chemikalien zu einer unterschiedlichen Wasserbelastung. Die Schwefelsäure setzt Sulfationen frei, die Natronlauge Natriumionen und die Salzsäure Chloridionen. Die angegebenen Mengen stellen den theoretischen Minimalbedarf für die Regeneration dar. Daher werden Protonen sowie Hydroxidionen nicht in die Umwelt abgegeben und stellen daher auch keine Umweltbelastung dar. Innerhalb der Methodik der UBP werden weiterhin Protonen, Natrium- und Hydroxidionen

als nicht umweltbelastend eingestuft. Somit existiert auch kein Ökofaktor. Anders sieht dies bei Chlorid- und Sulfationen aus. Diese werden als umweltbelastend angesehen, weil sie zur Salzfracht der Gewässer beitragen, und daher mit einem Ökofaktor versehen. Die beiden folgenden Tabellen zeigen die Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den entsprechenden Wirkungskategorien (Tab. 19, Tab. 20). Der Energieverbrauch wird der Kategorie Energie zugeordnet, die Wasseremissionen (Sulfat- und Chloridemissionen) der Kategorie Wasserbelastung.

**Tab. 19:** Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Destillation; Herstellung)

Sachbilanzposition	Kategorie
Energieverbrauch	Energie

**Tab. 20:** Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Ionenaustausch; Herstellung)

Sachbilanzposition	Kategorie
Wasseremissionen	Wasserbelastung
Sulfat	Sulfat
Chlorid	Chlorid

Die Destillation erfordert elektrische Energie. Weil deren Bereitstellung im Rahmen der Methode der Umweltbelastungspunkte als umweltbelastend angesehen wird, existiert auch hierfür ein Ökofaktor. Das für die Destillation notwendige Kühlwasser (genauer Trinkwasser) wird als nicht als ökologisch knapp betrachtet. Es versickert regional im Boden und wird somit dem Grundwasser wieder zugeführt. Vorprodukte, wie das zum Waschen des Ionenaustauschers notwendige aqua dest., werden nicht bilanziert.

Die bei der Destillation auftretende Abwärme wird wegen ihrer geringen ökologischen Bedeutung nicht im Rahmen der Wirkungsabschätzung berücksichtigt. Die Umwelt ist nur in einem sehr geringen Umkreis betroffen. Die zeitliche Dauer der Auswirkung mit den entsprechenden Veränderungen ist kurz und reversibel. Luftemissionen, Bodenversiegelung, Abfälle und Lärmemissionen fallen nicht an und brauchen daher auch nicht berücksichtigt zu werden.

Somit müssen zum Vergleich der beiden Verfahren nur die Sulfat- sowie Chloridbelastung durch den Ionenaustausch und der Stromverbrauch durch die Destillation beurteilt werden.

Auf Grundlage der ermittelten Emissionen wird mittels Methode der Umweltbelastungspunkte die endgültige Umweltbelastung errechnet (Tab. 21). Die Umweltbelastung ist mathematisch das Produkt aus der Menge einer Umwelteinwirkung und ihres Ökofaktors.

**Tab. 21:** Umweltbelastung durch Ionenaustausch und Destillation

Umwelteinwirkung	Ökofaktor	Emission	Umweltbelastung
Sulfationen-Belastung im Abwasser	0,077 UBP/ g Emission	$2,5 \cdot 10^{-4}$ g/g entionisiertes Wasser	$1,9 \cdot 10^{-5}$ UBP
Chloridionen-Belastung im Abwasser	0,026 UBP/ g Emission	$1,5 \cdot 10^{-4}$ g/g entionisiertes Wasser	$3,9 \cdot 10^{-6}$ UBP
Energieverbrauch	1 UBP/MJ Energie- verbrauch	$8,1 \cdot 10^{-3}$ MJ/g entionisiertes Wasser	$8,1 \cdot 10^{-3}$ UBP

#### 4.2.5.4 Auswertung

Im Rahmen der Auswertung erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung sowie eine qualitative Beurteilung der Datenqualität.

Allein auf der Grundlage der Sachbilanz läßt sich keine Aussage zugunsten eines Verfahrens treffen. Hier stehen sich vor allem der Energieverbrauch der Destillation dem Säure- und Laugenbedarf des Ionenaustauschers gegenüber.

Nach der Wirkungsabschätzung zeigt sich ein klares Bild. Die Destillation ist mindestens über den Faktor 400 umweltbelastender als der Ionenaustausch (Sulfatbelastung), so daß diesem Verfahren vorzuziehen ist. Für die Regenerierung des Kationenaustauschers ist Salzsäure der Schwefelsäure zu bevorzugen, da die Wasserbelastung durch Sulfationen etwa fünfmal größer ist als durch Chloridionen.

Für die Datenqualität gelten die im Rahmen der Zielsetzung beschriebenen Einschränkungen.

Für den Chemieunterricht stellt sich an dieser Stelle die Frage nach dem praktischen Bezug der Ergebnisse. In der Praxis sind meist die Betriebskosten der relevante Faktor für die Wahl eines Verfahrens. Diese werden bei der Destillation vor allem durch den Verbrauch elektrischer Energie bestimmt, bei dem Ionenaustausch durch die Beschaffung der Regenerierchemikalien sowie der Abwasserentsorgung.

Die Betriebskosten sind für die industrielle Wasserdestillation in der Regel höher als für den Ionenaustausch. Daher wird die Destillation vor allem dann angewendet, wenn wie im pharmazeutischen Bereich, hochreines, steriles und pyrogenfreies Wasser benötigt wird [131]. Im analytischen und bakteriologischen Labor reicht im allgemeinen die Reinheit des deionierten Wassers aus. Der Ionenaustausch wird auch für die Vollentsalzung von Wasser eingesetzt, welches in Wärmekraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen zu Kühl- und Reinigungszwecken eingesetzt wird [128]. Da hierbei erhebliche Mengen an aufbereitetem Wasser erforderlich sind, ist anzunehmen, daß die Wahl auf das kostengünstigere Verfahren - der Ionenaustausch - fällt.

## 4.3 Darstellung und Recycling von Kunststoffen

### Technischer Hintergrund

Kunststoffe sind makromolekulare, organische Verbindungen, welche aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten große Verbreitung gefunden haben. Sie werden etwa zur Herstellung von Verpackungsmaterialien (z. B. Folien, Flaschen) und Gebrauchsgegenständen (z. B. für Behälter, Schüsseln) eingesetzt, weiterhin auch im technischen Bereich (z. B. für Gehäuse, Kabelummantelungen) sowie in der Medizin (z. B. für resorbierbare Nahtmaterialien und Zahnfüllungen).

Kunststoffe sind hierzulande Gegenstand umweltpolitischer Diskussion geworden, weil gerade aus dem Verpackungssektor große Mengen gebrauchter Kunststoffe angefallen sind. Anlaß für Kritik waren der Verbrauch fossiler Rohstoffe wie Erdöl und Erdgas sowie die Problematik der Entsorgung und des Recycling. Allein vom Dualen System Deutschland wurden im Jahr 2000 nach eigenen Angaben über fünf Millionen Tonnen an Verkaufsverpackungen erfaßt und der Verwertung zugeführt [132] (vor diesem Hintergrund wurde vom Umweltbundesamt eine Ökobilanz von Getränkeverpackungen, in Auftrag gegeben, die aus ökologischer Sicht Klarheit bringen sollte [90]).

### Zugänglichkeit der Thematik

Schüler haben in ihrer täglichen Lebensumwelt - sei es in der Schule, zu Hause oder beim Sport - vielfachen Kontakt mit Kunststoffen in den unterschiedlichsten Ausprägungen. Den Schülern dürfte das Sortieren ihres Mülls ebenso vertraut sein wie die in letzter Zeit geführte Diskussion um geeignete (weil ökologisch richtige) Getränkeverpackungen. Aufgrund ihrer technischen und wirtschaftlichen Bedeutung sind Kunststoffe bereits früh Gegenstand des Chemieunterrichts. Einfache Versuche zur Herstellung beispielsweise von Polyurethanen im Demonstrationsexperiment oder das Umschmelzen von thermoplastischen Abfällen lassen sich bereits in der Mittelstufe erfolgreich durchführen.

Für die Behandlung der Thematik Ökobilanzen im Unterricht wurden die Werkstoffe aufgrund ihres Bekanntheitsgrades bei den Schülern und ihrer Umweltrelevanz ausgewählt. Studien zu Ökobilanzierung von Kunststoffen sind jedoch in der Regel zu umfangreich und die angewendete Methodik zu komplex, so daß ein anderer Zugang gewählt werden mußte.

Es wurde daher exemplarisch auf zwei thermoplastische Kunststoffe (PMMA und PS) zurückgegriffen, die im Schulversuchsmaßstab hergestellt und auf unterschiedliche Weise recycelt werden können. Die entwickelten Experimente werden nachfolgend vorgestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse schulexperimenteller gegenüber industrieller Verfahren erfolgt auf Sachbilanzebene im Anschluß daran. Mit den experimentell erhaltenen Input-Output-Daten kann abschließend eine vereinfachte Ökobilanz im Unterricht aufgestellt werden. Eine solche Ökobilanz erlaubt nur eine Aussage für die zu Grunde gelegten Schulversuche (Ablauf, Maßstab, Umwelteinwirkungen). Ein Rückschluß auf technische Maßstäbe ist nicht möglich und auch nicht beabsichtigt.

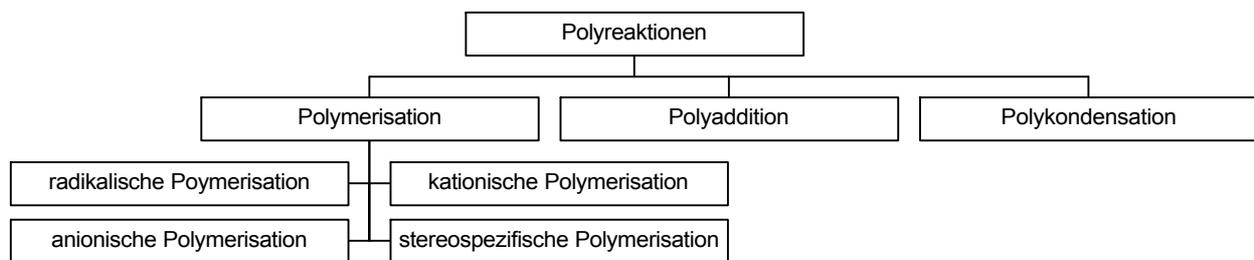
### 4.3.1 Darstellung von Kunststoffen

Kunststoffe werden durch chemische Reaktionen gewonnen, in denen organische Monomere zu makromolekularen (langsträngigen) Polymeren verknüpft werden. Es gibt verschiedene Polyreaktionarten (Abb. 36) (nach [133, S. 16; 77]). Es wird zwischen Polymerisation, Polyaddition und Polykondensation unterschieden.

Bei der Polymerisation reagieren ungesättigte Monomere (mit Mehrfachbindungen oder Ringen) zum Beispiel mit Radikalen oder Ionen. Eine Polymerisation verläuft in drei Schritten: Startreaktion (Bildung eines reaktionsfähigen Radikals oder Ions nach thermischer oder photochemischer Aktivierung), Wachstumsreaktion (Reaktion des Radikals oder Ions mit Monomeren) und Abbruchreaktion (Reaktion der Radikale oder Ionen untereinander). Während der Wachstumsreaktionen treten keine Abspaltung oder Umlagerung von Molekülen auf. Zu den Polymerisaten gehören beispielsweise die Thermoplaste Polyethylen, Polypropylen und Polymethylmethacrylat.

Die Polyaddition ist eine Reaktion meist verschiedener Monomere unter Anlagerung reaktionsfähiger Gruppen an Mehrfachbindungen oder unter Öffnung ringförmiger Moleküle. Es erfolgt keine Abspaltung niedermolekularer Stoffe. Häufig kommt es zu einer Verschiebung von Wasserstoffatomen. Durch Polyaddition entstehende Polymere haben keine C-C-Hauptketten, sondern bestehen bevorzugt aus Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und Silicium. Zu den Polyaddukten werden beispielsweise Epoxidharze sowie Polyurethane gezählt.

Bei der Polykondensation erfolgt eine Verknüpfung von bi- oder mehrfunktionellen Monomeren unter Abspaltung niedermolekularer Produkte (z. B. Wasser oder Alkoholen). Zu den Polykondensaten gehören beispielsweise die thermoplastischen Polyamide ebenso wie die duroplastischen Phenol- und Harnstoffharze.



**Abb. 36:** Unterscheidung der Polyreaktionen

#### 4.3.1.1 Darstellung von Polymethacrylsäuremethylester durch radikalische Polymerisation

Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) ist ein häufig eingesetzter thermoplastischer Kunststoff, welcher aufgrund seiner amorphen Struktur eine hohe Lichtdurchlässigkeit und keine Eigenfarbe aufweist. Der auch unter der Bezeichnung Acrylglas oder Plexiglas bekannte Kunststoff besitzt zudem günstige mechanische Eigenschaften, wie gute Druck-, Zug- und Biegefestigkeit. Aufgrund dieser Eigenschaften findet PMMA als Formmasse Einsatz im Automobilbau (Verglasung, Abdeckung), für Leuchten und im Bereich des

Bauwesens etwa für Dachverglasungen und Naßzellen-Badewannen. Der monomere Methacrylsäuremethylester wird auch für Farben und Klebstoffe eingesetzt.

Technisch wird Methacrylsäuremethylester vor allem radikalisch polymerisiert. Die Polymerisation erfolgt hier mit Hilfe des Radikalstarters Dibenzoylperoxid. Vorteil für den Schulversuch ist seine rasche Durchführung. Innerhalb weniger Minuten erhält man eine feste Formmasse. Die Polymerisation findet in einem temperierten Wasserbad statt, so daß zum einen eine gleichmäßige Wärmezufuhr möglich ist, zum anderen können die Schüler die Polymerisation gut beobachten. Die folgende Vorschrift gilt sowohl für die Erst- wie auch Repolymerisation von Methacrylsäuremethylester zu PMMA (verändert nach [134, S. 185]).

#### **Geräte:**

Reagenzgläser (20\*180 mm), Becherglas (600 ml), Rührfisch, Magnetrührer mit Heizplatte und elektronischem Kontaktthermometer, Meßzylinder (10 ml), Glasstab, Energiemeßgerät (ELV Energie-Monitor EM 94)

#### **Chemikalien:**

Methacrylsäuremethylester (leichtentzündlich, F, reizend, Xi), Dibenzoylperoxid (explosionsgefährlich, E, reizend, Xi)

#### **Durchführung:**

Vorbereitung:

Das Becherglas wird mit 500 ml Wasser gefüllt und unter Rühren auf 80 °C aufgeheizt. Zur Ermittlung des Stromverbrauches wird ein Energiemeßgerät zwischen Magnetrührer und Steckdose geschaltet. Der Stromverbrauch für die Aufheizphase wird nicht berücksichtigt (nur für Heizen bei 80 °C). Die Masse des Reagenzglases ist vor dem Versuch zu bestimmen und danach einschließlich des entstandenen Kunststoffes.

Im Reagenzglas werden 10 ml Methacrylsäuremethylester und 1 g Dibenzoylperoxid zusammengegeben. Die Lösung wird im Wasserbad erwärmt, wobei unmittelbar nach Eintauchen des Reagenzglases kurz gerührt wird. Es ist darauf zu achten, daß die Lösung vollständig eintaucht und das Reagenzglas nicht den Boden des Becherglases berührt.

Für den Versuch wird einmal der industriell hergestellte Methacrylsäuremethylester eingesetzt, zum anderen ein durch Depolymerisation von PMMA im Schulversuch selbstgewonnenes Sekundär-Produkt (siehe Abschnitt 4.3.3.1).

Mit Einsetzen der Polymerisation, welche durch eine gesteigerte Blasenbildung an der Oberfläche der Methacrylsäuremethylester-Dibenzoylperoxid-Lösung gekennzeichnet ist, wird das Reagenzglas aus dem Wasserbad genommen. Die Polymerisation kann außerhalb des Wasserbades weiter verfolgt.

Die Reagenzgläser mit dem auspolymerisierten Kunststoff können für weitere Versuche zum Recycling unter dem Abzug aufbewahrt werden.

#### **Beobachtung:**

Das Gemisch zeigt nach 3 bis 4 min einen deutlichen Anstieg der Viskosität (Schlierenbildung). Darauf erfolgt nach 5 bis 6 min eine verstärkte Blasenbildung. Diese heftige Reaktion setzt sich außerhalb des Wasserbades fort und ist nach 1 bis 2 min beendet.

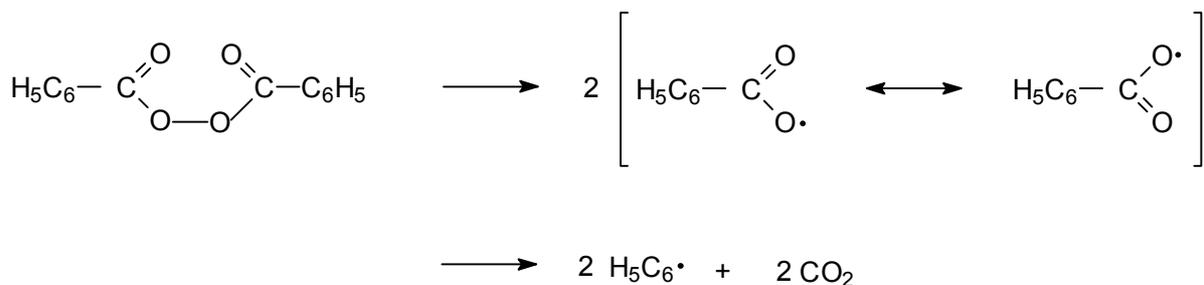
Das Reagenzglas ist spürbar heiß. Man erhält einen festen blasigen Kunststoff, welcher aufgrund der Blasenbildung im Vergleich zu den technisch hergestellten Kunststoffen nicht durchsichtig ist. Setzt man den über Pyrolyse gewonnenen Methacrylsäuremethylester zur Polymerisation ein, so kann diese an die 15 min dauern (zur Pyrolyse siehe Abschnitt 4.3.3.1).

### Auswertung:

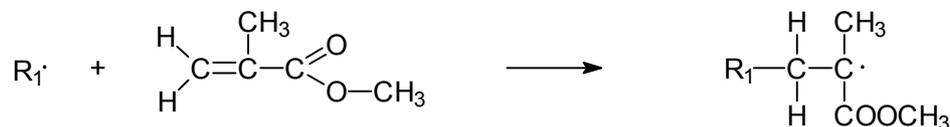
Methacrylsäuremethylester kann thermisch polymerisiert werden. Die bei der Polymerisation freiwerdende Reaktionsenthalpie bewirkt ein Andauern des Siedevorganges auch außerhalb des Wasserbades.

Die relevanten Reaktionsmechanismen werden aus Sicht der Schulchemie erläutert, welche jedoch zum besseren Verständnis ausführlich dargestellt werden sollen.

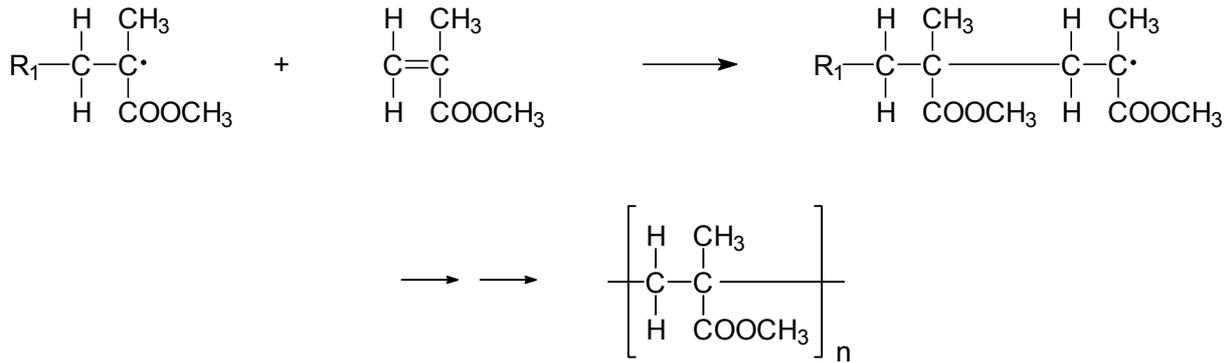
Die radikalische Polymerisation wird in diesem Fall durch ein Peroxid angeregt. Dibenzoylperoxid zerfällt unter Erwärmen in Benzoesäureradikale. Diese sind im Übergangszustand durch die Delokalisation des ungepaarten Elektrons stabilisiert. Schließlich entstehen Phenylradikale ( $R_1$ ) [135, S. 102].



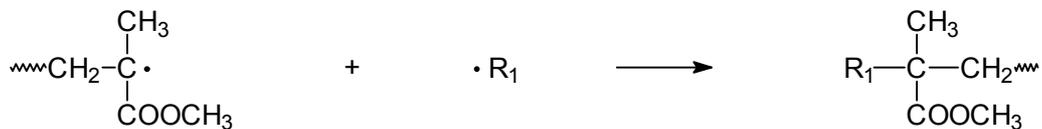
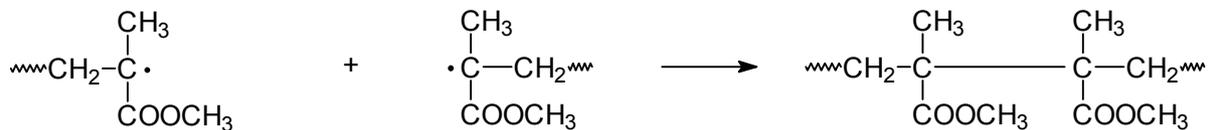
Für die Startreaktion greift das Phenylradikal am unsubstituierten C-Atom der C-C-Doppelbindung des Monomers an. Dies hat zum einen sterische Gründe (der Angriff kann räumlich ungehindert erfolgen), zum anderen ist dieses C-Atom aufgrund seiner positiven Partialladung ( $\delta^+$ ) für das Elektron des Radikals besonders empfänglich. Diese ungleiche Elektronendichte der C=C-Bindung im Monomer ist bedingt durch die im Gegensatz zur  $\sigma$ -Bindung grundsätzlich schwächeren und daher leichter polarisierbaren  $\pi$ -Bindung und zusätzlich durch einen mittelstarken -M-Effekt der C=O-Bindung [133].



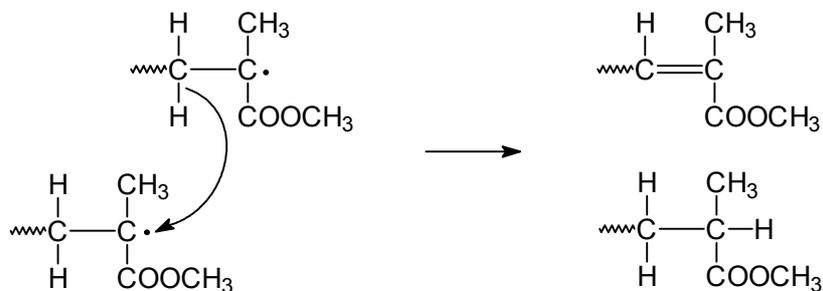
Nach der Startreaktion befindet sich ein Elektron am substituierten C-Atom der Doppelbindung, welches damit selbst zum Radikal wird und verantwortlich für das weitere Wachsen der Kette ist. Über eine Radikalkettenreaktion kommt es also zur Kettenfortpflanzung und somit zur Kettenverlängerung.



Ein Kettenabbruch kann auf zwei Arten erfolgen [136, S. 307]. Die eine Möglichkeit ist die Reaktion zweier Radikale miteinander. Dies können zwei während der Polymerisation entstandene Makroradikale sein oder ein Makroradikal und ein Phenylradikal ( $\text{R}_1$ ).



Die andere Möglichkeit ist eine Disproportionierung, bei der ein Wasserstoffatom von einem Radikal zum anderen übertragen wird. Dabei kommt es zur Ausbildung eines gesättigten Moleküls (Hydrierung) sowie einer endständig ungesättigten Verbindung (Dehydrierung).



### Zusammenfassung der Input-Output Daten:

Bei der Polymerisation fallen als Inputs neben dem Energieverbrauch die Eduktmengen des Monomers sowie des Starters an. Der Energieverbrauch entspricht dem Verbrauch an elektrischer Energie zum Heizen des Wasserbades. Dieser wird auch als Primärenergieverbrauch angegeben. Die Energieabgabe aufgrund der exothermen Polymerisationsreaktion wird im Versuch nicht genutzt (z. B. zur Aufheizung des Wasserbades). Sie wird daher auch nicht dem Verbrauch an Energie gutgeschrieben. Der festgestellte Massenverlust wird hauptsächlich auf das Entweichen von Methacrylat-Dämpfen zurückgeführt. Er errechnet sich aus der Massendifferenz der Edukte (Monomer plus Starter) zum Produkt. Das entstehende Kohlendioxid aus dem Zerfall von Dibenzoylperoxid kann als Luftemission vernachlässigt werden, da dessen Anteil selbst bei vollständiger Umsetzung des Dibenzoylperoxid im Vergleich zum entweichenden Monomer deutlich geringer ist. Alle Angaben werden relativ auf die Masse des gewonnenen Kunststoffes bezogen.

Während der relative Verbrauch an Methacrylsäuremethylester (MMA) und Dibenzoylperoxid etwa gleich hoch ist, bedarf es für die Polymerisierung von industriellem MMA weniger Energie zum Heizen des Wasserbades im Vergleich zu dem Monomer (Sekundär-MMA), welches durch Recycling zurückgewonnen wurde (Tab. 22). Der Grund dafür dürfte in der Verunreinigung des Sekundär-MMA liegen (z. B. durch Bruchstücke von Polymerketten), was das Einsetzen der Polymerisation verzögert und somit ein verlängertes Heizen erfordert.

Der Massenverlust ist bei der Polymerisation von industriellem Methacrylsäuremethylester etwas höher. Der Grund dafür ist eine stärkere exotherme Reaktion des reinen industriell hergestellten Monomers während des Polymerisationsvorganges.

**Tab. 22:** Input-Output-Daten für die radikalische Polymerisation von MMA

	industrielles MMA	Sekundär-MMA aus selbstgewonnenem PMMA	Sekundär-MMA aus industriell hergestelltem PMMA
<b>INPUT</b>			
Methacrylsäuremethylester [g/g Polymer]	1,03	0,93	0,97
Dibenzoylperoxid [g/g Polymer]	0,11	0,10	0,10
Energieverbrauch (elektrischer Strom) [kJ/ g Polymer]	5,2	13,5	17,5
Energieverbrauch (Primärenergie) [kJ KEA/ g Polymer]	15,1	39,1	50,7
<b>OUTPUT</b>			
Luftemissionen (Massenverlust) [g/g Polymer]	0,13	0,06	0,08
PMMA [g]	1	1	1

### 4.3.2 Darstellung von Polystyrol

Polystyrol (PS) ist ein glasklarer und harter Thermoplast. Er ist unempfindlich gegen Feuchtigkeit sowie Säuren und Laugen, aber löslich in polaren und aromatischen Lösemitteln. Polystyrol hat aufgrund seiner niedrigen Herstellungskosten und leichten Verarbeitung breite Anwendung gefunden. Es gilt als physiologisch unbedenklich und kann daher für Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden. Viele Haushaltsgegenstände, Behälter und Abdeckungen (Folie) sind aus PS hergestellt. Styropor ist ein Schaum auf der Basis von treibmittelhaltigem, expandierbarem Polystyrol (EPS).

Technisch wird Polystyrol überwiegend durch radikalische Polymerisation von Styrol gewonnen. Für die folgende Erstellung der Ökobilanz kann PS sowohl radikalisch (mit Dibenzoylperoxid) wie auch kationisch (mit Eisen(III)-chlorid) polymerisiert werden.

#### 4.3.2.1 Darstellung von Polystyrol durch radikalische Polymerisation

Analog der Polymerisation von PMMA kann auch Styrol radikalisch mit Dibenzoylperoxid polymerisiert werden. Durch die exotherme Reaktion der Polymerisation hält das Sieden der Lösung auch außerhalb des warmen Wasserbades an.

#### Geräte:

Reagenzgläser (20\*180 mm), 2 Bechergläser (600 ml), Rührkern, Magnetrührer mit Heizplatte, elektronisches Kontaktthermometer (oder Standard-Thermometer), Energiemeßgerät (ELV Energie-Monitor EM 94)

#### Chemikalien:

Styrol (mindergiftig, Xn), Dibenzoylperoxid (explosionsgefährlich, E, reizend, Xi)

#### Durchführung:

Die Masse des Reagenzglases ist vor dem Versuch zu bestimmen und danach einschließlich des entstandenen Kunststoffes.

Zur Ermittlung des Stromverbrauches wird ein Energiemeßgerät zwischen Magnetrührer und Steckdose geschaltet. Ein Wasserbad (Becherglas mit 500 ml Wasser) ist auf 95 bis 100 °C aufzuheizen. Der Stromverbrauch für die Aufheizphase wird nicht berücksichtigt (nur für Heizen bei ca. 95 °C).

In einem Reagenzglas werden 8 ml Styrol mit 1,2 g Dibenzoylperoxid zusammengegeben. Man stellt das Reagenzglas in das vorbereitete Wasserbad und rührt kurz. Bei Einsetzen der Polymerisation nach zwei bis drei Minuten wird das Reagenzglas aus dem Wasserbad herausgenommen und der Kunststoff für fünf Minuten auspolymerisieren lassen. Danach ist das Reagenzglas 15 Minuten lang in einem kalten Wasserbad abzukühlen.

Die Reagenzgläser mit dem auspolymerisiertem Kunststoff können dem Hausmüll zugegeben werden.

#### Beobachtung:

Kurz nach dem Mischen des Monomers mit dem Radikalstarter entsteht für wenige Sekunden eine gelblich gefärbte Lösung. Nach etwa drei Minuten ist eine deutliche

Schlierenbildung zu sehen, welche die einsetzende Polymerisation andeutet. Die Polymerisation setzt sich außerhalb des Bades unter deutlich erkennbarem Aufschäumen von selbst fort. Die Reaktion ist als Polymerisation exotherm, was sich am heißen Reagenzglas zeigt. Der noch flüssige Kunststoff ist klar, aber leicht gelblich gefärbt. Mit dem Aushärten erhält er ein milchig trübes Aussehen.

### Auswertung:

Styrol kann mit Dibenzoylperoxid thermisch polymerisiert werden. Die bei der Polymerisation freiwerdende Reaktionsenthalpie bewirkt ein Andauern des Siedevorganges auch außerhalb des Wasserbades.

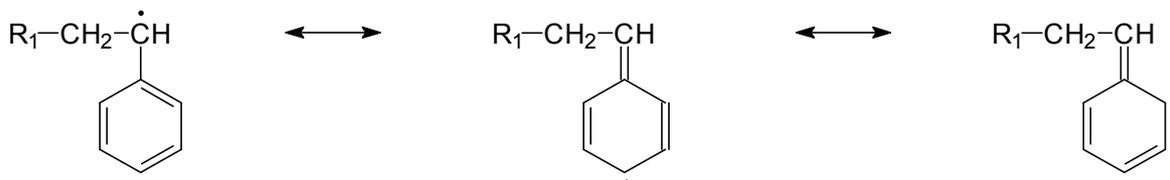
Die relevanten Reaktionsmechanismen werden aus Sicht der Schulchemie erläutert, welche jedoch zum besseren Verständnis ausführlich dargestellt werden sollen.

Die Additionspolymerisation verläuft als Kettenreaktion über Radikale. Startreaktion ist der Zerfall des Dibenzoylperoxids. Es zerfällt unter Erwärmen in Benzoessäureradikale [135, S. 102]. Diese sind im Übergangszustand durch die Delokalisation des ungepaarten Elektrons stabilisiert. Schließlich entstehen Phenylradikale (im folgenden mit  $R_1$  bezeichnet).

Nach der Startreaktion addiert sich  $R_1$  an die Doppelbindung im Styrol-Molekül. Es entsteht ein neues Radikal. Die Addition erfolgt am unsubstituierten Kohlenstoffatom der Doppelbindung, da dies zum einen weniger sterisch ist; zum anderen weist es durch den -I-Effekt der Phenylgruppe am benachbarten C-Atom eine positive Partialladung auf, welche die Aufnahme des Radikal-Elektrons erleichtert.

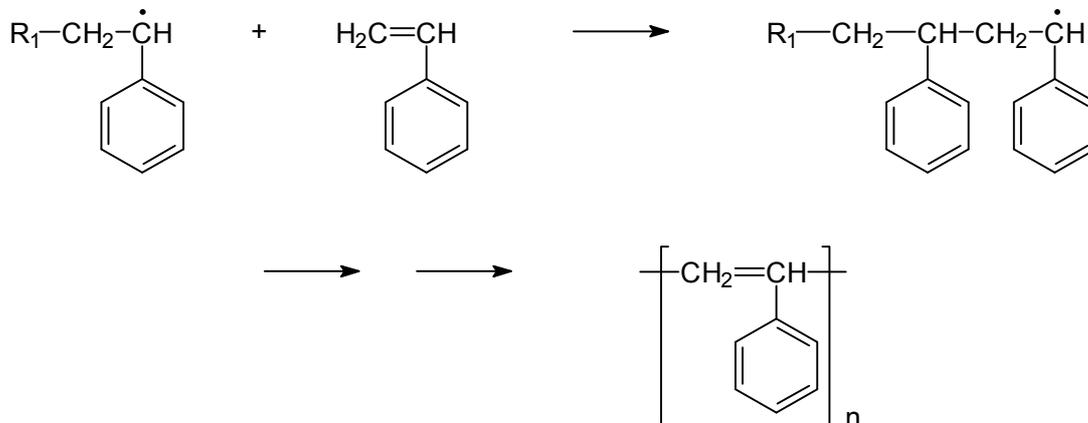


Beim neu entstandenen Radikal ist der Verbleib des freien Elektrons nicht auf das substituierte C-Atom der Doppelbindung beschränkt. Statt dessen entsteht ein durch Mesomerie stabilisiertes Radikal [133, S. 31].



Die Addition eines neuen Styrol-Moleküls führt zur Kettenverlängerung, wobei die ursprüngliche Kette immer um eine Einheit verlängert wird. Die Verzweigungen, welche sich aus den mesomeren Formen ergeben, bleiben hier unberücksichtigt. Ebenso ist zu bedenken, daß die aromatische Seitenkette wesentlich größer ist als die Kohlenwasser-

stoffkette, so daß das PS nicht geradlinig vorliegt, sondern eine Helix (Schraube) ausbildet.



Ein Kettenabbruch kann analog der radikalischen Polymerisation von Methacrylsäuremethylester auf zwei Arten erfolgen (siehe Abschnitt 4.3.1.1). Durch die Reaktion zweier Radikale bildet sich ein nicht weiter reaktives Molekül (Kombination). Mit der Übertragung eines Wasserstoffatoms von einem Radikal zu einem anderen entstehen ein gesättigtes und ein endständig ungesättigtes Molekül, welche ebenfalls nicht weiter polymerisieren können.

### Zusammenfassung der Input-Output Daten:

Als Inputs fallen der Verbrauch von Styrol, Dibenzoylperoxid sowie von elektrischer Energie an, welche als Primärenergie angegeben wird (Tab. 23). Die Energieabgabe aufgrund der exothermen Polymerisationsreaktion wird im Versuch nicht genutzt (z. B. zur Aufheizung des Wasserbades). Sie wird daher auch nicht dem Verbrauch an Energie gutgeschrieben.

Output ist der auftretende Massenverlust, welcher auf das Entweichen von Styrol während der Polymerisation zurückgeführt wird. Das entstehende Kohlendioxid aus dem Zerfall von Dibenzoylperoxid kann als Luftemission vernachlässigt werden, da dessen Anteil selbst bei vollständiger Umsetzung des Dibenzoylperoxid im Vergleich zum entweichenden Monomer deutlich geringer ist. Zum Vergleich mit der kationischen Polymerisation siehe Abschnitt 4.3.2.1.2.

**Tab. 23:** Ergebnisse der radikalischen Polymerisation

	PS (Dibenzoylperoxid als Starter)
INPUT	
Styrol [g/g Polymer]	1,13
Starter [g/g Polymer]	0,19
Energieverbrauch (elektrischer Strom) [kJ/ g Polymer]	7,81
Energieverbrauch (Primärenergie) [kJ/ g Polymer]	22,64
OUTPUT	
Luftemissionen (Massenverlust) [g/g Polymer]	0,31
PS [g]	1

#### 4.3.2.2 Darstellung von Polystyrol durch kationische Polymerisation

Styrol kann neben der oben gezeigten radikalischen Polymerisation auch kationisch mit Eisen(III)-chlorid polymerisiert werden [verändert nach 137, S. 226]. Diese Variante erlaubt die Darstellung eines Kunststoffes ohne Verbrauch an thermischer Energie.

##### Geräte:

Reagenzgläser (20\*180 mm), Becherglas (600 ml)

##### Chemikalien:

Styrol (mindergiftig, Xn), Eisen(III)-chlorid (mindergiftig, Xn)

##### Durchführung:

Die Masse des Reagenzglases ist vor dem Versuch zu bestimmen und danach einschließlich des entstandenen Kunststoffes.

Ein Reagenzglas wird senkrecht eingespannt und mit 10 ml Styrol gefüllt. Man gibt 0,2 g Eisen(III)-chlorid hinzu. Es wird nicht umgerührt. Nach fünf Minuten Aushärten wird das Reagenzglas mit dem Kunststoff zum Abkühlen für 15 Minuten in ein kaltes Wasserbad gestellt.

Die Reagenzgläser mit dem auspolymerisierten Kunststoff können in den Hausmüll gegeben werden.

##### Beobachtung:

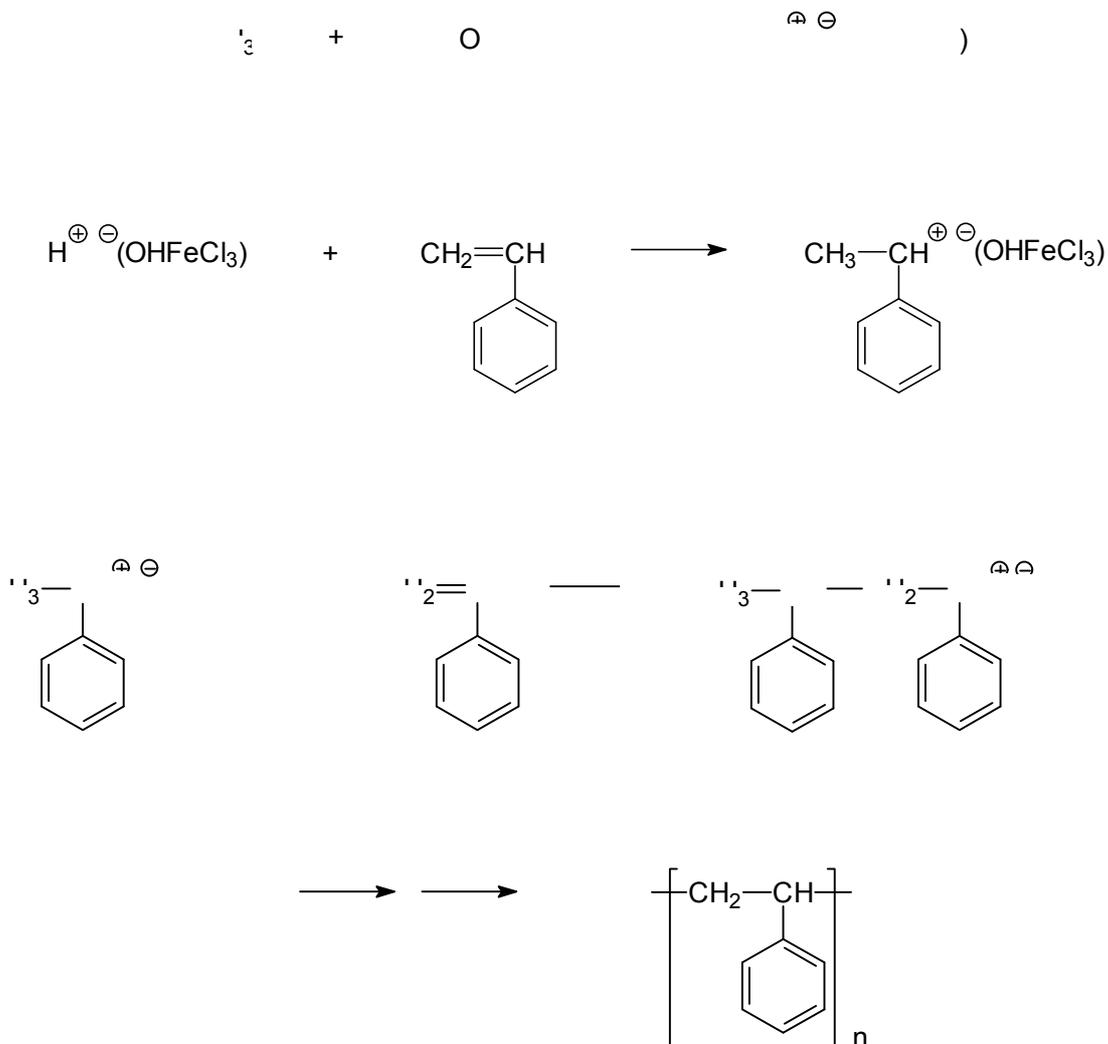
Spätestens nach dreißig Sekunden setzt die Polymerisation ein. Es kommt zu einem heftigen Aufschäumen mit bis zur dreifachen Volumenausdehnung. Die Polymerisation ist

deutlich exotherm (Reagenzglas wird heiß). Die Lösung wird zunehmend zähflüssiger. Der Kunststoff besitzt eine dunkelgrüne bis schwarze Farbe und ist nach dem Aushärten fest.

### Auswertung:

Die relevanten Reaktionsmechanismen werden aus Sicht der Schulchemie erläutert, welche jedoch zum besseren Verständnis ausführlich dargestellt werden sollen.

Styrol kann mit Eisen(III)-chlorid kationisch polymerisiert werden. Eisen(III)-chlorid ist eine Lewis-Säure. Sie kann jedoch nicht allein die Polymerisation starten. Dazu ist Wasser als Koinitiator erforderlich, welches in Spuren vorliegt. Es dient als Protonenspender [138; 139, S. 581 ff.; 140, S. 8 ff.]. Die Reaktion mit der Lewis-Säure setzt ein Proton frei, welches zusammen mit dem Gegenion Teil eines Lewis-Säure-Base Komplexes darstellt. Das elektrophile Proton greift das  $\pi$ -Elektronensystem des Styrol-Moleküls an (Startreaktion). Es bildet sich ein Carbeniumion, welches dann als Makrokation Träger der weiteren Reaktion ist.



Das Kettenwachstum kann durch verschiedene Reaktionen abgebrochen werden. Im vorliegenden Fall ist eine Reaktion mit Nukleophilen (beispielsweise mit Verunreinigungen) oder eine Rekombination von Anion und Kation möglich [140, S. 10 f.].

### Zusammenfassung der Input-Output Daten:

Als Inputs müssen die eingesetzten Styrol- und Eisenchlorid-Mengen erfasst werden (Tab. 24). Während der Polymerisation entsteht ein Massenverlust, welcher auf das Entweichen von Styrol zurückgeführt wird (Luftemission).

**Tab. 24:** Input-Output-Daten für die Polymerisation von Styrol

	PS (Eisen(III)-chlorid als Starter)	PS (Dibenzoylperoxid als Starter)
INPUT		
Styrol [g/g Polymer]	1,07	1,13
Starter [g/g Polymer]	0,02	0,19
Energieverbrauch (elektrischer Strom) [kJ/ g Polymer]	-	7,8
Energieverbrauch (Primär- energie) [kJ/ g Polymer]	-	22,6
OUTPUT		
Luftemissionen (Massen- verlust) [g/g Polymer]	0,09	0,31
PS [g]	1	1

### Vergleich der radikalischen und kationischen Polymerisation

Sowohl die kationische als auch die anionische Polymerisation von Styrol erfordert die Anwesenheit eines Starters. Die kationische Polymerisation führt zu einem schwarzgefärbten Kunststoff. Nimmt man diesen optischen Makel in Kauf, so erhält man einen Kunststoff ohne Zufuhr thermischer Energie. Es reicht allein die Zugabe an Eisen(III)-chlorid aus. Sie benötigt zudem eine relativ geringere Menge an Monomerem und Starter. Der Massenverlust fällt ebenfalls geringer aus, was mit der kürzeren Polymerisationszeit zusammenhängt.

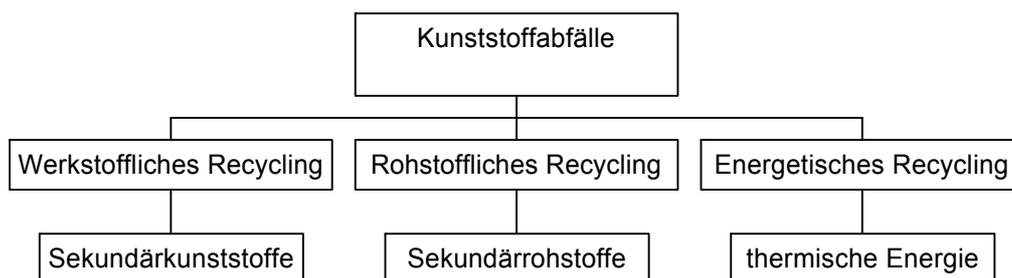
### 4.3.3 Recycling von Kunststoffen

Für Kunststoffe existieren mehrere Möglichkeiten des Recycling. Grob zusammengefaßt können drei Arten unterschieden werden (Abb. 37) [141, S. 212; 115]. Nicht aufgeführt ist die bloße Wiederverwendung von Endprodukten (Re-use), wie sie zum Beispiel im Rahmen der Runderneuerung von Autoreifen praktiziert wird.

Bei dem werkstofflichen oder materiellen Recycling bleiben die Makromoleküle des Kunststoffs weitgehend erhalten. Ziel des werkstofflichen Recycling ist eine Rückgewinnung des Werkstoffs als Sekundärkunststoff. Dies kann etwa durch direkte Rückführung von Kunststoff-Abfällen, welche bei der Produktion anfallen, in den Produktionsprozeß geschehen. Eine andere Möglichkeit besteht im Umschmelzen thermoplastischer Abfälle.

Ziel des rohstofflichen oder chemischen Recycling ist die Gewinnung von Sekundärrohstoffen in Form niedermolekularer Verbindungen. Man erhält entweder die Monomerbausteine oder je nach Verfahren chemische Rohstoffe, die nach Auftrennung und Reinigung weiterverwendet werden können. Zu den rohstofflichen Recyclingverfahren gehören beispielsweise die Hydrolyse, Hydrierung und Pyrolyse. Mittels Hydrolyse können etwa beim Recycling von Polyurethanschäumen die Ausgangsstoffe (das zugrundeliegende Diamin und die Di- oder Polyhydroxyverbindungen) zurückgewonnen werden. Bei der Hydrierung werden unter den Reaktionsbedingungen von ca. 400 bar und 500 °C die Makromoleküle thermisch gespalten. Die organischen Bruchstücke werden mit Wasserstoff abgesättigt. In der Folge erhält man eine große Zahl von Produkten (bei Polyolefinen vor allem Alkane). Unter Pyrolyse versteht man den thermischen Abbau von Kunststoffen unter völligem oder teilweisem Ausschluß von Sauerstoff. Je nach gewähltem Kunststoffabfall gewinnt man unterschiedliche Mengen eines Pyrolysegases beziehungsweise -öls, welche weiter zur Energiegewinnung oder als petrochemischer Rohstoff genutzt werden kann.

Beim energetischen Recycling nutzt man den relativ hohen Heizwert der Kunststoffe aus. Der Heizwert eines Kilogramms Kunststoffabfall entspricht nach KAMINSKY etwa dem eines Liters Heizöl [115]. Der Heizwert von beispielsweise Polyolefinen, Polystyrol und diversen Kautschuken liegt mit über 36 MJ/kg mit am höchsten unter den Polymeren [142, S. 652].



**Abb. 37:** Übersicht Recyclingverfahren

Für das Recycling vom PMMA im Schulversuch wurde ein Verfahren der rohstofflichen Wiederverwertung angewandt, bei dem durch Erhitzen das Polymer in seine Monomere zerlegt wird (Abschnitt 4.3.3.1).

Polystyrol wird über ein Verfahren des werkstofflichen Recycling wiederverwertet, wobei der Kunststoff zunächst in einem Lösemittel gelöst und anschließend das Lösemittel wieder durch Destillation zurückgewonnen wird (Abschnitt 4.3.3.2).

Das energetische Recycling wird durch die kalorimetrische Bestimmung des Brennwertes simuliert (Abschnitt 4.3.3.3).

Die Ergebnisse dieser Versuche (Input-Output-Daten) dienen zur Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz im Rahmen des Chemieunterrichts.

#### 4.3.3.1 Rohstoffliches Recycling von PMMA

Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) läßt sich thermisch in das Monomer zerlegen. Das ist möglich, weil die Polymerisation reversibel ist und bei höheren Temperaturen das PMMA zum großen Teil wieder in Methacrylsäuremethylester zerfällt. Dabei erfolgt unter idealen Pyrolyse-Bedingungen keine thermische Zersetzung des Monomeren, so daß es wieder in einem Kreislauf zur Kunststoffherstellung eingesetzt werden kann. Die Ausbeute beträgt in technischen Anlagen unter Luftausschluß und bei einer Temperatur von 450 °C ca. 97 % [148]. Unter schulischen Bedingungen muß ein Qualitätsverlust beim Monomer in Kauf genommen werden, da es zu einem Zutritt von Luftsauerstoff und somit zu einem teilweisen oxidativen Abbau kommt.

Im folgenden Schulversuch wird eine Kunststoffprobe über einem Bunsenbrenner erwärmt und die dabei entstehenden Gase werden in einer Kühlfalle kondensiert. Um die Depolymerisation innerhalb einer Ökobilanz unter dem Gesichtspunkt des Energieverbrauches bewerten zu können, ist vor Beginn der Erdgas-Verbrauch des Bunsenbrenners festzustellen. Mittels Brenner ist im Vergleich zum Ölbad eine schnelle, ausreichend hohe und punktuelle Energiezufuhr möglich.

##### Geräte:

Reagenzgläser (20\*180 mm), Gummistopfen (1 Loch, passend für die Reagenzgläser), Bunsenbrenner, gewinkeltes Glasrohr, Becherglas (500 ml), Meßzylinder (500 ml)

##### Chemikalien:

PMMA-Abfälle, Standard PMMA (z. B. "Plexiglas 7N", RÖHM GmbH) oder selbsthergestelltes PMMA aus Abschnitt 4.3.1.1.

##### Durchführung:

Vorbereitung:

Zur Bestimmung des Gasverbrauches wird der Gasregler des Brenners zu 50 bis 75 % geöffnet und mit Klebeband fixiert. Die Luftzufuhr wird zur Messung geschlossen. Man öffnet die Gaszufuhr und fängt das Gas pneumatisch in einem Meßzylinder auf. Es wird die Zeit gemessen, bis der Zylinder mit Gas gefüllt ist. Daraus läßt sich der Gasverbrauch und somit der Energieverbrauch pro Minute errechnen.

Die Verbrennungsenthalpie  $\Delta H$  von Methan beträgt -890,8 kJ/mol [117, Kap. 5, S. 89]. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung errechnet sich ein Molvolumen von 24,5 l bei einer Temperatur von 20 °C. Der Brenner verbraucht beispielsweise 2,26 l Erdgas pro Minute.

Daraus ergibt sich ein Energieverbrauch von 82,2 kJ/min. Zum Gebrauch des Brenners wird dessen Luftzufuhr dann maximal geöffnet.

Die Masse des Reagenzglases ist vor dem Versuch zu bestimmen und danach einschließlich des entstandenen Kunststoffes.

Als Edukt können entweder selbsthergestelltes Polymethacrylat (aus Abschnitt 4.3.1.1), Abfälle oder industriell hergestelltes Granulat (jeweils 10 g) eingesetzt werden. Das mit Kunststoff gefüllte Reagenzglas wird schräg eingespannt und mit einem Stopfen und dem gewinkelten Glasrohr versehen. Das andere Ende des Glasrohres ragt in ein leeres Reagenzglas, welches in einem kalten Wasserbad steht. Das Reagenzglas mit dem Kunststoff wird langsam mit dem eingestellten Bunsenbrenner erwärmt.

Beim Arbeiten mit selbsthergestelltem PMMA ist von oben nach unten zu erhitzen, da andernfalls der Reagenzglasinhalt überschäumen kann. Das Erhitzen wird abgebrochen, sobald sich der noch vorhandene Kunststoff dunkelbraun bis schwarz färbt.

Die Kunststoff-Reste können dem Hausmüll zugegeben werden.

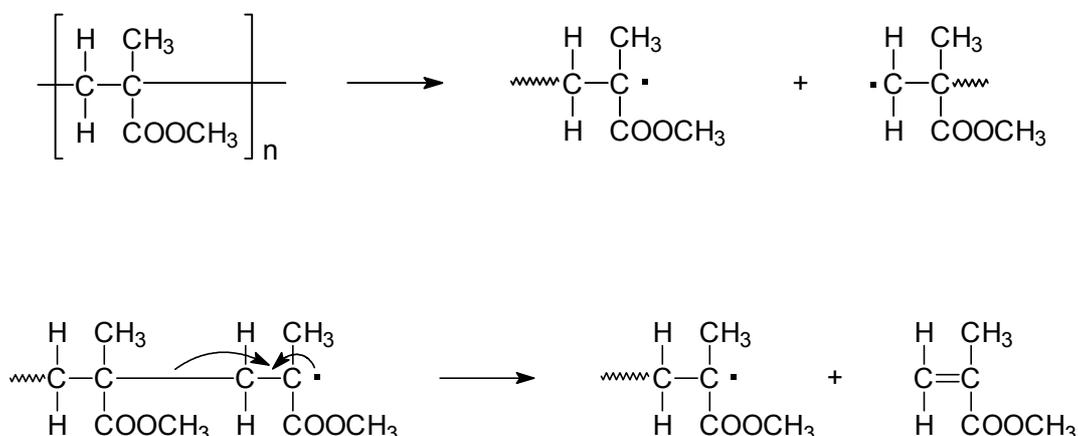
### Beobachtung:

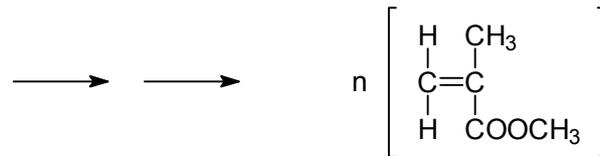
Der Kunststoff schmilzt und es steigen weiße Dämpfe auf. Diese kondensieren im zweiten Reagenzglas. Man gewinnt ein leicht bis stark gelblich gefärbtes flüssiges Produkt, das sich auch vom Geruch vom reinen Methacrylsäuremethylester unterscheidet.

### Auswertung:

PMMA kann thermisch depolymerisiert werden. Der Abbau erfolgt über Radikale. Zunächst kommt es zu einem Bruch der Hauptkette, aus der zwei Radikale hervorgehen. Beginnend am Kettenende werden in rascher Folge Methacrylsäuremethylester-Moleküle abgetrennt. Es erfolgt eine Eliminierung von Monomeren aus dem Polymerradikal (Depropagierung) [143, S. 193 f.]. Die Abspaltung wird durch den -M-Effekt der Estergruppe begünstigt.

Der Reaktionsablauf ist nachfolgend auf Schulniveau dargestellt. Durch Bruch der Polymerkette entstehen Radikale, welche am Kettenende schrittweise Methacrylsäuremethylester-Moleküle abspalten.





Neben dem Monomer entstehen eine Vielzahl weiterer hoch- und niedrigsiedender Verbindungen. Unter Pyrolysebedingungen (Sauerstoff-Ausschluß) beträgt ihr Anteil nur wenige Prozent (siehe Tab. 33).

Ein Nachweis der Doppelbindungen von Methacrylat ist über die Standardprobe mit Bromwasser oder mit einer bromhaltigen Hexan-Lösung problemlos möglich.

### Zusammenfassung der Input-Output Daten:

Bei diesen Daten ist zu beachten, daß die funktionelle Einheit "g Polymer" lautet und sich somit auf den Kunststoff als Edukt bezieht.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse des Recycling von PMMA zeigen sich Unterschiede zwischen selbsthergestelltem und industriellem PMMA (Tab. 25). Bei dessen Recycling entsteht relativ etwas mehr an Monomer als beim selbst gewonnenem PMMA. Der Energiebedarf ist in beiden Fällen nahezu gleich hoch.

Selbsthergestelltes PMMA läßt sich unter den oben genannten Bedingungen nicht so weit recyceln wie der industriell gefertigte Kunststoff. Die Zersetzung erfolgt vermutlich aufgrund des geringeren Polymerisationsgrades früher, so daß mehr Kunststoff als Abfall im Reagenzglas zurückbleibt.

Das für diesen Versuch eingesetzte selbsthergestellte PMMA wurde unter schul-experimentellen Bedingungen erhalten. Ein wichtiger begrenzender Faktor bei Schulversuchen ist der Mangel an Zeit. Folglich werden solche Versuche, wie es hier auch der Fall ist, darauf ausgelegt, in möglichst kurzer Zeit mit einem akzeptablem Ergebnis durchgeführt werden zu können. Aus dem Grund wurde auf eine Aufreinigung des selbstgewonnenen Sekundär-MMA durch Destillation verzichtet und somit ein qualitativ schlechteres Monomer in Kauf genommen. Dieses kann jedoch auch als Ausgangsprodukt für die Darstellung eines Sekundär-PMMA dienen. Der Versuch wird ebenfalls aus zeitlichen Gründen und aufgrund der geringen schulischen Ansprüche an das Aussehen des fertigen Kunststoffs relativ schnell innerhalb weniger Minuten durchgeführt. Dagegen kann bei der technischen Darstellung von PMMA-Platten die Polymerisation bis zu mehreren Tagen in Anspruch nehmen.

Die Luftemission ergibt sich aus dem vermuteten Massenverlust an Monomerem und an kurzen Kettenbruchstücken, welche während der Reaktion in die Luft entweichen. Diese Menge ist für beide PMMA-Sorten etwa gleich.

Die Entstehung von Kohlendioxid bei der Verbrennung des zum Heizen eingesetzten Gases wird nicht berücksichtigt. Eine solche Vorgehensweise ist analog zu jener, wie sie für den Verbrauch von elektrischem Strom gewählt wurde. Auch hier wurden die im Rahmen der Stromherstellung auftretenden Umwelteinwirkungen nicht erfaßt, sondern lediglich der primärenergetische Aufwand (KEA) berücksichtigt.

**Tab. 25:** Input-Output-Daten für das Recycling von PMMA

	selbthergestelltes PMMA	industriell hergestelltes PMMA
INPUT		
PMMA [g/g Polymer]]	1,0	1,0
Energieverbrauch (Gas) [kJ/g Polymer]	21,9	22,3
Energieverbrauch (Primärenergie) [kJ/g Polymer]	24,6	25,1
OUTPUT		
Abfall [g/g Polymer]	0,14	0,07
Luftemissionen (Massenverlust) [g/g Polymer]	0,06	0,03
Monomer [g/g Polymer]	0,80	0,90

#### 4.3.3.2 Werkstoffliches Recycling von PS

Im folgenden Versuch wird Polystyrol werkstofflich recycelt. Dazu wird der Kunststoff zunächst in einem Lösemittel (Cyclohexanon) gelöst. Ein großer Teil davon kann danach durch Destillation wieder zurückgewonnen werden. Ein Recycling des im Schulversuch selbst hergestellten PS ist nicht durchführbar (vermutlich aufgrund des geringeren Polymerisationsgrades), weshalb industriell hergestelltes PS-Granulat verwendet wird.

#### Geräte:

Zweihalskolben (250 ml, NS 29, NS 14), Heizpilz (250 ml), Schliff-Thermometer (NS 14), Rückflußkühler (NS 29), Rührkern, Energiemeßgerät (ELV Energie-Monitor EM 94)

#### Chemikalien:

Cyclohexanon<sup>21</sup> (Xn), Polystyrol-Granulat (z. B. "Vestyron 114", HÜLS AG)

#### Durchführung:

Man gibt im Zweihalskolben zu 50 ml Cyclohexanon unter Rühren etwa 5 g des PS-Granulates und erhitzt zur Beschleunigung des Lösens unter Rückfluß bis zum Sieden. Ständiges Rühren bis zum Lösen des PS ist wegen der Gefahr des Verklebens und des Überkochens notwendig.

<sup>21</sup> Für diesen Versuch ist das einzusetzende Cyclohexanon aufgrund vorhandener Verunreinigungen eventuell mittels Destillation zu reinigen.

Der Energiebedarf für den Magnetrührer und den Heizpilz wird gemessen. Der Wasserbedarf für den Rückflußkühler wird ebenfalls ermittelt. Die Lösung kann unter Verschluss für weitere Versuche aufbewahrt werden.

**Beobachtung:**

Nach etwa 17 bis 20 Minuten ist der Kunststoff gelöst. Es ist eine klare Lösung entstanden.

**Auswertung:**

Es ist eine PS-Cyclohexanon-Lösung entstanden, in welcher der Kunststoff gelöst ist.

**Zusammenfassung der Input-Output Daten:**

Für das Lösen von PS in Cyclohexanon sind neben dem Einsatz eines Lösemittels auch Energie zum Heizen und Rühren sowie Wasser für den Kühler erforderlich (Tab. 26). Für den Rückflußkühler wurde von einem mittleren Verbrauch von 500 ml in der Minute ausgegangen. Die Angabe zum Energieverbrauch (Strom, Primärenergie) beinhaltet den Verbrauch des Heizpilzes sowie des Rückflußkühlers. Alle Angaben beziehen sich auf 1 g eingesetztes Polymer.

**Tab. 26:** Input-Output-Daten für das Recycling von PS in Cyclohexanon (Teil 1, Lösen)

Input/Output	PS
INPUT	
PS [g/g Polymer]	1,0
Cyclohexanon [g/g Polymer]	9,5
Energieverbrauch (elektrischer Strom) [kJ/ g Polymer]	26,2
Energieverbrauch (Primärenergie) [kJ/ g Polymer]	76,0
Wasser [l/ g Polymer]	1,9

**Rückgewinnung des gelösten PS durch Abdestillieren des Lösemittels**

Die im Vorversuch hergestellte Lösung von PS in Cyclohexanon wird hier weiterverwendet. Das Lösemittel wird abdestilliert und aufgefangen. Das PS bleibt nach Abdestillieren im Kolben zurück. Der Verbrauch an Energie und Wasser wird ermittelt. Das im Versuch redestillierte Cyclohexanon kann für weitere Experimente verwendet werden.

**Geräte:**

Zweihalskolben (250 ml, NS 29, NS 14 aus Vorversuch), Heizpilz (250 ml), Schliff-Thermometer (NS 14), Magnetrührer, Rührkern, Destillieraufsatz, Liebigkühler, Vakuumporstoß (gebogen), Übergangsstück, Einhalskolben (100ml), Kristallisierschale (Durchmesser ca. 13 cm), Alufolie, Backpapier

**Chemikalien:**

Lösung von PS in Cyclohexanon (aus Vorversuch)

**Durchführung:**

Die PS-Cyclohexanon-Lösung wird einer Destillation unterzogen. Der Destillieraufsatz ist mit Alufolie umwickelt.

Die Destillation wird für 15 bis 18 min betrieben. Innerhalb dieses Zeitraumes können bis zu 35 ml Cyclohexanon abdestilliert werden. Eine weitere Rückgewinnung des Lösemittels sollte vermieden werden, damit die Lösung sich noch gut aus dem Kolben gießen läßt. Die im Kolben verbliebene PS-Cyclohexanon-Lösung wird in eine mit Backpapier ausgelegte Kristallisierschale gegossen (Reste eventuell mit einem Spatel aus dem Kolben herauskratzen). Diese Schale wird entweder in einem Trockenschrank mit Abzug bei etwa 50 °C oder im Abzug für mehrere Tage stehengelassen.

Zur Entsorgung des im Kolben verbliebenen restlichen Kunststoffes wird der Kolben mit Ethanol durchgespült. Das Polystyrol fällt aus und wird nach Trocknen im Hausmüll entsorgt. Die Lösung aus Cyclohexanon und Ethanol wird dem Lösemittelbehälter zugeführt.

**Beobachtung:**

Die PS-Cyclohexanon-Lösung beginnt nach ca. 10 min zu sieden. Je mehr Lösemittel verdampft, um so zähflüssiger wird die zurückbleibende PS-Cyclohexanon-Lösung. Der gewonnene Kunststoff ist weißlich matt und weist noch einen sehr schwachen Geruch nach Cyclohexanon auf.

**Auswertung:**

Eine Lösung von PS in Cyclohexanon kann durch Destillation getrennt werden. Je mehr Cyclohexanon überdestilliert, um so weniger Lösemittel für das PS ist vorhanden, um so zähflüssiger wird die Lösung. In der Aluminiumschale erhält man einen je nach Lösemittelgehalt weichen bis mittelharten Kunststoff.

**Zusammenfassung der Input-Output Daten:**

Als Inputs fallen Wasser- und Energieverbrauch an (Tab. 27). Es wurde von einem Kühlwasserverbrauch von 500 ml Wasser in der Minute ausgegangen. Für die Berechnung des Gesamtenergieverbrauchs wird der jeweilige Energieverbrauch von Heizpilz und Magnetrührer zusammengefaßt. Das redestillierte Lösemittel kann wiederverwertet werden. Teile des Lösemittels verbleiben zunächst noch im neuen Kunststoff. Abfall entsteht dadurch, daß eine gewisse Menge des PS nach Ausgießen im Kolben zurückbleibt. Alle Angaben beziehen sich auf 1 g eingesetztes Polymer.

**Tab. 27:** Input-Output-Daten für das Recycling von PS in Cyclohexanon (Teil 2, Destillation)

Input/Output	PS
INPUT	
Wasser [l/ g Polymer]	1,6
Energieverbrauch (elektrischer Strom) [kJ/ g Polymer]	22,3
Energieverbrauch (Primärenergie) [kJ/ g Polymer]	64,6
OUTPUT	
recycl. Cyclohexanon [g/g Polymer]	6,3
recycl. PS [g/g Polymer]	0,7
Abfall Polymer [g/g Polymer]	0,3

Eine Zusammenfassung der anfallenden Material- und Energieströme zeigt Tab. 28. Das Lösen von PS sowie die Destillation benötigen nahezu die gleiche Menge an elektrischer Energie. Etwa zwei Drittel der Menge des eingesetzten Lösemittels sowie des zu recycelnden Kunststoffes können zurückgewonnen werden (der Rest wird als Luftemission erfaßt). Alle Angaben beziehen sich auf 1 g eingesetztes Polymer.

**Tab. 28:** Input-Output-Daten für das Recycling von PS (zusammengefaßt)

Input/Output	Gesamtbilanz PS
INPUT	
PS [g/g Polymer]	1,0
Wasser [l/g Polymer]	3,5
Energie (elektrischer Strom) [kJ/g Polymer]	48,5
Lösen	26,2
Destillation	22,3
Energie (Primärenergie) [kJ/g Polymer]	140,6
Lösen	76,0
Destillation	64,6
Cyclohexanon (Verbrauch) [g/g Polymer]	9,5
OUTPUT	
Luftemissionen (Verlust Cyclohexanon) [g/g Polymer]	3,2
Abfall Polymer [g/g Polymer]	0,3
recycl. Cyclohexanon [g/g Polymer]	6,3
recycl. PS [g/g Polymer]	0,7

### 4.3.3.3 Kalorimetrische Bestimmung des Brennwertes von Kunststoffen

Die Verbrennung von Kunststoffen ist eine von mehreren Möglichkeiten des Recycling. Um das Verfahren der Verbrennung innerhalb einer Ökobilanz mit anderen Recycling-Methoden zu vergleichen, ist es unerlässlich, den genauen Brennwert der jeweiligen Kunststoffe zu kennen. Dieser kann aus der Fachliteratur entnommen, mit einer Näherungsformel nach BRAUN errechnet (s. u.) oder auch experimentell bestimmt werden.

Der im folgenden beschriebene Versuch stellt eine Möglichkeit vor, mit einfachen schulischen Mitteln den Brennwert relativ exakt zu ermitteln. Dabei wird auf einen bereits beschriebenen Kalorimeter zurückgegriffen [144]<sup>22</sup>. Das Entzünden des Kunststoffs erfolgt mit Hilfe eines kleinen Stücks glühender Kohle, welche zunächst außerhalb der Apparatur entzündet und dann zum Kunststoff in das Reagenzglas dazugeben wird. Durch die bei der Verbrennung freiwerdende Wärme wird das umgebende Wasser erwärmt. Über das Ausmaß der Erwärmung kann daraufhin der Brennwert des Kunststoffs rechnerisch ermittelt werden.

Die Begriffe Heiz- und Brennwert werden oft synonym gebraucht, haben aber eine unterschiedliche Bedeutung. Bei beiden Größen handelt sich um die Wärmemenge, welche bei vollständiger Verbrennung des Brennstoffes frei wird. Der Unterschied liegt darin, daß bei der Berechnung des Brennwertes die Kondensation des Wassers, welches sowohl im Brennstoff vorhanden ist, als auch durch die Verbrennung entsteht, nicht berücksichtigt wird. Der Brennwert wird auch als oberer Heizwert ( $H_o$ ) bezeichnet. Dieser ist somit die Summe aus dem unteren Heizwert  $H_u$  und der Kondensationsenthalpie.

#### Geräte:

Reagenzglas mit Ansatz unten, Gummistopfen mit Loch, Glasrohr, Kupferrohr (Länge ca. 50 cm), Magnetrührer mit Rührkern, zwei Kunststoffbecher (ca. 400 ml), Temperaturmeßgerät mit Temperaturfühler (1/10 °C-Einteilung), Stoppuhr, Durchflußmesser (BAILEY-FISCHER & PORTER FP-1/4-20-G-5) oder Meßzylinder (250 ml), Brenner, Fön oder Kaltgebläse

#### Chemikalien:

Sauerstoff (Flasche), Kunststoff-Granulat, Holzkohle-Stücke

Folgende Kunststoffe wurden eingesetzt:

PS: Vestyron 114 (HÜLS AG)

PMMA: Plexiglas 7N (ROHM UND HAAS GmbH)

---

<sup>22</sup> Der Kalorimeter kann käuflich erworben werden (Fa. Hedinger, Stuttgart) oder ist auch leicht selbst zu bauen.

**Durchführung:**

## Vorbereitung:

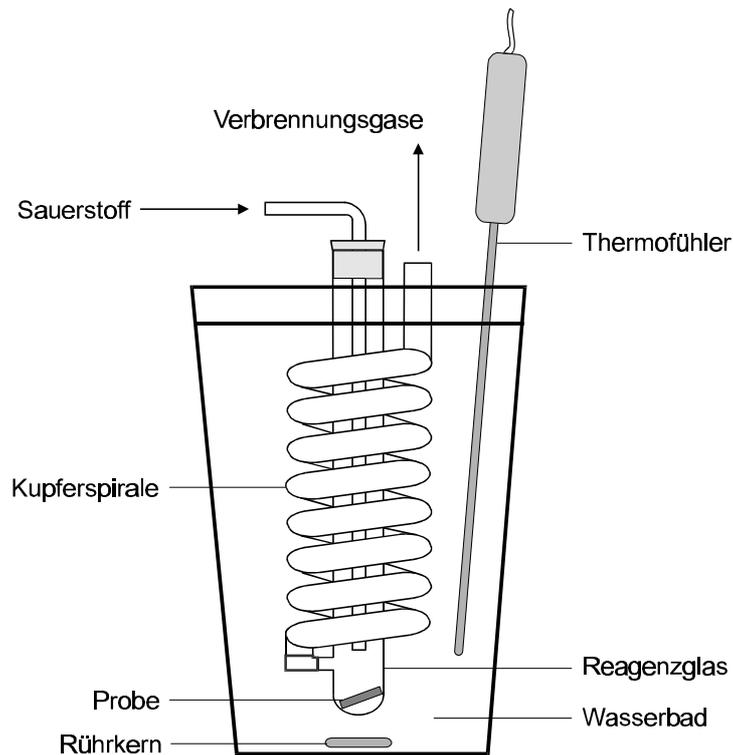
Der Sauerstoff-Durchfluß soll etwa 400 ml in der Minute betragen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Durchfluß zu ermitteln. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Durchflußmessers, welcher zwischen Sauerstoffflasche und Apparatur geschaltet wird. Eine andere ist die, eine bestimmte Gasmenge pneumatisch in einem geeigneten Meßzylinder (250 ml) aufzufangen und dafür die Zeit zu messen.

Die zum Verbrennen des Kunststoffes eingesetzte Kohle muß vor Versuchsbeginn in einem Reagenzglas durchgeglüht werden, um das in der Kohle enthaltene Wasser zu verdampfen. Durch die zusätzlich erforderliche Verdampfungswärme für das Wasser würde das Meßergebnis verfälscht werden. Die Kohlestücke können unter Luftabschluß für weitere Messungen aufbewahrt werden. Folgende Teile der Apparatur werden vor Beginn der Reaktion gewogen: Reagenzglas, Kupferspirale, Gummischlauch-Stücke und eingesetzte Wassermenge.

Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 38. Der Kunststoff wird in einem Reagenzglas unter Sauerstoffzufuhr verbrannt. Der Sauerstoff wird über ein gebogenes Glasrohr zugeführt. Die heißen Verbrennungsgase werden über einen seitlichen Ansatz am Reagenzglas in eine Kupferspirale geleitet. Die Wärme wird an das umgebende Wasserbad abgeführt. Dessen Erwärmung wird über einen Thermofühler erfaßt. Während der Verbrennung wird ständig gerührt.

Zur Verbrennung werden etwa 0,1 g Kohle (möglichst in einem Stück) und 0,2 g Kunststoff-Granulat möglichst bis auf 1/1000 g genau abgewogen. Der Kunststoff wird in das Reagenzglas gegeben und die Apparatur für wenige Minuten mit Sauerstoff gespült. Die Kohle wird zum Entzünden kurz in die Flamme des Brenners gehalten, sofort in das Reagenzglas gegeben und mit der Temperaturmessung begonnen. Alle dreißig Sekunden wird die jeweils herrschende Temperatur notiert. Eine wesentlich bessere Verbrennung wird erreicht, wenn das in das Reagenzglas ragende Glasrohr bis zum Erlöschen der Flamme kreisförmig bewegt wird. Nach zehn Minuten wird die Messung abgebrochen. Man trocknet das Reagenzglas mit Hilfe des Föns oder des Gebläses und wiegt das Glas mit Rückstand erneut.

Die Kunststoff-Rückstände können dem Hausmüll zugeführt werden. verunreinigten Reagenzgläser werden für mehrere Stunden mit einer Seifenlösung gefüllt und können danach leicht gesäubert werden.



**Abb. 38:** Versuchsaufbau zur kalorimetrischen Bestimmung des Brennwertes

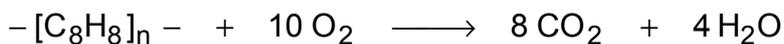
### Beobachtung:

Die in der Brennerflamme entzündete Kohle verbrennt mit heller Flamme im Sauerstoffstrom. Der Kunststoff beginnt zu schmelzen und zu rußen, verbrennt aber letztlich nicht vollständig. Die Verbrennung ist nach etwa zwei bis drei Minuten abgeschlossen. Man erkennt später schwarz-braun gefärbte Kunststoffreste und Ruß am Boden sowie kondensiertes Wasser im oberen Teil des Reagenzglases.

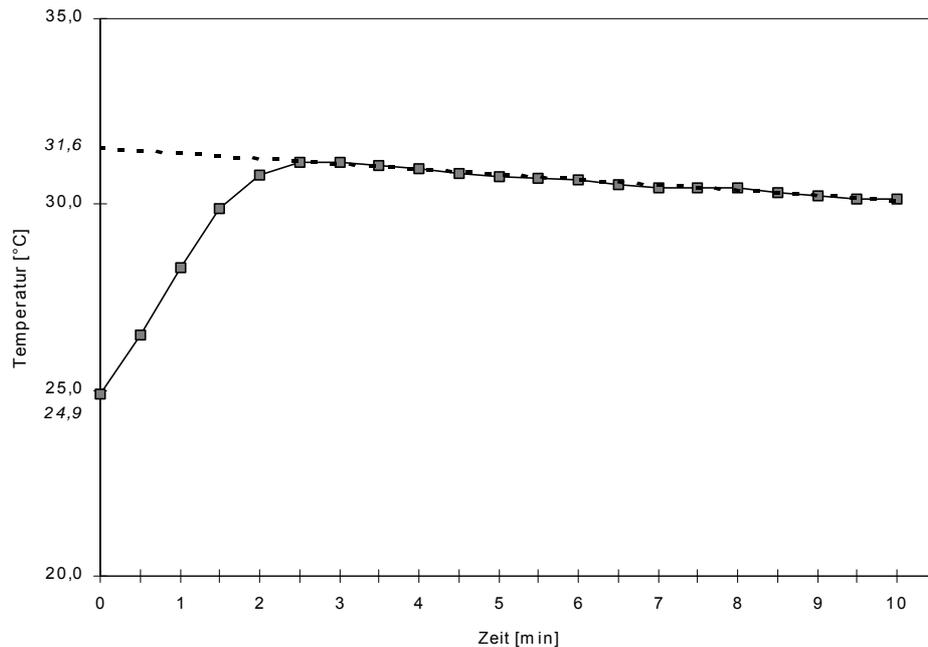
### Auswertung:

Im Sauerstoffstrom verbrennt der Kunststoff zu Kohlendioxid und Wasser.

Beispiel: Verbrennung von PS



Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärmemenge erwärmt über das Kupferrohr das umgebende Wasser. Die Temperaturänderung wird festgehalten und die erhaltenen Meßwerte werden in ein Temperatur-Zeit-Diagramm eingetragen (Abb. 39). Es ist zu erkennen, daß die Temperatur bis zum Erliegen der Verbrennung steil ansteigt, um danach flach abzufallen. Die Punkte auf der Abkühlkurve werden mit einer Gerade verbunden und diese bis zum Schnittpunkt mit der y-Achse extrapoliert. Die Differenz zwischen diesem so erhaltenen Schnittpunkt und der Temperatur zu Beginn der Messung entspricht der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , welche zur Ermittlung der Wärmemenge  $Q$  erforderlich ist.



**Abb. 39:** Zeit-Temperatur-Diagramm einer kalorimetrischen Messung (Beispiel PS)

Zur Berechnung des Brennwertes wird zunächst die freigesetzte Wärmemenge  $Q$  aus  $\Delta T$  sowie den jeweiligen Wärmekapazitäten und Massen bestimmt. Davon abzuziehen ist die durch die Verbrennung der Kohle freigesetzte Wärmemenge.

Es kann davon ausgegangen werden, daß die hinzugegebene Kohle vollständig verbrennt ( $m(\text{Kohle})$ ). Jedoch verbrennt der Kunststoff nicht vollständig. Es bleiben Reste am Boden des Reagenzglases zurück, die in Berechnung der Wärmemenge  $Q$  einfließen. Mit  $m(\text{Ku})$  wird die Masse des verbrannten Kunststoffes bezeichnet. Zur Vereinfachung können die Massen von Glas und Gummi zusammenaddiert werden.  $\Delta H(\text{Kohle})$  bezeichnet die Standardbildungsenthalpie von Kohlendioxid aus Kohlenstoff.

$$Q = -\Delta T \times [m(\text{H}_2\text{O}) \times c_p(\text{H}_2\text{O}) + m(\text{Cu}) \times c_p(\text{Cu}) + m(\text{Glas}) \times c_p(\text{Glas})] \\ - \frac{\Delta H(\text{Kohle}) \times m(\text{Kohle})}{M(\text{Kohle})}$$

$c_p(X)$  spezifische Wärmekapazität

Variablen (bezogen auf oben aufgeführte Beispiel):

$m(X)$  Masse

$$\Delta T = 6,7 \text{ °C} = 6,7 \text{ K}$$

$M(X)$  Molmasse

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 379,10 \text{ g}$$

$H(X)$  Verbrennungsenthalpie

$$m(\text{Kupfer}) = 83,66 \text{ g}$$

Konstanten:

$$m(\text{Glas}) = 41,143 \text{ g}$$

$$c_p(\text{H}_2\text{O}) = 4,19 \text{ J/(g*°K)}$$

$$m(\text{Kohle}) = 0,098 \text{ g}$$

$$c_p(\text{Cu}) = 0,385 \text{ J/(g*°K)}$$

$$m(\text{Ku}) = 0,195 \text{ g}$$

$$c_p(\text{Glas}) = 0,847 \text{ J/(g*°K)}$$

$$\Delta H(\text{Kohle}) = -393,51 \text{ kJ/mol}$$

$$M(\text{Kohle}) = 12,011 \text{ g/mol}$$

Somit ergibt sich für das vorliegende Beispiel:

$$Q = -6,7 \text{ K} \times [379,10 \text{ g} \times 4,19 \text{ J/(g*°K)} + 83,66 \text{ g} \times 0,385 \text{ J/(g*°K)} + 41,143 \text{ g} \times 0,847 \text{ J/(g*°K)}] \\ - \frac{-393,51 \times 10^3 \text{ J/mol} \times 0,098 \text{ g}}{12,011 \text{ g/mol}} \\ = -7881 \text{ J}$$

Der Brennwert  $\Delta H$  (Ku) ergibt sich aus der Division der ermittelten Wärmemenge durch die zur Verbrennung eingesetzten Kunststoffmenge:

$$\Delta H(\text{Ku}) = \frac{Q}{m(\text{Ku})}$$

$$\Delta H(\text{PS}) = \frac{-7881 \text{ J}}{0,195 \text{ g}} = -40415 \text{ J/g} = -40,4 \text{ MJ/kg}$$

### Näherungsberechnung nach BRAUN

Die Heizwerte und Brennwerte für (feste oder flüssige) organische Stoffe lassen sich auch näherungsweise rechnerisch mit einer Formel nach BRAUN ermitteln [145, S. 31]. Dabei wird angenommen, daß der Brennstoff aus Elementen mit bekanntem Heizwert besteht, wobei Bindungs- und Lösungsenergien unberücksichtigt bleiben. Es existieren neben dieser noch weitere Berechnungsmöglichkeiten für den Heizwert. Diese hat aber beispielsweise gegenüber der DULONGSCHEN FORMEL den Vorteil, daß Elemente wie Stickstoff berücksichtigt werden. Die Formel wurde um den Faktor "-1" erweitert, um im Endergebnis ein negatives Vorzeichen zu erhalten. Für den Heizwert und Brennwert gelten

$$H_u = -1 \times (34,8 \times c + 93,8 \times h + 10,46 \times s + 6,28 \times n - 10,8 \times o - 2,5 \times w) \text{ [MJ/kg]}$$

$$H_o = -1 \times (34,8 \times c + 93,8 \times h + 10,46 \times s + 6,28 \times n - 10,8 \times o) \text{ [MJ/kg]}$$

Die Faktoren  $c$  (Kohlenstoff),  $h$  (Wasserstoff),  $s$  (Schwefel),  $n$  (Stickstoff),  $o$  (Sauerstoff) und  $w$  (Wasser) beziehen sich auf die jeweiligen Elementaranteile des zu untersuchenden Brennstoffes.

Beispiel: PS (Summenformel  $C_8H_8$ )

$$\text{Massenanteil von C: } c = \frac{m(\text{C})}{m(\text{PS})} = \frac{8 \times 12,011 \text{ g/mol}}{104,15 \text{ g/mol}} = 0,923$$

$$\text{Massenanteil von H: } h = \frac{m(\text{H})}{m(\text{PS})} = \frac{8 \times 1,0079 \text{ g/mol}}{104,15 \text{ g/mol}} = 0,077$$

$$\text{Wasser: } w = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m(\text{PS})} = \frac{4 \times 18,0153 \text{ g/mol}}{104,15 \text{ g/mol}} = 0,692$$

Für den Heizwert  $H_U$  und den Brennwert  $H_O$  ergibt sich

$$H_U = -1 \times (34,8 \times 0,923 + 93,8 \times 0,077 - 2,5 \times 0,692) = -35,8 \text{ [MJ/kg]}$$

$$H_O = -1 \times (34,8 \times 0,923 + 93,8 \times 0,077) = -37,5 \text{ [MJ/kg]}$$

### Ergebnis:

Die gewonnenen Meßwerte stimmen in hohem Maß mit den Angaben der Kunststoffhersteller überein (Tab. 29). Die Abweichungen von den Herstellerangaben betragen stets weniger als 10 %. Die Werte nach BRAUN weichen um 4 % von den Herstellerangaben ab.

**Tab. 29:** Ergebnisse unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung des Brennwertes ( $H_O$ )

Kunststoff	Kalorimetrie [MJ/kg]	BRAUN [MJ/kg]	Herstellerangabe [MJ/kg]
PS	- 40,5 (1 %)	- 39,4 (4 %)	- 41
PMMA	- 25,7 (2 %)	- 25,0 (4 %)	- 26,2

Die Angaben in Klammern geben die prozentuale Abweichung vom Wert des Herstellers an.

Das vorgestellte Verfahren erlaubt es somit, selbst unter schulischen Bedingungen auf einfache, schnelle und hinreichend genaue Art den Brennwert von Kunststoffen zu ermitteln.

### Zusammenfassung der Input-Output Daten:

Für die Berechnung der erforderlichen Sauerstoff- und Kohlendioxid-Menge wird jeweils von der monomeren Einheit des Kunststoffs ausgegangen. Die eingesetzte Kohle wird hierbei nicht berücksichtigt, da sie nur zum Entzünden des Kunststoffs erforderlich ist. Es wird lediglich deren Menge aufgeführt.

## PMMA



## PS



Die Verbrennung von PMMA erfordert im Vergleich zu PS etwa ein Drittel weniger Sauerstoff und erzeugt auch ca. ein Drittel weniger an Kohlendioxid (pro g Polymer) (Tab. 30). Der über die Abwärme gelieferte Energiebetrag ist dafür aber geringer. Um die Abwärme als Gutschrift primärenergetisch berücksichtigen zu können, wird ein KEA von 1,368 MJ/MJ angesetzt.<sup>23</sup> Die Abfallmengen weichen nur gering voneinander ab. Hierbei handelt es sich um unverbrannte Kunststoffreste am Boden des Reagenzglases.

**Tab. 30:** Input-Output-Daten für die kalorimetrische Verbrennung

Input/Output	PMMA	PS
INPUT		
Polymer [g/g Polymer]	1,0	1,0
Sauerstoff (Kunststoff) [l/g Polymer]	1,47	2,35
[g/g Polymer]	1,92	3,07
Kohle [g/ g Polymer]	0,47	0,51
OUTPUT		
Luftemission (Kohlendioxid) [l/g Polymer]	1,22	1,88
[g/g Polymer]	2,20	3,38
Abfälle (Kunststoff) [g/g Polymer]	0,03	0,05
Energiegewinn (Abwärme) [kJ/g Polymer]	25,7	40,5
Energiegewinn (Primärenergie) [kJ/g Polymer]	35,2	55,4

<sup>23</sup> Hierbei wird auf den GEMIS-Prozeß "Wärme-Bonus-Mix" zurückgegriffen, welcher speziell zur Verrechnung von Gutschriften für Abwärme Heizkraftwerken dient. Es wird ein Mix aus Öl- und Erdgasheizungen angenommen (jeweils 50 %), welcher durch die Abwärme ersetzt werden kann. Es gelten die im Abschnitt 2.6 erläuterten Randbedingungen zur Berechnung des KEA in GEMIS.

#### 4.3.4 Vergleich der Ergebnisse schulexperimenteller und industrieller Verfahren (Darstellung und Recycling von Kunststoffen)

Es soll an dieser Stelle ein Vergleich der Ergebnisse der vereinfachten schulischen Verfahren zur Darstellung und Recycling von Kunststoffen mit industriellen Verfahren vorgenommen werden.

Hinsichtlich Prozeß, Edukte und Produkte wird stets ein vergleichbares oder möglichst ähnliches industrielles Verfahren gewählt. Für den Vergleich werden die wichtigsten Daten zu Stoff- und Energieflüssen gegenüber gestellt. Somit erfolgt der Vergleich auf Sachbilanzebene. Dies hat zwar den Nachteil, daß etwa verschiedene Luftemissionen nicht direkt miteinander vergleichbar sind (sondern nur über die Kategorie Luftbelastung). Der Vorteil liegt jedoch in der höheren Transparenz, da einzelne Sachbilanzpositionen sichtbar bleiben und nicht hinter dem Ergebnis einer Wirkungsabschätzung "verschwinden". Unterschiedliche Energieträger werden entsprechend ihres Primärenergieverbrauchs miteinander verglichen und sind somit vorher umzurechnen (siehe hierzu Abschnitt 2.6.2).

Die Sachbilanz-Daten stammen überwiegend aus unterschiedlichen Ökobilanzen. Generell problematisch sind bei einem solchen Vergleich zunächst einmal die unterschiedlichen Systemgrenzen. Hierbei kann es sein, daß z. B. Vorketten diverser Rohstoffe entweder vollständig, nur zum Teil oder gar nicht erfaßt sind. Zum anderen können sich die untersuchten Verfahren auf unterschiedliche geographische Gebiete oder Zeiträume beziehen (Systemgrenzen). Weiterhin werden die Input-Output-Daten in der Regel nicht genau für ein und das selbe technische Verfahren vorliegen (Zieldefinition), sondern daher nur näherungsweise vergleichbar sein. Hinzu kommt, daß die Qualität der Daten (z. B. Erhebung, Berechnung, Schätzung) unterschiedlich und somit ihre Vergleichbarkeit erschwert ist.

Der Aufbau der Tab. 31 bis 35 ist analog derer in Abschnitt 4.2.4.

##### 4.3.4.1 Darstellung von Kunststoffen

###### Verfahren

###### PS

Polystyrol (PS) wird heutzutage über eine kontinuierlich ablaufende radikalische Massepolymerisation hergestellt [115]. Hierbei dient das Monomer (Styrol) selbst als Lösemittel. Ein solches Verfahren ist kostengünstig und liefert darüber hinaus einen Kunststoff hoher Qualität mit niedrigem Monomergehalt. Die kationische Polymerisation ist aufgrund der unzureichenden Steuerung der angestrebten Molmasse industriell nicht von Bedeutung. In einem Reaktor wird Styrol mit einem Initiator zusammengebracht. Intensive Kühlung ist erforderlich, um die bei der exothermen Polymerisation freiwerdende Wärme (71 kJ/mol) abzuführen. Die Temperatur wird auf 100 bis 170 °C (bei einem Druck von 0,5 bis 2 bar) eingestellt. Das aufgrund der Reaktionsbedingungen verdampfende Styrol wird durch Kondensation wieder zurückgewonnen. Das PS-Styrol-Gemisch verläßt den Tank bei einer PS-Konzentration von 70 bis 90 %. Das noch verbleibende Styrol wird mittels Vakuum und leichter Erwärmung verdampft und kann für eine erneute Polymerisation verwendet werden. Über einen Extruder erfolgt die anschließende Herstellung der Pellets, welche noch in einem Wasserbad abgekühlt und getrocknet werden.

## PMMA

Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) in Form von Acrylglas wird industriell meist über eine diskontinuierliche radikalische Massepolymerisation gewonnen [115]. Das Produkt ist von hoher Qualität. Es wird typischerweise so hergestellt, daß zwischen zwei Platten aus Flachglas (Ausmaße ca. 3 mal 2 m, Dicke ca. 8 mm), welche durch Klammern zusammengehalten und durch einen Kunststoff-Rand begrenzt werden, das Reaktionsgemisch gefüllt wird. Dieses besteht aus Monomer, Polymer (5 bis 20 %), dem Initiator und weiteren Additiven. Als Initiatoren dienen Azo- oder organische Peroxid-Verbindungen. Als Additive können zum Beispiel Pigmente oder Flammschutzmittel eingesetzt werden. Der Zusatz an prepolymerisiertem Monomer führt zu Erhöhung der Polymerisationsgeschwindigkeit und des Polymerisationsgrades im Produkt (TROMMSDORFF-NORRISH-Effekt<sup>24</sup>). Außerdem wird das Ausmaß der Schrumpfung begrenzt. Die eigentliche Polymerisation kann in luftbeheizten Öfen (bei 90 bis 100 °C) oder in Wassertanks (bei 20 bis 60 °C) erfolgen. Die Polymerisationswärme beträgt 57,7 kJ/mol. Die Verweildauer im Ofen oder im Tank kann von wenigen Stunden bis zu mehreren Tagen betragen und hängt von der Plattendicke ab. Das Produkt muß anschließend noch auf Raumtemperatur abgekühlt werden.

### Industrielle Daten

Die Daten sind in den Tab. 31 und 32 zusammengefaßt.

Generell ist schwierig, vergleichbare industrielle Daten ausschließlich zur Polymerisation zu erhalten. Die Berichte der ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE (APME) weisen keine prozeßspezifischen Angaben aus, sondern jeweils kumuliert von der Entnahme der Rohstoffe in Lagerstätte bis zum betrachteten (Zwischen-)Produkt. Aufgrund der Systemgrenzen sind als Rohstoffe für beispielsweise Styrol nicht Ethen und Benzol angegeben, sondern vor allem Erdgas und Erdöl sowie weitere Rohstoffe. Zentrale Ergebnisse sollen dennoch genannt werden [146; 156].

Die jeweils aufgeführten APME-Daten beruhen auf Informationen von jeweils ausgewählten Unternehmen. Die Angaben zur Herstellung von PMMA-Platten stammen von fünfzehn Betrieben (1994). Für PS wurde das General Purpose PS (GPPS) exemplarisch herangezogen, wobei die genannten Daten auf 15 Betriebe zurückgehen (1994). Die ausgewählten Anlagen stehen in verschiedenen europäischen Ländern (u. a. Deutschland, Italien, Frankreich und Niederlanden).

Es liegen keine detaillierten Informationen zum Verbrauch an Endenergieträgern bei der Polymerisation vor, so daß eine eigene Umrechnung von Verbrauch an Endenergie zu Primärenergie nicht möglich ist. Neben dem gesamten Primärenergiebedarf ist zum einen der primärenergetische Aufwand für die Herstellung/Bereitstellung des Energieträgers aufgeführt, zum anderen die eingesetzten Mengen. Weiterhin ist der Primärenergiebedarf für den Transport sowie der Feedstock angegeben. Der Feedstock ist eine Energie-Angabe für Stoffe, welche etwa aus fossilen Rohstoffen (z. B. Erdöl) hergestellt, aber nicht zu Treibstoffen weiterverarbeitet werden (z. B. Polyethylen). Er ist der kumulierte nicht-

---

<sup>24</sup> TROMMSDORFF-NORRISH-Effekt: Der Zusatz von Polymeren bewirkt eine Zunahme der Viskosität des Reaktionsgemisches. Bedingt durch die erschwerte Diffusion werden wenige Polymer-Radikale in Abbruchreaktionen verbraucht. Der aber weiterhin anhaltende Zerfall der Initiator-Moleküle führt zudem zu einer Zunahme von Radikalen und letztlich zu einem Anstieg der Polymerisationsgeschwindigkeit [77].

energetische Aufwand, welcher über die Rohstoffe ins Produkt gelangt. Der Feedstock ist also materialgebunden. Mathematisch ist er das Summenprodukt aus Heizwert und Masse aller für die Herstellung des betrachteten Produktes erforderlichen Rohstoffe.

Die Daten zur industriellen Herstellung von PS stammen aus den ÖKOINVENTAREN VON ENERGIESYSTEMEN (3. Auflage, 1996) [128]. Die Daten selbst sind aus dem Jahr 1992 und beziehen sich auf kein bestimmtes Verfahren. Der Dampf wird mit einem Wirkungsgrad von 90 % in Schweröl (ein Drittel) und Raffineriegasfeuerungen (zwei Drittel der Gesamtmenge) erzeugt. Informationen zur Art des Verfahrens sowie Zusätze (z. B. Radikalstarter) liegen nicht vor. Über den Summenparameter VOC werden hier vor allem auch die industriell verursachten Styrolemissionen erfaßt.

Alle Angaben zur Darstellung von Kunststoffen beziehen sich auf 1 kg Kunststoff (Output). Der Verbrauch an Energie ist in Megajoule und für Rohstoffe in der Regel in Kilogramm angegeben. Emissionen sind in Gramm aufgeführt. Die aufgeführten industriellen Inputs und Outputs sind exemplarisch ausgewählt und die Zahlenwerte sind gerundet. Angaben zum Bodenverbrauch und Lärmemissionen für die industriellen Prozesse liegen nicht vor und wurden auch für die schulischen Verfahren nicht ermittelt.

## Vergleich

### *Industrielle Darstellung von PMMA und PS*

Es sollen zunächst die Input-Output-Daten für die industrielle Darstellung von PMMA und PS miteinander verglichen werden. Dies ist möglich, weil die Daten nur aus einer Literaturquelle stammen (APME). Diese Daten beinhalten jeweils alle Stoff- und Energieflüsse von der Entnahme der Rohstoffe bis zum fertigen Kunststoff [146; 156].

Hierbei zeigt sich, daß die Herstellung von PS weniger an Rohstoffen, aber etwa die dreifache Menge Wasser benötigt. Der Gesamtprimärenergieverbrauch ist ca. ein Drittel niedriger, dafür aber ist der Feedstock (kumulierter nichtenergetischer Aufwand) leicht erhöht. Luft- und Wasseremissionen sowie Deponieraumverbrauch beziehungsweise Abfälle fallen bei der PS-Herstellung deutlich niedriger aus.

Die Begründung für den geringeren Material- und Energiebedarf, der einher mit niedrigeren Emissionen geht, liegt in der einfacheren Darstellung von PS im Vergleich zu PMMA. Die Vorprodukte für die Herstellung von PS sind Ethen und Benzol. Durch Alkylierung des Benzols mit Ethen entsteht Ethylbenzol, welches über katalytische Dehydrierung zu Styrol umgesetzt wird. Die Ausgangsprodukte Ethen und Benzol werden aus Erdgas (über Cracken) und Erdöl (u. a. Reforming) gewonnen.

Im Gegensatz dazu bedarf es für die Produktion von PMMA der Ausgangsprodukte Aceton und Blausäure. Aceton kann nach dem Wacker-Verfahren durch die Oxidation von Propen hergestellt werden, Blausäure (Cyanwasserstoff) wird aus der Reaktion von Methan und Ammoniak gewonnen. Über die Kondensation von Aceton und Blausäure erhält man 2-Hydroxy-2-methylpropionitril. Dieses wird durch Hydrolyse und Dehydratisierung mit Schwefelsäure und Veresterung mit Methanol zu dem monomeren Methacrylsäuremethylester umgesetzt.

### *Industrielle und schulexperimentelle Darstellung von PMMA*

Aufgrund der schlechten Datenlage in Bezug auf die industrielle Darstellung von PMMA, ist nur ein näherungsweise Vergleich der schulischen und technischen Verfahren möglich.

Es werden der Rohstoff- und Energieverbrauch sowie die Luftemissionen miteinander verglichen.

Der industrielle Verbrauch an Monomer kann aus den oben genannten Gründen nicht aus den APME-Daten ermittelt werden. Die C-STRÖME (1999) [147] führen als erforderliche Menge 1,04 kg/kg an (Angaben zu Zusätzen wie Initiatoren werden an dieser Stelle nicht gegeben). Somit würde der Monomer-Verbrauch in den schulischen Verfahren etwa gleich liegen mit dem industriellen Prozeß.

Der Energieaufwand ist nur bedingt zu vergleichen, da für die industrielle Seite nur Angaben zum Gesamtprimärenergieaufwand vorliegen. Zieht man hiervon die Angabe des Feedstocks ab, so beträgt der Primärenergieaufwand für die Herstellung von PMMA-Platten 90 MJ/kg, für PMMA-Granulat 68 MJ/kg (jeweils ab Entnahme der Rohstoffe in Lagerstätte). Der Feedstock beträgt in beiden Fällen rund 41 MJ/kg. Der Energieverbrauch in den schulischen Verfahren (15 bis 51 MJ/kg) liegt dagegen deutlich niedriger, da hier nur die Polymerisation erfaßt wird und nicht der gesamte primärenergetische Aufwand für die Herstellung der Vorprodukte.

#### *Industrielle und schulexperimentelle Darstellung von PS*

PS ist im Gegensatz zu PMMA ein im täglichen Leben weitaus häufiger eingesetzter Kunststoff. Aus diesem Grund ist er öfter Gegenstand in vergleichenden Ökobilanzen. Aufgrund der relativ guten Datenlage können an dieser Stelle der Rohstoff- und Energieverbrauch für die Polymerisation im industriellen Maßstab angegeben werden. Diese Informationen stammen aus den ÖKOINVENTAREN VON ENERGIESYSTEMEN [128]. Die APME-Daten sind zusätzlich aufgeführt.

Sowohl für den industriellen als auch den schulischen Polymerisationsprozeß sind um die 1 kg/kg an Styrol erforderlich. Informationen über Zusätze liegen nicht vor. Der industrielle Primärenergiebedarf beträgt etwa 9 MJ/kg und damit weniger als die Hälfte des schulischen Verfahrens. Der gesamte Primärenergiebedarf (ab Entnahme der Rohstoffe in Lagerstätte bis zum GPPS) liegt nach Abzug des Feedstocks laut den APME-Angaben bei ca. 39 MJ/kg. Setzt man näherungsweise die Angabe VOC (Volatile Organic Carbons), also der flüchtigen organischen Verbindungen, gleich der emittierten Kohlenwasserstoffe beziehungsweise der Styrolemission, dann liegen die industriellen Daten etwa in der gleichen Größenordnung (2 bis 3 g/kg). Die im schulischen Verfahren emittierten Styrol-Mengen liegen um das Hundertfache höher. Dies dürfte seine Ursache in der offenen Art der Reaktionsdurchführung haben (offenes Reagenzglas im Wasserbad). Vergleichbare Daten zu Wasseremissionen und Deponieraumverbrauch liegen nicht vor.

#### *Fazit:*

Der Vergleich schulexperimenteller und industrieller Daten ist nur im Ansatz durchführbar. Bedingt durch die Versuchsdurchführung (kleiner Maßstab, offene Apparatur und fehlende Filtereinrichtungen) liegen die Emissionen im schulischen Maßstab um ein Vielfaches höher. Der Primärenergieaufwand ist ebenfalls im Schulversuch deutlich höher.

Ein Sonderfall stellt der Vergleich industrieller Daten zu Umwelteinwirkungen untereinander dar. Dieser sollte nur erfolgen, wenn Daten aus einer Datenquelle vorhanden sind, etwa wie hier APME. Hinsichtlich des Bilanzierungsziels und der Systemgrenzen liegen dann gleiche Annahmen vor. Andernfalls entsteht eine ungleiche (unsymmetrische) Datenbasis, die einen ausführlichen Vergleich nicht zuläßt.

## Daten

**Tab. 31:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zur Darstellung von PMMA

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg PMMA.

Verfahren	industrielle Herstellung von PMMA-Platten	radikalische Polymerisation von industriellem MMA im Schulversuch	radikalische Polymerisation von Sekundär-MMA (aus selbsthergestelltem PMMA) im Schulversuch	radikalische Polymerisation von Sekundär-MMA (aus industriell hergestelltem PMMA) im Schulversuch
Systemgrenzen	gesamter Lebensweg (ab Rohstoffe bis Polymer)	Schulversuch	Schulversuch	Schulversuch
Quelle	APME 2002 [146]	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.1.1)	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.1.1)	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.1.1)
Datenqualität	gemessen	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet
Rohstoffe*	Kalkstein 22 g/kg Stickstoff 22 g/kg Natriumchlorid 50 g/kg Schwefel 32 g/kg Sauerstoff 360 g/kg Wasser 51 kg/kg	MMA 1,03 kg/kg Dibenzoylperoxid 0,11 kg/kg	MMA 0,93 kg/kg Dibenzoylperoxid 0,10 kg/kg	MMA 0,97 kg/kg Dibenzoylperoxid 0,10 kg/kg
Energieverbrauch (Endenergie)	k.A.	Elektrizität 5,2 MJ/kg	Elektrizität 13,5 MJ/kg	Elektrizität 17,5 MJ/kg
Energieverbrauch (Primärenergie)	131,1 MJ/kg (davon Feedstock: 41,0 MJ/kg)	15,1 MJ/kg	39,1 MJ/kg	50,7 MJ/kg
Produkt(e)	1 kg PMMA	1 kg PMMA	1 kg Sekundär-PMMA	1 kg Sekundär-PMMA
Luftemissionen*	Kohlendioxid 6.900 g/kg Schwefeloxide 32 g/kg Methan 24 g/kg Stickoxide 28 g/kg Staub 7 g/kg	MMA 130 g/kg	MMA 60 g/kg	MMA 80 g/kg

Verfahren	industrielle Herstellung von PMMA-Platten	radikalische Polymerisation von industriellem MMA im Schulversuch	radikalische Polymerisation von Sekundär-MMA (aus selbsthergestelltem PMMA) im Schulversuch	radikalische Polymerisation von Sekundär-MMA (aus industriell hergestelltem PMMA) im Schulversuch
	Kohlenwasserstoffe 8 g/kg			
Wasseremissionen*	Sulfationen 32 g/kg Natriumionen 19 g/kg Chloridionen 10 g/kg CSB 3 g/kg	-	-	-
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung*	Mineralien 100 g/kg Industrieabfälle 51 g/kg Schlacken/Asche 26 g/kg Chemikalien 12 g/kg	-	-	-
Bodenverbrauch	k.A.	-	-	-
Lärmemissionen	k.A.	-	-	-

\* Auswahl  
- entfällt  
k.A. keine Angabe

**Tab. 32:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zur Darstellung von PS

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg PS.

Verfahren	industrielle Herstellung von PS	industrielle Herstellung von PS	radikalische Polymerisation von industriellem Styrol im Schulversuch	kationische Polymerisation von industriellem Styrol im Schulversuch
Systemgrenzen	gesamter Lebensweg (ab Rohstoffe bis Polymer)	Polymerisationsprozeß	Schulversuch	Schulversuch
Quelle	APME 2002 [156]	ÖKOINVENTARE VON ENERGIESYSTEMEN 1996 [128]	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.2.1)	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.2.2)
Datenqualität	gemessen	gemessen	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet
Rohstoffe*	Kalkstein 1 g/kg Natriumchlorid 2 g/kg Bauxit 1 g/kg Stickstoff 36 g/kg Wasser 182 kg/kg	Styrol 0,98 kg/kg Mineralöl 0,03 kg/kg	Styrol 1,13 kg/kg Dibenzoylperoxid/g 0,19 kg/kg	Styrol 1,07 kg/kg Eisen(III)-chlorid 0,02 kg/kg
Energieverbrauch (Endenergie)	k.A.	Dampf 1,0 MJ/kg Elektrizität 2,8 MJ/g	Elektrizität 7,8 MJ/kg	-
Energieverbrauch (Primärenergie)	86,7 MJ/kg (davon Feedstock: 47,5 MJ/kg)	9,4 MJ/kg	22,6 MJ/kg	-
Produkt(e)	1 kg PS	1 kg PS	1 kg PS	1 kg PS
Luftemissionen*	Kohlendioxid 2.600 g/kg Schwefeloxide 10 g/kg Stickoxide 11 g/kg Methan 11 g/kg Methan 9 g/kg Kohlenwasserstoffe 3 g/kg	VOC 1,7 g/kg	Styrol 310 g/kg	Styrol 90 g/kg
Wasseremissionen*	Chloridionen 5,5 g/kg Natriumionen 0,5 g/kg Sulfationen 0,3 g/kg	Phthalate $5,1 \cdot 10^{-4}$ g/kg BTEX $4,6 \cdot 10^{-4}$ g/kg	-	-

Verfahren	industrielle Herstellung von PS	industrielle Herstellung von PS	radikalische Polymerisation von industriellem Styrol im Schulversuch	kationische Polymerisation von industriellem Styrol im Schulversuch
	CSB 0,3 g/kg			
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung*	Mineralien 15 g/kg Industrieabfälle 2 g/kg Schlacken/Asche 3 g/kg Chemikalien 3 g/kg Abf. zur Verbrennung 4 g/kg	k.A.	-	-
Bodenverbrauch	k.A.	k.A.	-	-
Lärmemissionen	k.A.	k.A.	-	-
* - k.A.	Auswahl entfällt keine Angabe			

#### 4.3.4.2 Recycling von Kunststoffen

##### Verfahren

Über Schulversuche wurden das rohstoffliche, werkstoffliche energetische Recycling von Kunststoffen dargestellt. Daher ist es für den beabsichtigten Vergleich schulischer und analoger industrieller Verfahren notwendig, die ausgewählten industriellen Prozesse kurz zu beschreiben.

##### *Rohstoffliches Recycling*

Als industrielles rohstoffliches Verfahren des Kunststoffrecycling wurde exemplarisch das Recycling von PMMA über Pyrolyse im Wirbelschichtreaktor herangezogen [148]. Es handelt es sich um eine Technikumsanlage des INSTITUTES FÜR TECHNISCHE UND MAKROMOLEKULARE CHEMIE der UNIVERSITÄT HAMBURG. Unter Pyrolyse wird die durch *"thermische Energie induzierte Spaltung organischen Materials unter Luftabschluß oder zumindest Sauerstoffunterschuß"* verstanden. Der Wirbelschichtreaktor hat einen Durchmesser von 45 cm und eine Höhe von 90 cm. Er wird mit Propan oder Überschußgas aus der Pyrolyse beheizt. Die Durchsatzleistung der Anlage beträgt ca. 20 bis 40 kg/h. Das eingesetzte Hauptmaterial ist ein Gußglas (Markenname "PARAGLAS") mit einer Korngröße von 0,1 bis 1,5 cm. Der Eintrag erfolgt über ein Schneckeneintragsystem, bei dem zunächst über eine Dosierschnecke die Eintragsmenge regelt und an eine nachfolgende Eintragsschnecke weitergibt, welche das Material in den Reaktor einbringt. Die Reaktortemperatur beträgt 450 °C. Als hauptsächliches Edukt liegt zu 97 % Methylmethacrylat (MMA) vor.

##### *Werkstoffliches Recycling*

Der Vergleich des werkstofflichen Recycling von PS mit einem industriellen Verfahren erfolgt in einem annähernd analogen Verfahren, bei dem PVC durch Lösen recycelt wird (Inlösungnahme) [149]. In einer Technikumsanlage am KUNSTSTOFF-RECYCLING-ZENTRUM in Berlin wurde Alt-PVC in organischen Lösemitteln gelöst (Cyclohexanon, Tetrahydrofuran oder Ethylmethylketon). Das Verhältnis Kunststoff zu Lösemittel beträgt 1 zu 9. Das Lösemittel wird durch Verdampfen zurückgewonnen. Als Produkt erhält man einen Film aus Sekundär-PVC, welcher kein weiteres Lösemittel enthält (im Gegensatz zu alternativen Produkten wie Lacke oder Klebstoffe). Die Anlage hat einen Durchsatz von einer Tonne pro Stunde.

##### *Energetisches Recycling*

Die thermische Beseitigung von Kunststoffabfällen wird durch die beiden industriellen Verfahren der Müllverbrennung sowie der Wirbelschichtverbrennung demonstriert [150]. Im Gegensatz zur Müllverbrennung wird bei der Wirbelschichtverbrennung davon ausgegangen, daß aufgrund vorausgegangener Sortierung nur Kunststoffe ohne Rückstände verbrannt werden.

Bei beiden Verfahren wird von einer Kunststoffmischung aus der Sammlung des DUALEN SYSTEMS DEUTSCHLAND (DSD) ausgegangen. Die Mischung enthält auch Nichtkunststoff-Rückstände aus der Sortierung, welche auf einer Deponie entsorgt werden. Für die Müllverbrennung werden 30 km Transport berechnet. Bei der Müllverbrennung entstehen als Produkte vor allem Dampf (mit einem Druck von 40 bar) sowie elektrischer Strom (Wirkungsgrad beträgt 17 %). Nebenprodukte sind Eisenabfälle, Filterstäube und Asche. Zur Nachbehandlung des Rauchgases werden Wasser, Natronlauge, Ammoniak und Aktivkohle benötigt.

Für die Wirbelschichtverbrennung werden 200 km Transport angenommen sowie zusätzlich Stromverbrauch (0,2 kWh/kg) für die erforderliche Zerkleinerung der Kunststoffabfälle. Auch bei der Wirbelschichtverbrennung entstehen als Hauptprodukte Dampf (zunächst mit einem Druck von 40 bar, später auf 4 bar gedrosselt) und elektrischer Strom (Wirkungsgrad 17 %). Als Nebenprodukt fallen Filterstäube an, welche auf einer Sonderdeponie für gefährliche Abfälle entsorgt werden müssen.

### **Industrielle Daten**

Die Daten sind in den Tab. 33 bis 35 zusammengefaßt.

#### *Rohstoffliches Recycling*

Die Sachbilanzdaten zum rohstofflichen Recycling von PMMA beziehen sich auf die im Rahmen des Versuchs eingesetzte Technikumsanlage. Als wesentliches Produkt der Pyrolyse entsteht ein niedrigsiedendes Öl (97,5 %), wovon der größte Teil monomeres MMA darstellt (entsprechend 96,7 %). Weitere Nebenprodukte haben jeweils einen Anteil von weniger als einem Prozent. Dazu gehören Gase (z. B. Kohlendioxid, Kohlenmonoxid), hochsiedende Verbindungen, Wasser, Ruß und Feinstaub. Die gewählte Temperatur von 450 °C ist für das Verfahren der Pyrolyse von PMMA unter den Bedingungen optimal, da zum einen die Ausbeute maximiert, jedoch der Anteil unerwünschter Nebenprodukte (Fragmente) minimiert werden konnte. Innerhalb der Gasfraktion dominieren Kohlendioxid mit 47 %, Kohlenmonoxid mit 26 % und Methan mit 10 % (Angabe jeweils als Massenprozent). Der Propanverbrauch bezieht sich allein auf die Eintragsphase (die Aufheizphase bleibt unberücksichtigt).

#### *Werkstoffliches Recycling*

Für das werkstoffliche Recycling von PVC beziehen sich die genannten Emissionen auf die herangezogene Technikumsanlage. Umwelteinwirkungen entstehen aus den erforderlichen Prozessen der Inlösungnahme, der Aufbereitung, des Gießens und der Lösemittelrückgewinnung. Die Rückgewinnung des Lösemittels ist mit über 50 % hauptsächlich verantwortlich für den gesamten Energieverbrauch (Strom). Dagegen sind alle Verfahrensschritte an den Luftemissionen etwa gleich hoch beteiligt (ca. 25 %). Die Verluste an Lösungsmittel werden pro Verfahrensschritt mit 0,1 % angesetzt. Der Wasserbedarf liegt bei fünf Litern pro Kilogramm PVC.

#### *Energetisches Recycling*

Bei der energetischen Verwertung von Kunststoffen geht die Systemgrenze über die eigentliche Verbrennungsanlage hinaus, denn es werden auch die Sammlung (einschließlich Antransport) und Sortierung erfaßt. Etwa 25 % des Materialinputs (Abfall aus der Sortierung) gehen auf die Deponie, zur Verfügung stehen 1 kg, welche in die Müllverbrennungs- oder Wirbelschichtverbrennungsanlage geschickt werden. Bei der letzteren sind zudem noch eine geringe Menge an Wirbelschichtmaterial (Sand, Asche oder Kalkstein) erforderlich. Die Anlagen zur Sortierung, Zerkleinerung und Verbrennung haben einen bestimmten Eigenbedarf an Dampf und elektrischem Strom, der von dem bei der Verbrennung freigesetztem Energiegewinn abgezogen wird. Während die entstehende Strommenge bei beiden Verfahren annähernd gleich ist, ist die Dampfmenge bei der Wirbelschichtverbrennung etwa fünfmal größer, vermutlich bedingt durch die Mono-verbrennung von Kunststoffen und die größere Effektivität des Wirbelschicht-Verfahrens. Dadurch ist auch der Primärenergiegewinn mehr als doppelt so groß. Den Rückstand bilden vor allem Filterstäube und Asche. Die ausgewählten Luftemissionen sind bei beiden

Verfahren vermutlich aufgrund der Modellannahmen gleich hoch. Bei der Müllverbrennung fallen zudem noch Cadmium- und Chlorid als Wasseremissionen an.

Alle Angaben zum Recycling von Kunststoffen beziehen sich auf 1 kg Kunststoff (Input). Der Verbrauch an Energie ist in Megajoule und für Rohstoffe in der Regel in Kilogramm angegeben. Emissionen sind in Gramm aufgeführt. Die aufgeführten industriellen Inputs und Outputs sind exemplarisch ausgewählt und die Zahlenwerte sind gerundet. Angaben zum Bodenverbrauch und Lärmemissionen für die industriellen Prozesse liegen nicht vor und wurden auch für die schulischen Verfahren nicht ermittelt.

## Vergleich

Ein Vergleich der industriellen Daten untereinander wird aufgrund der jeweils unterschiedlichen Systemgrenzen (z. T. sind Transport oder externe Sortierung miteingeschlossen) nicht vorgenommen, sondern lediglich zwischen industriellen und schulexperimentellen Daten.

### *Rohstoffliches Recycling*

Beim rohstofflichen Recycling (Pyrolyse) ist im Schulversuchsmaßstab die Ausbeute an MMA wesentlich geringer (82 bis 93 %). Sie hängt auch davon ab, ob selbst im Experiment hergestelltes PMMA oder industriell hergestelltes Granulat als Edukt eingesetzt wird. Bei Verwendung des eigenen PMMA erfolgt, wie sich im Experiment gezeigt hat, die Zersetzung bei Wärmezufuhr früher, so daß die Ausbeute dementsprechend geringer ist. Der Verbrauch an Primärenergie ist im schulischen Maßstab dreimal so hoch, was durch die relativ ineffektiven Erwärmung über Brenner im Vergleich zur Wirbelschichtfeuerung begründet ist. Die offene experimentelle Durchführung führt zu relativ hohen Luftemissionen. Hierbei wird vereinfachend angenommen, daß es sich nur um monomeres MMA handelt. Die MMA-Emission wird in dieser Arbeit rechnerisch aus der Differenz zwischen eingesetztem Kunststoff sowie dem gewonnenen Monomer berechnet, wobei noch der anfallende Abfall zu berücksichtigen ist. Daher ist die Emission beim Recycling von selbst hergestelltem PMMA doppelt so hoch als im Vergleich zum Recycling von industriell hergestelltem PMMA.

### *Werkstoffliches Recycling*

Beim werkstofflichen Recycling liegt die Ausbeute an Sekundär-PS im technischen Maßstab bei annähernd 100 %, im Schulversuch bei etwa 70 %. Die Technikumanlage ist unter ökologischen Gesichtspunkten wesentlich günstiger als der Schulversuch. So ist der Primärenergieaufwand im schulischen Maßstab achtzehnmal höher, die Menge der Luftemissionen etwa achtmal und für den Abfall sechsmal. Der Bedarf an Lösemittel zum Lösen des Altkunststoffs ist annähernd gleich hoch, jedoch können im Schulversuch nur etwa zwei Drittel davon recycelt werden (Technikum 100 %). Der Rest verbleibt zunächst im Kunststoff, um diesen gießfähig zu halten und entweicht dann nach und nach beim Trocknen in die Luft.

### *Energetisches Recycling*

Für die industrielle energetische Verwertung sind pro Kilogramm Kunststoffabfall etwa 16 bis 20 kg Luft erforderlich. Im Schulversuch liegt der Sauerstoffbedarf bei 2 bis 3 kg/kg. Setzt man einen Sauerstoffanteil von 21 % in der Luft an, so betrüge die erforderliche Luftmenge ca. 10 bis 14 kg/kg. Im Schulversuch wird jedoch aus Gründen der besseren Verbrennung reiner Sauerstoff eingesetzt. Der Verbrauch an Erdgas im Schulversuch für

das Zünden der Holzkohle wurde vernachlässigt, so daß hier kein Energieverbrauch aufgeführt ist. Bei der Müllverbrennung und Wirbelschichtverbrennung entstehen als Produkte Strom und Dampf, im Schulversuch Wärme. Zum besseren Vergleich wurde der entsprechende Primärenergiegewinn berechnet. Dieser beträgt für die technische Verbrennung ca. 32 MJ/kg, im Schulversuch 26 bis 41 MJ/kg<sup>25</sup>. Neben der Wahl des Verfahrens ist der Heizwert der eingesetzten Abfälle von Bedeutung. Je höher der Heizwert, desto größer ist auch die Ersparnis an Primärenergie. Die Wirbelschichtverbrennung weist gegenüber der gewöhnlichen Müllverbrennung einen höheren Wirkungsgrad auf, da bei gleichem Abfall (mit gleichem Heizwert) die fünffache Menge an Dampf bei annähernd gleicher Strommenge entsteht. Die Kohlendioxidemissionen liegen zwar bei allen technischen und schulischen Verfahren in gleicher Größenordnung (etwa 2,2 bis 3,4 kg/kg), jedoch beinhalten die industriellen Szenarios auch Transportleistungen und weitere technische Prozesse wie eine Sortierung. Die Menge an Rückstand aus der Verbrennung ist im Schulversuch geringer.

*Fazit:*

Der Vergleich schulischer gegenüber industrieller Sachbilanzdaten ist nur begrenzt möglich. Gerade bei der werkstofflichen und rohstofflichen Verwertung zeigt sich in den relevanten Positionen (Energieverbrauch, Emissionen), daß die schulischen Daten um ein Vielfaches über den technischen Angaben liegen. Bei der energetischen Verwertung sind die Verfahren jedoch annähernd vergleichbar.

---

<sup>25</sup> Für den eingesetzten Kunststoffabfall wird an dieser Stelle der untere Heizwert angegeben (Literatur, Herstellerangabe). Im Schulversuch zur Kalorimetrie wird jedoch der obere Heizwert (Brennwert) bestimmt, da andernfalls die mit dem Wasserdampf abgeführte Wärmemenge ermittelt werden müßte.

## Daten

**Tab. 33:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum rohstofflichen Recycling von PMMA.

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg PMMA (Input).

Verfahren	industrielle Wirbelschicht	Pyrolyse Schulversuch I	Pyrolyse Schulversuch II
Systemgrenzen	Technikums-Anlage	Schulversuch	Schulversuch
Quelle	EGER 1999 [148]	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.3.1)	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.3.1)
Datenqualität	gemessen	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet
Material-Input	PMMA 1kg	PMMA (selbst hergestellt) 1 kg	PMMA (industriell hergestelltes Granulat) 1 kg
Energieverbrauch (Endenergie)	Propangas 6,8 MJ/kg	Erdgas 21,9 MJ/kg	Erdgas 22,3 MJ/kg
Energieverbrauch (Primärenergie)	7,6 MJ/kg	24,6 MJ/kg	25,1 MJ/kg
Produkt(e)*	MMA 0,97 kg/kg hochsiedende Verbindungen 0,009 kg/kg niedrigsiedende Verbindungen 0,008 kg/kg	MMA 0,80 kg/kg	MMA 0,90 kg/kg
Luftemissionen*	Kohlendioxid 3 g/kg Kohlenmonoxid 3 g/kg Buten 5 g/kg	MMA 60 g/kg	MMA 30 g/kg
Wasseremissionen	k.A.	-	-
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung	k.A.	PMMA 140 g/kg	PMMA 70 g/kg
Bodenverbrauch	k.A.	-	-
Lärmemissionen	k.A.	-	-

\* Auswahl  
- entfällt  
k.A. keine Angabe

**Tab. 34:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum werkstofflichen Recycling von PS

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg Kunststoff (Input).

Verfahren	industrielle Inlösungnahme von PVC	werkstoffliches Recycling von PS im Schulversuch
Systemgrenzen	Technikums-Anlage	Schulversuch
Quelle	SAMBALE 1999 [149]	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.3.2)
Datenqualität	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet
Material-Input	PVC 1 kg Lösemittel 9 kg/kg Wasser 0,5 kg/kg	PS 1 kg Cyclohexanon 9,5 kg/kg Wasser 3,5 kg/kg
Energieverbrauch (Endenergie)	Strom 2,75 MJ/kg	Strom 48,5 MJ/kg
Energieverbrauch (Primärenergie)	8,0 MJ/kg	140,6 MJ/kg
Produkt(e)	Sekundär-PVC 1 kg/kg Sekundär-Lösemittel 9 kg/kg	Sekundär-PVC 0,7 kg/kg Sekundär-Cyclohexanon 6,3 kg/kg
Luftemissionen	Lösemittel 390 g/kg	Cyclohexanon 3200 g/kg
Wasseremissionen	-	-
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung	Alt-PVC 50 g/kg	Alt-PS 300 g/kg
Bodenverbrauch	k.A.	-
Lärmemissionen	k.A.	-

\* Auswahl  
- entfällt  
k.A. keine Angabe

**Tab. 35:** Vergleich experimenteller und industrieller Verfahren zum energetischen Recycling von PMMA und PS

Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg Kunststoff (Input).

Verfahren	Müllverbrennung	Wirbelschicht-Verbrennung	energetisches Recycling im Schulversuch (PMMA)	energetisches Recycling im Schulversuch (PS)
Systemgrenzen	Antransport, Sammlung, Müllverbrennungsanlage, Deponie	Antransport, Sammlung, Sortierung, Zerkleinerung, Verbrennungsanlage, Deponie	Schulversuch	Schulversuch
Quelle	HEYDE/KREMER [150]	HEYDE/KREMER [150]	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.3.3)	diese Arbeit (Abschnitt 4.3.3.3)
Datenqualität	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet	gemessen/berechnet
Material-Input*	DSD-Kunststoffe ( $H_u = -31,8$ MJ/kg) 1 kg sowie sonstige Müllbestandteile 0,335 kg Wasser 0,7 kg/kg Luft 19,8 kg/kg	DSD-Kunststoffe ( $H_u = -31,8$ MJ/kg) 1 kg sowie sonstige Müllbestandteile 0,335 kg Wasser 0,7 kg/kg Luft 16,0 kg/kg Wirbelschichtmaterial 0,06 kg/kg	PMMA (industriell hergest. Granulat) 1 kg ( $H_u = -24,6$ MJ/kg) Sauerstoff 1,92 kg/kg (1470 l/kg)	PS (industriell hergest. Granulat) 1 kg ( $H_u = -39,4$ MJ/kg) Sauerstoff 3,07 kg/kg (2350 l/kg)
Energieverbrauch (Endenergie)	Dampf 0,7 MJ/kg Strom 0,2 kWh/kg	Strom 0,2 kWh/kg	-	-
Energieverbrauch (Primärenergie)	3,0 MJ/kg	2,09 MJ/kg	-	-
Produkt(e)	Dampf -4,46 MJ/kg Strom -1,24 kWh entspr. Primärenergiegewinn von 19,0 MJ/kg	Dampf -22,4 MJ/kg Strom -1,27 kWh entspr. Primärenergiegewinn von 44 MJ/kg	Wärme (-25,7 MJ/kg) entspr. Primärenergieeinsparung von 35,2 MJ/kg	Wärme (-40,5 MJ/kg) entspr. Primärenergieeinsparung von 55,4 MJ/kg
Luftemissionen*	Kohlendioxid 2392 g/kg Kohlenmonoxid 0,3 g/kg NO <sub>x</sub> 1,6 g/kg	Kohlendioxid 2392 g/kg Kohlenmonoxid 0,3 g/kg NO <sub>x</sub> 1,6 g/kg	Kohlendioxid 2200 g/kg	Kohlendioxid 3380 g/kg

Verfahren	Müllverbrennung	Wirbelschicht-Verbrennung	energetisches Recycling im Schulversuch (PMMA)	energetisches Recycling im Schulversuch (PS)
Wasseremissionen*	SO <sub>2</sub> 0,8 g/kg Cadmium 8,2 *10 <sup>-6</sup> g/kg Chlorid 0,64 g/kg Nickel 3,9*10 <sup>-6</sup> g/kg Blei 7,8*10 <sup>-5</sup> g/kg	SO <sub>2</sub> 0,7 g/kg -	-	-
Deponieraumverbrauch/ Abfall zur Verwertung	Rückstand Sortierung 335 g/kg Rückstand Verbrennung 99 g/kg	Rückstand Sortierung 335 g/kg Rückstand Verbrennung 140 g/kg	PMMA-Abfall 30 g/kg	PS-Abfall 50 g/kg
Bodenverbrauch	k.A.	k.A.	-	-
Lärmemissionen	k.A.	k.A.	-	-

\* Auswahl  
- entfällt  
k.A. keine Angabe

### 4.3.5 Ökobilanz der Darstellung und des Recycling von Kunststoffen

Diese vereinfachte Ökobilanz über Kunststoffe basiert auf den Daten, welche in den vorangegangenen Schulversuchen ermittelt wurden. Die Auswertung der Sachbilanzdaten erfolgte mit dem eigens hierzu erstellten Programm ÖKO-BILLY (Kapitel 5). Die Vorgehensweise für die Erstellung dieser schulischen Ökobilanz orientiert sich nach der Checkliste "Erstellung einer Ökobilanz im Chemieunterricht (Sek. II)" (Abschnitt 3.7).

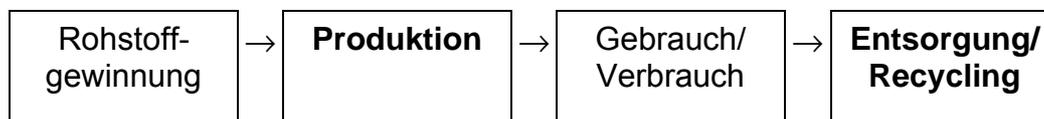
#### 4.3.5.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Aufgabe dieser ersten Phase ist die Festlegung auf das Ziel der Bilanzierung, der räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen sowie der Methode für die Wirkungsabschätzung. Zugleich werden unter dem didaktischen Blickpunkt der Elementarisierung eine Auswahl inhaltlicher und methodischer Aspekte getroffen.

Ziel dieser Ökobilanz soll es sein, die Herstellung und das Recycling von Kunststoffen an den beispielhaft ausgewählten Kunststoffen Polystyrol (PS) und Polymethacrylmethylester (PMMA) zu untersuchen. Die ganze Studie verläuft unter schulischen Bedingungen und ist auf die Zielgruppe Schüler ausgerichtet. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder Erfassung der tatsächlichen technischen Bedingungen.

Die Daten beruhen unter dem technologisch Gesichtspunkt ausschließlich auf Schulerperimenten. Sie sind somit nicht als repräsentativ für industrielle Verfahren anzusehen. Die Versuchsergebnisse zeigen aufgrund der Durchführungsbedingungen (Materialien, Erfahrung der Experimentatoren, äußere Bedingungen) eine größere Schwankungsbreite als Daten auf der Basis industrieller Verfahren. Somit können auch die Aussagen von Fall zu Fall unterschiedlich sein. Es besteht also eine gewisse Ungenauigkeit. Dies wird jedoch hinsichtlich der eingangs erhobenen Zielsetzung in Kauf genommen. Die Vollständigkeit der Daten ist eingeschränkt, weil nur solche Daten erfaßt werden, welche unter einfachen schulischen Bedingungen auch erhoben werden können (z. B. Energieverbrauch, stöchiometrische Massendifferenzen).

Der Untersuchungsrahmen umfaßt nicht den vollständigen Lebensweg, sondern nur die Lebenswegabschnitte Produktion und Recycling.



Die Rohstoffgewinnung, also beispielsweise die Gewinnung und Aufarbeitung von Erdöl, ist nicht im Untersuchungsrahmen eingeschlossen, da sie experimentell nicht erfaßt werden kann.

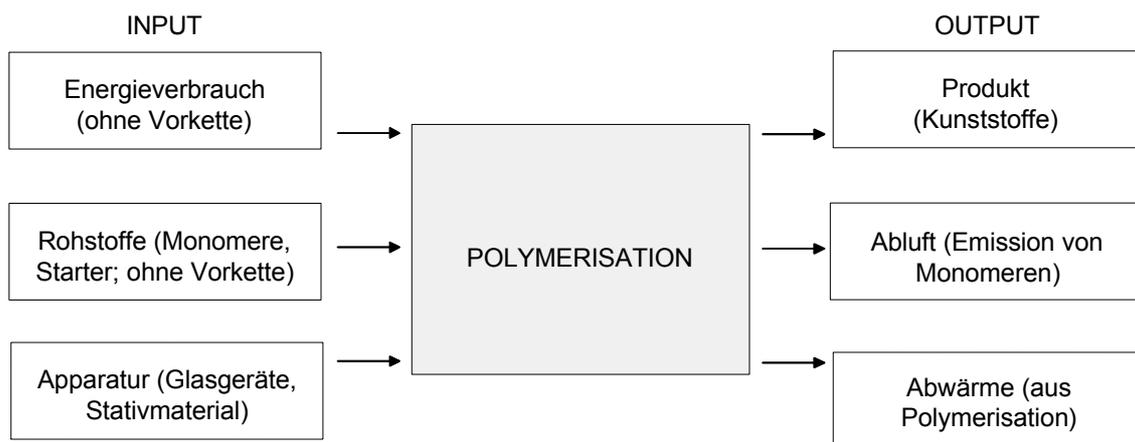
In dem Abschnitt der Produktion entsteht aus dem Monomer das Polymer, welches als Block im Reagenzglas zurückbleibt. Es werden Methacrylsäuremethylester (industriell, recycelt) mit Dibenzoylperoxid polymerisiert sowie Styrol ebenfalls mit Dibenzoylperoxid beziehungsweise mit Eisen(III)-chlorid.

Der Abschnitt Gebrauch/Verbrauch muß nicht betrachtet werden, da hier keine Umweltbelastungen auftreten.

Für die Entsorgung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Als Beispiel für das rohstoffliche Recycling dient die Pyrolyse von PMMA. Das so gewonnene Monomer läßt sich erneut polymerisieren. Beispielhaft für ein werkstoffliches Recyclingverfahren wird das Recycling von PS mittels Lösen herangezogen. Die Verbrennung wird an der kalorimetrischen Bestimmung des Heizwertes von PMMA und PS gezeigt.

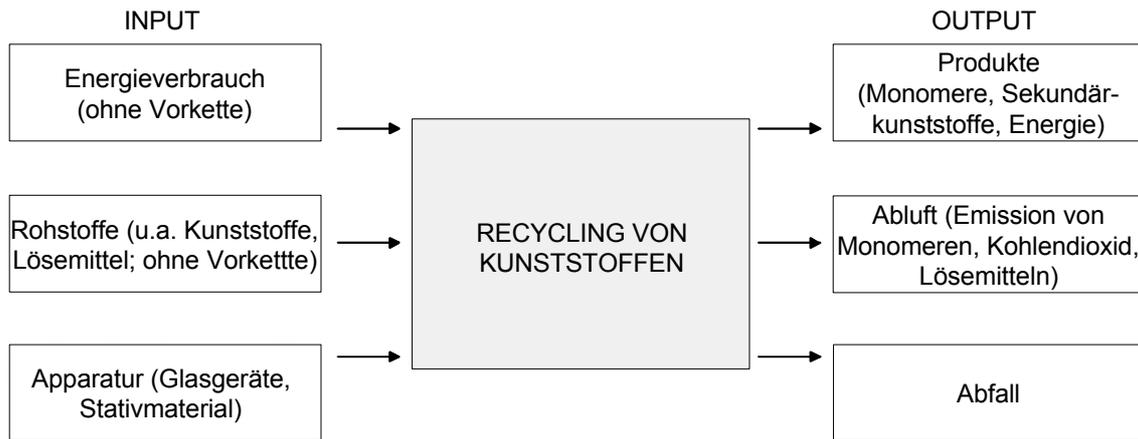
Für die untersuchte Produktionsphase werden als Inputs der Verbrauch an Energie und Rohstoffen erfaßt, nicht jedoch die Herstellung der Glasgeräte und des Stativmaterials (Abb. 40). Es werden auch nicht die Vorketten der Energiebereitstellung und der Rohstoffe untersucht. Als Outputs werden die Massen der Produkte bestimmt sowie die Luftemissionen über die Abluft ermittelt. Die Erfassung der Inputs und Outputs für das Recycling ist analog der Vorgehensweise bei der Produktion (Abb. 41). Als zusätzlicher Output wird die Abfallmenge bestimmt.

Die räumlichen Grenzen sind die jeweils unmittelbar im Versuch eingesetzten Geräte und Chemikalien. Auf eine Ausdehnung der Grenzen, etwa auf die Beleuchtung oder Heizung des Labors, wurde verzichtet, da der hier erforderliche Energieverbrauch für alle Experimente gleich ist.



Erläuterung:— Input/Output wird erfaßt bzw. — — wird nicht erfaßt

**Abb. 40:** Für die Polymerisation (nicht) erfaßte Inputs und Outputs



Erläuterung: — Input/Output wird erfaßt bzw. — — wird nicht erfaßt

**Abb. 41:** Für das Recycling von Kunststoffen (nicht) erfaßte Inputs und Outputs

Die funktionellen Einheiten sind für Produktion und Entsorgung nicht gleich. Für beide Bereiche werden zwar jeweils die Input-Output-Daten auf 1 g Polymer bezogen. Im Rahmen der Produktion ist jedoch Polymer das Produkt (Output), für den Bereich der Entsorgung das Edukt (Input).

Die zeitlichen Grenzen sind die Dauer des Versuchs. Die in der Ziel-Festlegung genannten Versuche sind keine kontinuierlichen Verfahren, so daß die Daten nicht auf einen Tag oder ein Jahr bezogen werden können.

Als Methode der Wirkungsabschätzung wird die Methode der Umweltbelastungspunkte gewählt. Folgende Kategorien werden im allgemeinen betrachtet:

- Fläche
- Abfall
- Energie
- Lärm
- Luftbelastung
- Wasserbelastung

#### 4.3.5.2 Sachbilanz

Innerhalb der Sachbilanz werden alle anfallenden Input-Output-Daten tabellarisch gesammelt und gegebenenfalls grafisch aufbereitet. Abbildungen 44 bis 46 zeigen die wesentlichen Ergebnisse der Sachbilanz. Der Energieverbrauch sowie -gewinn wird in Primärenergie angegeben. Für verschiedene Energieträger erfolgt die Umrechnung entsprechend des primärenergetischen Aufwands für deren Bereitstellung (KEA) (Abschnitt 2.6).

Als Input-Output-Daten wurden der Verbrauch an Monomeren und an Primärenergie sowie das Entweichen von Monomeren und Lösemittel in die Luft während der Reaktion erfaßt. Für die Darstellung von Kunststoffen (Abschnitt Produktion) sind sowohl die Input- als auch die Output-Daten zusammen dargestellt (Abb. 42). Für das Recycling von Kunst-

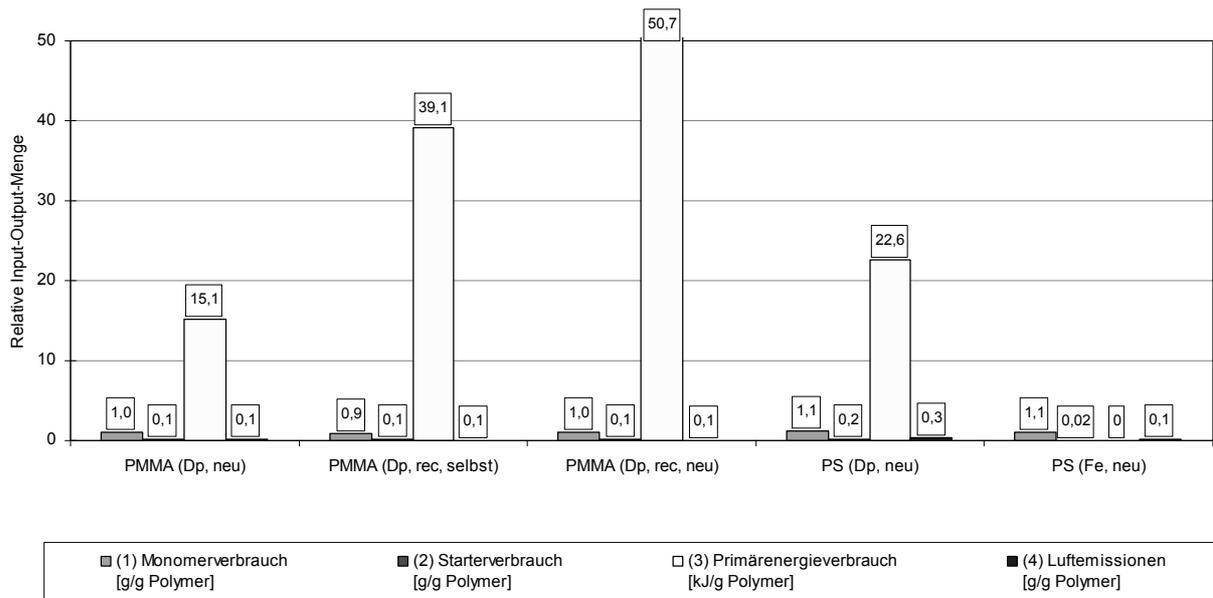
stoffen werden zur besseren Übersicht die Input- und Output-Daten getrennt voneinander abgebildet (Abb. 43, Abb. 44). Alle Angaben beziehen sich auf ein Gramm Polymer. Hiermit ist bei der Darstellung des Kunststoffs, also das Produkt, gemeint, bei dem Recycling das Edukt.

Als Ergebnis der Sachbilanz zeigt sich, daß der Verbrauch an Monomeren sowie an Starter bei fast allen betrachteten Verfahren nahezu gleich ist, da das Mengenverhältnis Monomer zu Starter im Versuch jeweils ähnlich war (Ausnahme PS mit Eisen(III)-chlorid)

Unterschiede zeigen sich beim Energieverbrauch und der Menge der Luftemissionen. Hinsichtlich des Verbrauchs an Primärenergie ist die Polymerisation von industriellem Methacrylsäuremethylester etwas günstiger als von industriell hergestelltem Styrol. Bei der Darstellung von PMMA nimmt der Bedarf an Energie deutlich zu, wenn recyceltes Monomer wieder polymerisiert wird. Die Luftemissionen liegen bei der Herstellung von PS mit Dibenzoylperoxid höher als bei den anderen Verfahren (Abb. 42)<sup>26</sup>.

<sup>26</sup> Erläuterung der Abkürzungen für die Grafiken der Sachbilanz (Abb. 44 bis Abb. 44)

Abkürzung	Bedeutung
PMMA	Polymethacrylsäuremethylester
PS	Polystyrol
PMMA (Dp, neu)	Polymerisation von industriellem Methacrylsäuremethylester mit Dibenzoylperoxid
PMMA (Dp, rec, selbst)	Polymerisation von recyceltem Methacrylsäuremethylester (aus selbsthergestelltem PMMA) mit Dibenzoylperoxid
PMMA (Dp, rec, neu)	Polymerisation von recyceltem Methacrylsäuremethylester (aus ehemals industriell hergestelltem Neumaterial) mit Dibenzoylperoxid
PS (Dp, neu)	Polymerisation von industriellem Styrol mit Dibenzoylperoxid
PS (Fe, neu)	Polymerisation von industriellem Styrol mit Eisen(III)-chlorid
PMMA (Py, selbst)	Pyrolyse von PMMA (selbst im Schulversuch hergestellt)
PMMA (Py, neu)	Pyrolyse von industriell hergestelltem PMMA
PS (LD, neu)	Lösen von industriell hergestelltem PS in Cyclohexanon und anschließender Destillation
PMMA (Vb, neu)	Verbrennung von industriell hergestelltem PMMA
PS (Vb, neu)	Verbrennung von industriell hergestelltem PS



**Abb. 42:** Sachbilanz zur Darstellung von Kunststoffen

Für das Recycling von Kunststoffen werden verschiedene Verfahren miteinander verglichen.

- Rohstoffliches Recycling von PMMA (selbthergestelltes sowie industriell hergestelltes Polymer) (Pyrolyse)
- Werkstoffliches Recycling von industriell hergestelltem PS (durch Lösen in Cyclohexanon und anschließendes Entfernen des Lösemittels durch Destillation)
- Energetisches Recycling von industriell hergestelltem PMMA und PS (Verbrennen im Kalorimeter)

Als Inputs wurden der Verbrauch an Energie, Lösemittel, Wasser, Sauerstoff und Kohle erfaßt. Outputs sind die Mengen an recyceltem Monomer beziehungsweise Kunststoff, an Abfall, an redestilliertem Lösemittel sowie der Massenverlust (Monomer, Lösemittel oder Kohlendioxid) in die Luft.

Es fällt der relativ hohe Energieverbrauch für die Pyrolyse von PMMA auf, welcher noch durch das Recycling von PS übertroffen wird (Abb. 43). Dieses letztgenannte Verfahren benötigt zudem noch Lösemittel und Wasser für die Rückflußkühlung. Die beiden Verfahren der Verbrennung bedürfen nur einer minimalen Menge an Sauerstoff und Kohle.

Die Output-Daten zeigen, daß man über die Pyrolyse das Monomer mit einer Ausbeute 80 bis 90 % zurückerhalten kann (Abb. 44). Beim Recycling von PS lassen sich etwa 70 % des eingesetzten Kunststoffes zurückgewinnen, der Rest bleibt bedingt durch das Verfahren als Abfall zurück. Hierbei entsteht im Vergleich zu allen anderen Verfahren der meiste Abfall. Etwa zwei Drittel der für das Lösen des PS erforderlichen Lösemittelmenge lassen sich zurückgewinnen. Der Rest verdunstet und wird als Luftemissionen erfaßt. Bei der Verbrennung der Kunststoffe wird angenommen, daß sie keine Additive enthalten, und

somit als Verbrennungsprodukte nur Wasser und Kohlendioxid (Luftemission) entstehen. Ein Energiegewinn ergibt sich nur bei der Verbrennung der Kunststoffe.

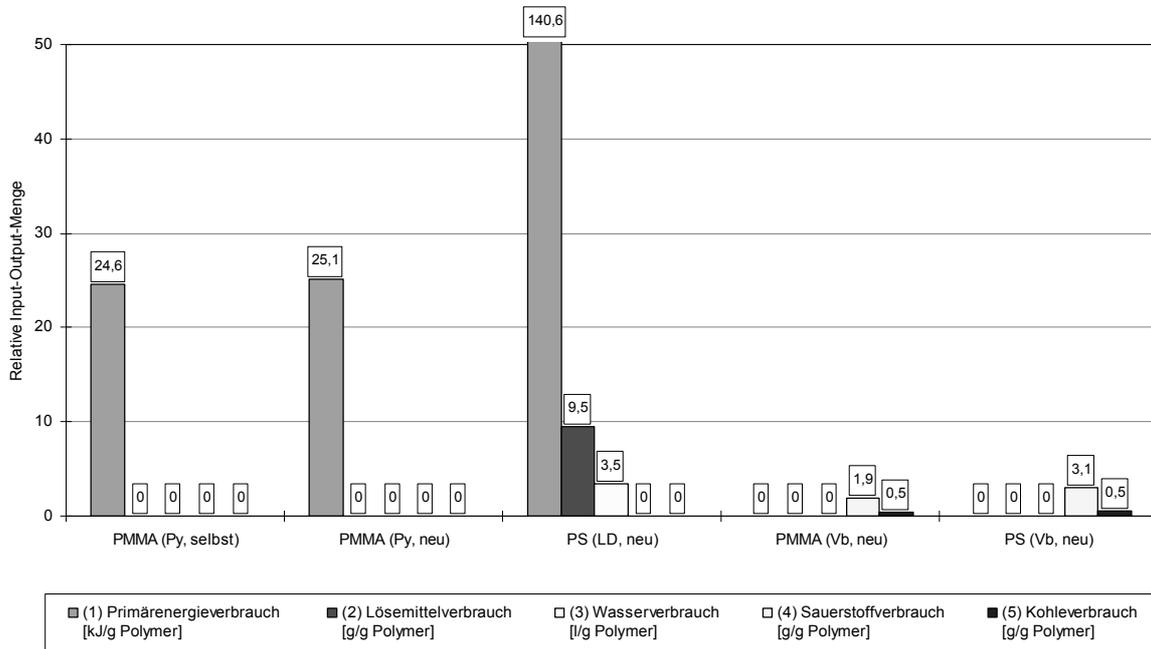


Abb. 43: Sachbilanz Recycling von Kunststoffen (nur Input-Daten)

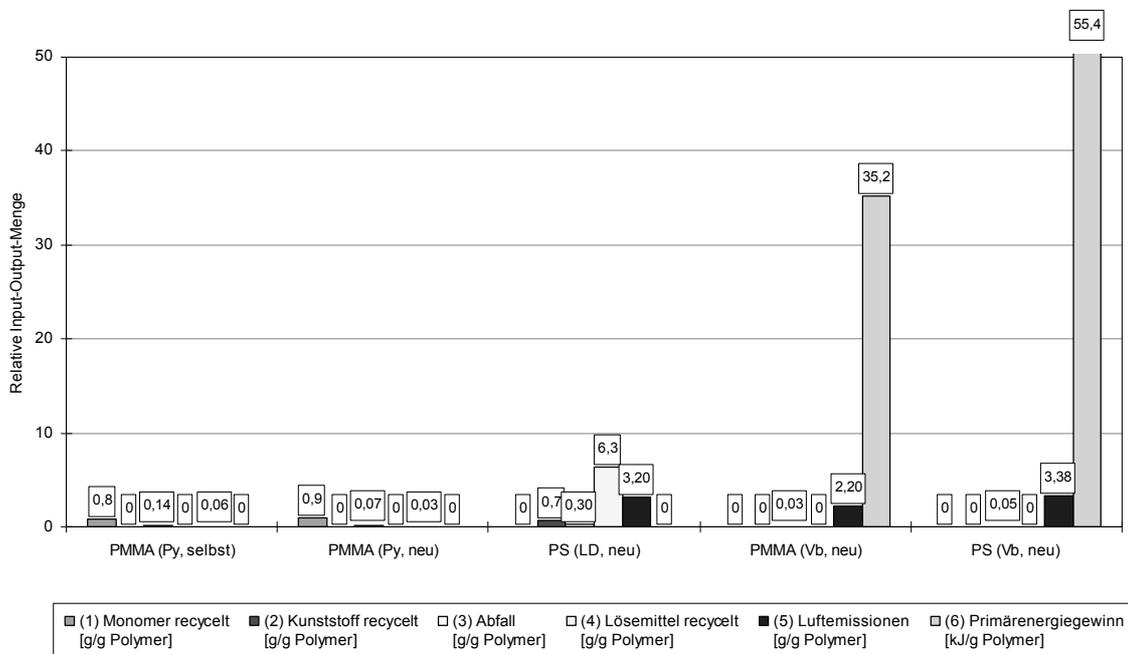


Abb. 44: Sachbilanz Recycling von Kunststoffen (nur Output-Daten)

Die Qualität der in den Schulversuchen gewonnenen Input-Output-Daten entspricht den in der Zielsetzung beschriebenen Anforderungen. Die Aufnahme von Daten aus der Literatur war nicht erforderlich.

#### 4.3.5.3 Wirkungsabschätzung

Auf der Grundlage der in der Sachbilanz erhobenen Daten werden über die Methode der Umweltbelastungspunkte die Umweltbelastungen für die Darstellung und das Recycling von Kunststoffen beurteilt. Es existieren nicht für alle Stoffströme Ökofaktoren, sondern nur für solche, welche als umweltbelastend eingestuft werden. Für die quantitative Ermittlung der Belastung wird die Menge einer Umwelteinwirkung mit dem Ökofaktor multipliziert. Der so erhaltene Zahlenwert (Umweltbelastungskennzahl) kann mit anderen Kennzahlen zusammenaddiert werden und drückt als Summe die gesamte Umweltbelastung aus.

Bei der Herstellung der Kunststoffe werden im Rahmen der Methode der Energieverbrauch und der Summenparameter NMVOC erfaßt (Tab. 36). NMVOC (Non Methane Volatile Organic Carbons) steht für alle in die Luft abgegebenen (flüchtigen) organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen außer Methan.

**Tab. 36:** Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Kunststoffe; Herstellung)

Sachbilanzposition	Kategorie
Energieverbrauch	Energie
Luftemissionen	Luftbelastung
NMVOC	Kohlenwasserstoffe ohne Methan

Bei dem Recycling von Kunststoffen werden im Rahmen der Methode der Energieverbrauch, die Luftemissionen Kohlendioxid und NMVOC sowie der Deponieraumverbrauch berücksichtigt (Tab. 37).

**Tab. 37:** Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den einzelnen Kategorien (Kunststoffe; Recycling)

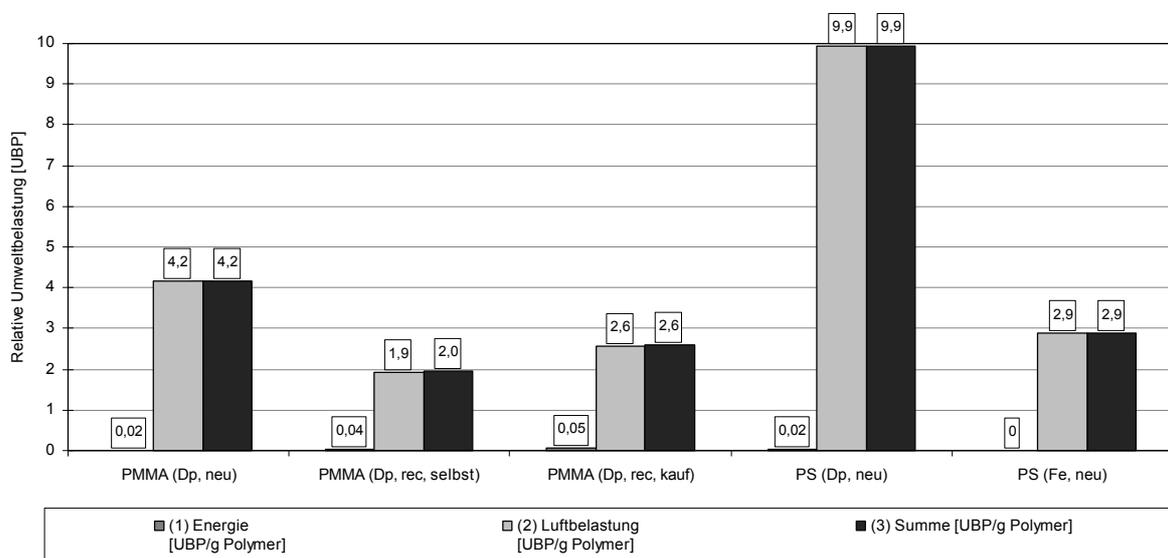
Sachbilanzposition	Kategorie
Energieverbrauch (bzw. -gewinn)	Energie
Luftemissionen	Luftbelastung
Kohlendioxid	Kohlenstoffoxide
NMVOC	Kohlenwasserstoffe ohne Methan
Deponieraumverbrauch	Abfall
Kunststoffabfall	Reaktordeponie

Abb. 45 zeigt die Umweltbelastungen bei der Herstellung von Kunststoffen. Die Polymerisation von Styrol zu Polystyrol mit Dibenzoylperoxid führt zur größten Umweltbelastung aller untersuchten Verfahrensvarianten. Es folgt die Darstellung von PMMA mit Dibenzoylperoxid und industriell hergestelltem Monomer. Die ebenfalls untersuchten Varianten der Darstellung von PMMA aus recyceltem Monomer mit dem gleichen Radikalstarter sowie die Herstellung von PS mit Eisen(III)-chlorid zeigen hinsichtlich ihrer Umweltbelastung kaum Unterschiede.

Generell ist der geringe Anteil der Energie an der Gesamtumweltbelastung auffällig. Die Luftbelastungen aufgrund der Freisetzung des jeweiligen Monomers machen den Hauptanteil an der Gesamtbelastung aus.

Für die Darstellung von PMMA wurden drei unterschiedliche Varianten untersucht. Die Verwendung von recyceltem Monomer führt zu einer deutlich reduzierten Umweltbelastung aufgrund verringerter Monomeremissionen. Der Energieaufwand liegt zwar hierbei auffallend über der ursprünglichen Variante, bei der industriell hergestelltes Monomer eingesetzt wird, jedoch ist der Anteil des Energieverbrauchs an der Gesamtbelastung insgesamt sehr gering.

Für die Herstellung von PS wurden zwei Verfahren herangezogen. Die Verwendung von Eisen(III)-chlorid statt Dibenzoylperoxid führt zu einer deutlich verminderten Umweltbelastung, jedoch muß - bedingt durch die Wahl des Starters - eine Dunkelfärbung des polymerisierten Kunststoffs in Kauf genommen werden.



**Abb. 45:** Umweltbelastung bei der Herstellung von Kunststoffen im Schulversuch

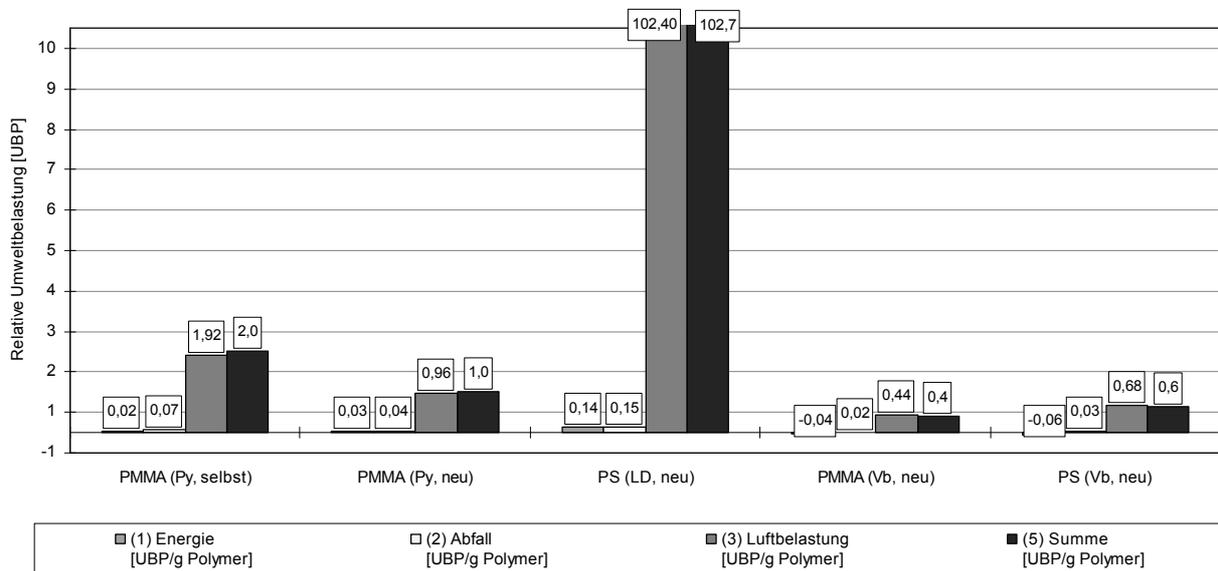
Im Rahmen der untersuchten Recyclingverfahren bringt das werkstoffliche Recycling von PS die weitaus größten Umweltbelastungen mit sich. Alle weiteren untersuchten Varianten haben daran nur einen Anteil von weniger als zwei Prozent und liegen also deutlich darunter (Abb. 46).

Innerhalb der rohstofflichen Recyclingvarianten ist die Pyrolyse von PMMA (aus industriellem Monomer hergestellt) etwas weniger umweltbelastend als jene von PMMA,

welches aus recyceltem Monomer gefertigt wurde. Besser noch ist die Verbrennung der Kunststoffe, welche insgesamt die geringsten Umweltbelastungen mit sich bringt.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, daß der Energieverbrauch den geringsten Anteil an der Gesamtbelastung aufweist; diese wird generell durch die Luftbelastung (NMVOC, Kohlendioxid) bestimmt. Bei der Verbrennung wird eine Gutschrift für die freiwerdende Wärme gegeben, die jedoch insgesamt das Ergebnis nur unwesentlich verbessert.

Verantwortlich für das schlechte Abschneiden des werkstofflichen Recycling des PS ist vor allem das nach Ausgießen aus dem Kolben im Kunststoff zurückbleibende Cyclohexanon, welches dann über den Zeitraum von einigen Tagen in die Luft entweicht und als NMVOC bewertet wird. Bei der Pyrolyse von PMMA wird das entweichende Monomer ebenfalls als NMVOC erfaßt. Bei der Verbrennung muß nur das entstehende Kohlendioxid als Luftemission berücksichtigt werden.



**Abb. 46:** Umweltbelastung bei dem Recycling von Kunststoffen im Schulversuch

#### 4.3.5.4 Auswertung

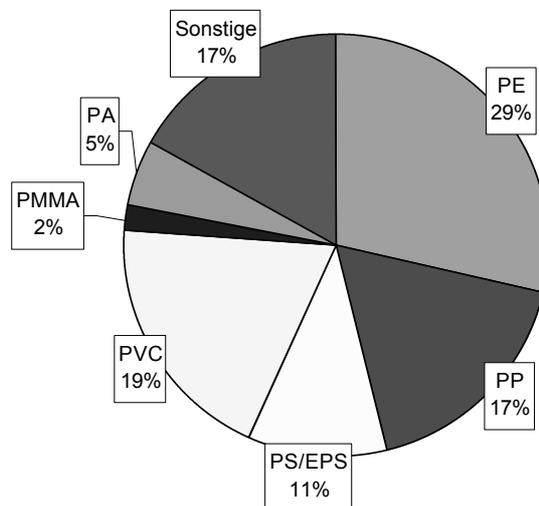
Im Rahmen der Auswertung geschieht eine Diskussion der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung. Zudem erfolgt eine qualitative Beurteilung der Datenqualität. Der Vergleich verschiedener Herstellungs- und Recyclingsvarianten erfolgt alleine unter dem ökologischen Gesichtspunkt. Bestimmte praktische Anforderungen, wie beispielsweise Einsatzbereich und Recyclefähigkeit der Kunststoffe, welche an die Kunststoffe gestellt werden könnten, bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

#### Herstellung von Kunststoffen

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz zeigt sich für die betrachteten Varianten der Darstellung von Kunststoffen, daß die ausschlaggebenden

Faktoren für die Beurteilung die Kategorien Energie und Luftbelastung sind. Zusammenfassend weist die Polymerisation von Methacrylsäuremethylester mit Dibenzoylperoxid sowie die von Styrol mit Eisen(III)-chlorid die geringsten Umweltbelastungen auf. Am schlechtesten wurde die Darstellung von PS mit Dibenzoylperoxid eingestuft.

An dieser Stelle stellt sich im Unterricht die Frage zum Praxisbezug, das heißt, in wieweit die experimentell ermittelten Ergebnisse die tatsächlichen Verhältnisse bei der industriellen Herstellung von Kunststoffen widerspiegeln. In der Bundesrepublik Deutschland wurden 1999 ca. 14 Mio t Kunststoffe hergestellt [151]. Wie Abb. 47 zeigt, haben Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS) jeweils einen relativ hohen Anteil an der Gesamtproduktionsmenge. Der Anteil von PMMA liegt nur bei etwa 2 %. Bei den aufgeführten Kunststoffen handelt es bis auf PMMA um Standardkunststoffe (Commodities), welche sich durch einen relativ geringen Preis, hohe Produktionsmengen und einer kurzen Lebensdauer von den technischen Kunststoffen unterscheiden. Die genannten Kunststoffe werden vor allem im Baubereich, in der Auto- und Elektroindustrie sowie für Verpackungen eingesetzt.



**Abb. 47:** Kunststoffproduktion in Deutschland 1999<sup>27</sup>

Betrachtet man sich den Primärenergiebedarf für die Herstellung als grobe exemplarische Näherung für die gesamte Umweltbelastung, so zeigt sich, daß die Herstellung der o.g. Standardkunststoffe einen relativ geringen Primärenergiebedarf<sup>28</sup> erfordert (Tab. 38). Polyethylenterephthalat (PET) liegt ebenfalls im unteren Bereich, was neben seinen Gebrauchseigenschaften sicherlich auch ein Grund für den wachsenden Einsatz als

<sup>27</sup> Unter "Sonstige" fallen z. B. PC, PET, POM, ABS/SAN und PBT. Nicht aufgeführt sind Klebstoffe, Lacke, Harze und Fasern (Anteil an Gesamtproduktionsmenge ca. 5 Mio t) sowie Polyurethane (ca. 0,8 Mio t). Die insgesamt zugrunde gelegte Kunststoffmenge beträgt etwa 8 Mio t [151].

<sup>28</sup> Die Angaben zum Primärenergiebedarf für die Herstellung der Kunststoffe stammen aus den APME-Eco-Profiles-Reports. Aufgrund der dort eingesetzten Methode zur dessen Bestimmung beinhaltet der Gesamtbetrag auch den Feedstock sowie die primärenergetischen Aufwendungen für die Herstellung und Lieferung der eingesetzten Energieträger, deren Energiegehalt sowie dem Energiebedarf für Transporte.

Verpackungsmaterial für Getränkeflaschen sein dürfte. Relativ energieaufwendiger ist die Herstellung von PMMA und Polycarbonat (PC).

Vergleicht man diese Fakten mit den Ergebnissen der vereinfachten Ökobilanz zur Darstellung von Kunststoffen, wird deutlich, daß sich zwar der Primärenergieaufwand für die Darstellung von PS und PMMA im Experiment kaum unterscheidet, jedoch aufgrund der höheren Luftemissionen die Herstellung von PMMA unter Umweltgesichtspunkten besser ist als die von PS. Hier zeigen sich die Grenzen der Methode der Umweltbelastungspunkte. Für die Industrie kann angenommen werden, daß eventuelle Luftemissionen unproblematisch sind, da diese zum Beispiel über Filtereinrichtungen daran gehindert werden können, in die Umwelt zu gelangen. Somit ist der Energieaufwand zur Gewinnung und Weiterverarbeitung der Rohstoffe sowie für den eigentlichen Herstellungsprozeß die entscheidende Größe.

**Tab. 38:** Primärenergiebedarf für die Herstellung ausgewählter Kunststoffe

Kunststoff	Bruttoprimärenergiebedarf [MJ/kg]	Literatur
PVC	63	[152]
PP	77	[153]
PET	78	[154]
PE (LD)	81	[155]
PS (GPPS)	87	[156]
PMMA	110	[157]
PC	117	[158]

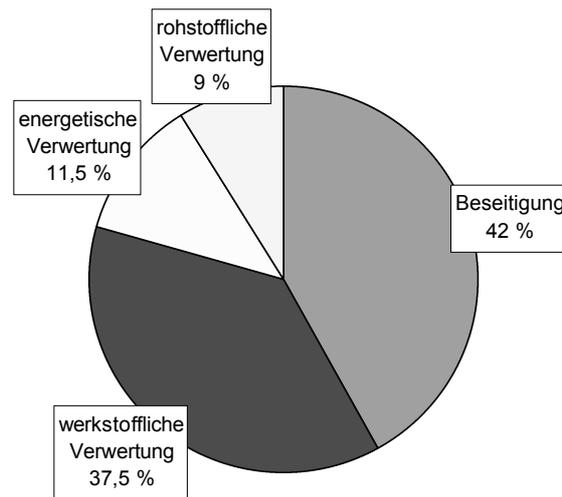
### Recycling von Kunststoffen

Für die Beurteilung der untersuchten Recyclingvarianten von Kunststoffen werden die Kategorien Energie, Abfall und Luftbelastung herangezogen. Für die Ermittlung der Umweltbelastung werden also der Verbrauch an Lösemittel, Wasser, Sauerstoff und Kohle nicht berücksichtigt. In die Luft entweichendes Lösemittel (Cyclohexanon beim PS-Recycling) und Pyrolysegase werden als NMVOC in der Kategorie Luftbelastung erfaßt. Bei der Verbrennung der Kunststoffe wird angenommen, daß sie zu Kohlendioxid und Wasser verbrennen. Kohlendioxidemissionen werden ebenfalls über die Kategorie Luftbelastung beurteilt. Bei allen betrachteten Verfahren entsteht Abfall, welcher - so wird hier angenommen - aufgrund der enthaltenen organischen Verbindungen auf einer Reaktor-deponie entsorgt werden muß.

Als das schlechteste Recyclingverfahren zeigt sich aufgrund der hohen Luftbelastung (entweichendes Rest-Cyclohexanon) eindeutig das werkstoffliche Recycling von PS. Es folgt die Pyrolyse, welche eine wesentlich geringere Belastung der Luft aufweist. Für die Pyrolyse wird als Edukt PMMA eingesetzt, welches aus industriellem oder recyceltem Methacrylsäuremethylester hergestellt wurde. Die Pyrolyse von PMMA aus industriellem Monomer ist etwas besser als die von PMMA aus recyceltem Monomer, da weniger Abfall und Luftbelastungen entstehen. Am günstigsten von allen Verfahren zeigt sich die Verbrennung. Ausschlaggebend für ihre Beurteilung ist die geringe Abfallmenge und eine

sehr verminderte Belastung der Luft. Die durch die Verbrennung gewonnene Energie hat keine Bedeutung für die Gesamtbeurteilung der Pyrolyse, da ihr Anteil gering ist.

Für eine Beurteilung der schulexperimentellen Recyclingverfahren von Kunststoffen soll auch hier die gängige technische Praxis betrachtet werden. Von den insgesamt 3,6 Mio t Altkunststoffe, die als Abfall anfallen, wurden in Deutschland 42 % beseitigt und 58 % verwertet. Von den zur Verfügung stehenden Verwertungsmöglichkeiten wurde mehrheitlich das werkstoffliche Recycling angewandt (Abb. 48) [159].



**Abb. 48:** Verwertung und Beseitigung von Kunststoffabfällen in Deutschland 1999

Die Wahl des Verwertungsverfahrens richtet sich zunächst einmal nach der Abfallqualität. Die werkstoffliche Verwertung ist besonders für sortenreine Kunststoffabfälle geeignet, die sauber oder auch leicht verschmutzt vorliegen können. Je höher der Anteil der Verschmutzungen ist oder je mehr die Kunststoffe als Materialverbünde vorliegen, desto mehr empfiehlt sich die energetische Verwertung, um eine aufwendige Trennung der Verbundkomponenten zu umgehen.

Für einen näherungsweisen ökologischen Vergleich verschiedener industrieller Recyclingverfahren für Kunststoffe - wie sie bereits weiter oben ausführlich dargestellt wurden (Abschnitt 4.3.4) - soll der jeweilige Bedarf an Primärenergie herangezogen werden (Tab. 39).

Das aufgeführte werkstoffliche Recycling liefert einen Sekundärkunststoff, welcher meist unter Zusatz von Primärgranulat, wieder zu einem Produkt umgesetzt werden kann (z. B. als PE-Spülmittelflasche oder PVC-Folie). Das beispielhaft genannte rohstoffliche Verfahren erlaubt die Gewinnung von monomerem Methacrylsäuremethylester, welcher wieder zur Polymerisation eingesetzt werden kann. Die energetischen Verfahren verbrennen den Kunststoff und liefern dabei Strom und Wärme (Dampf).

Beim Vergleich wird deutlich, daß die werkstofflichen Verfahren relativ energieaufwendig und somit ökologisch nachteilig sind. Das rohstoffliche Verfahren liegt etwa gleich auf. Die energetischen Verfahren liefern unter Betrachtung des gesamten Verfahrens (einschließlich der erforderlichen Inputs von Energie) noch Strom und Dampf und sind

daher (primär)energetisch am günstigsten. Dieses Ergebnis zeigt sich tendenziell auch in der vereinfachten schulischen Ökobilanz.

**Tab. 39:** Primärenergiebedarf für ausgewählte Recyclingverfahren von Kunststoffen

Der Primärenergiebedarf wurde aus dem jeweils von den Autoren genanntem Verbrauch an Propangas, Strom oder Dampf errechnet. Angegeben ist die Differenz von Input zu Output. Ein negatives Vorzeichen bedeutet einen Gewinn an Primärenergie.

Recyclingverfahren	Primärenergiebedarf [MJ/kg]	Literatur
werkstoffliche Verwertung (Sortieren, Granulieren und Umschmelzen gebrauchter Spülmittelflaschen)	+13	[150, S 52 ff.]
werkstoffliche Verwertung (Inlösungnahme von PVC im Technikumsmaßstab)	+8	[149]
rohstoffliche Verwertung (Pyrolyse von PMMA im Technikumsmaßstab)	+8	[148]
energetische Verwertung (industr. Müllverbrennung von DSD-Abfällen)	-16	[150, S. 50 ff.]
energetische Verwertung (industr. Wirbelschicht-Verbrennung von DSD-Abfällen)	-42	[150, S 50 ff.]

#### 4.4 Zusammenfassung des Abschnitts

Für die Erstellung einer Ökobilanz im Unterricht stehen mit den Experimenten zur Destillation und zum Ionenaustausch sowie zur Darstellung und zum Recycling von Kunststoffen zwei experimentelle Zugänge zur Verfügung.

Die Experimente sind in ihrem Aufbau und ihrer Durchführung stets einfach und überschaubar gehalten. Eine Schwierigkeit können aber die zum Teil notwendigen mathematische Berechnungen sein, welche an sich nicht schwierig sind, aber zeitlich aufwendig und fehlerbehaftet sein können. Eine Zeitersparnis stellt das Programm ÖKO-BILLY dar, welches die Berechnungen übernimmt.

Ein Vergleich der Sachbilanzdaten aus den Schulexperimenten mit industriellen Daten zeigt zum Teil gravierende Abweichungen. Gründe sind vor allem, daß die im Schulversuch dargestellten Verfahren nur zum Teil mit den industriellen Verfahren übereinstimmen. Ferner wird bei den Versuchen mit offenen Apparaturen und kleinen Durchsätzen gearbeitet. Zudem wird auf Luftfilter oder Abwasserreinigung verzichtet. Schließlich bestehen oftmals auch andere Systemgrenzen. So sind teilweise Umwelteinwirkungen, etwa durch Transporte oder Bereitstellung der Energieträger, in den industriellen Input-Output-Daten beinhaltet und können auch nicht herausgerechnet werden.

Je mehr sich schulische und industrielle Verfahren gleichen, beispielsweise bei der Herstellung von entionisiertem Wasser über Destillation und Ionenaustausch oder bei der Verbrennung von Kunststoffen, um so vergleichbarer werden in bestimmten Grenzen auch die Sachbilanzdaten. Hierbei ist dann der Maßstab des Experiments weniger wichtig als vielmehr relevante physikalische Konstanten, wie die Verdampfungsenthalpie von Wasser, die Austauschkapazität des Harzes oder der Heizwert des verbrannten Kunststoffes.

Auf der Basis der experimentell ermittelten Input-Output-Daten kann im Unterricht eine vereinfachte Ökobilanz erstellt werden. Ziel ist Ermittlung der Umweltbelastung für die jeweils verglichenen Verfahren innerhalb der Versuchsreihen. Es lassen sich mit den Daten eine Sachbilanz aufstellen und die Wirkungsabschätzung berechnen. Im Rahmen der Auswertung kann daraufhin eine Empfehlung für ein Verfahren ausgesprochen werden. So hat sich gezeigt, daß das Verfahren des Ionenaustausches gegenüber der Destillation vorzuziehen ist. Bei der Darstellung von Kunststoffen erweist sich die Variante der Polymerisation von Methacrylsäuremethylester mit Dibenzoylperoxid günstiger als mit Styrol und Dibenzoylperoxid. Für das Recycling von Kunststoffen ist die Verbrennung den anderen Verfahren vorzuziehen.



## 5 Computerunterstützter Zugang zum Thema Ökobilanzen

### 5.1 Einführung

Das Thema Ökobilanzen läßt sich im Chemieunterricht auf zweifache Weise angehen; zum einen mittels eines experimentellen Zugangs, der im vorangegangenen Kapitel 4 ausführlich vorgestellt wurde; zum anderen mittels eines computerunterstützten Zugangs in Form geeigneter Software, der an dieser Stelle behandelt werden soll. Eine auf diesen beiden Medien basierende Unterrichtskonzeption für den Chemieunterricht der Sekundarstufe II wurde bereits im Abschnitt 3.6.3 beschrieben.

Bei der Erstellung einer Ökobilanz selbst im kleinen schulischen Maßstab zeigen sich in der Praxis zwei Probleme: ihr komplexer Aufbau und die Handhabung großer Datenmengen. Als Lösung dieser Probleme bietet sich ein Computerprogramm an, welches die notwendigen Berechnungen automatisch übernimmt und die Ergebnisse grafisch darstellt. Zudem sollte es als Handreichung dienen, welche durch die verschiedenen Stufen der Ökobilanz führt. Vor diesem Hintergrund wurde das Programm ÖKO-BILLY entwickelt, welches vor allem für den Einsatz im Chemieunterricht der gymnasialen Oberstufe gedacht ist.<sup>29</sup>

ÖKO-BILLY ist einerseits ein Lernprogramm für das Thema Ökobilanzen. Ausgehend von einer kurzen Einführung in die Theorie, wie eine Ökobilanz aufgebaut und erstellt ist, geht es über zu dem komplexeren Beispiel der Papierherstellung bis hin zu vereinfachten selbsterstellten Ökobilanzen für die Produkte Kunststoffe und entionisiertes Wasser. Die Angaben zur Papierherstellung stammen aus einer Modellökobilanz des IFEU-INSTITUTES FÜR ENERGIE UND UMWELTFORSCHUNG. Eine solche Modellökobilanz weist gegenüber einer großen Studie den Vorteil einer überschaubaren Zahl an Datensätzen auf, ohne jedoch insgesamt an Aussagekraft zu verlieren [160]. Die Experimente sind in Kapitel 4 beschrieben.

Andererseits ist ÖKO-BILLY auch ein Auswertungsprogramm. Die beiden vereinfachten Ökobilanzen, welche von den Schülern selbst erstellt werden können, haben eine experimentelle Basis. Deren Daten - zum Beispiel zum Energieverbrauch oder Luftbelastung - werden zusammengetragen und beurteilt. Selbst bei einem relativ kleinen Versuch im Reagenzglas können schon Datenmengen anfallen und Berechnungen notwendig sein, welche schnell über den zeitlichen Rahmen von Schulstunden hinausgehen. Um dem abzuhelpen, wird die Auswertung durch Computerunterstützung beschleunigt.

Gerade für diese computerunterstützte Auswertung bietet sich ein professionelles Rechenprogramm an, daß dazu konzipiert wurde, mit großen Datenmengen umzugehen und Berechnungen zu ermöglichen. Eines solches ist das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel. Nun erfordert es einiges an speziellen Vorkenntnissen, um reibungslos und zügig damit arbeiten zu können. Glücklicherweise bietet Excel mit der Makrosprache VBA von sich aus die Möglichkeit, sogenanntes Makros zu erstellen und so die Benutzer-

---

<sup>29</sup> Das Programm ÖKO-BILLY kann über die Web-Seite <http://www.fam-horn.de> bezogen werden.

freundlichkeit durch Automatisierung zu steigern. Somit lag es nahe, ÖKO-BILLY in Excel zu erstellen.

Das Ergebnis ist benutzer- (das heißt schüler-) freundliches Programm zur Erarbeitung und Auswertung des Themas Ökobilanzen im Unterricht, welches im folgenden ausführlich vorgestellt werden soll.

## 5.2 Definitionen

Die Liste enthält die Erklärungen für zahlreiche Begriffe aus dem Bereich Computer und Programmierung, welche zum Verständnis der nachfolgenden Beschreibungen von ÖKO-BILLY wesentlich sind.

- **Befehlsschaltfläche:**  
Schaltfläche, welche auf Klick des Benutzers ein vorher zugewiesenes Makro ausführt
- **Bereich:**  
Erste Gliederungsebene von ÖKO-BILLY (entspricht einer Excel-Datei)
- **Excel:**  
Tabellenkalkulationsprogramm der Microsoft Corp.
- **Ganze Ansicht:**  
Makro in ÖKO-BILLY zum Ausblenden unerwünschter Informationen auf dem Bildschirm (zum Beispiel ohne Symbolleisten)
- **Hauptseite:**  
Die erste Seite von ÖKO-BILLY, über die alle anderen Unterseiten aufgerufen werden.
- **Listefeld:**  
Enthält eine Liste von Elementen, welche über das Abrollmenü (ähnlich einem Pull-Down-Menü) ausgewählt werden können. Jedem Element kann ein anderes Makro zugeordnet werden.
- **Makro:**  
Gespeicherte Folge von Befehlen
- **Microsoft:**  
Microsoft Excel und Windows sind eingetragene Warenzeichen der Microsoft Corporation (Redmond, Washington, USA).
- **Normale Ansicht:**  
Makro in ÖKO-BILLY zur Herstellung der gewohnten Bildschirmansicht.
- **Seite:**  
Zweite Gliederungsebene in ÖKO-BILLY (entspricht einem Excel-Tabellenblatt)
- **Startseite:**  
Die erste Seite eines Bereiches in ÖKO-BILLY
- **Symbolleiste:**  
Zusammenfassung von Sinnbildern (Icons) für Anwendungsprogramme, Dateien oder Makros.

- Tabellenkalkulation:  
Anwendungsprogramm zum Umgang mit Zahlen, welches aufwendige Rechenoperationen ermöglicht (zum Beispiel statistische Auswertungen).
- Visual Basic für Applikationen (VBA):  
Makrosprache zum Erstellen von (zum Teil komplexen) Makros
- Windows:  
Betriebssystem der Microsoft Corp. mit einer grafischen Benutzeroberfläche.
- Zoom-Faktor:  
Ein Listenfeld zum Einstellen der gewünschten Bildschirmanzeige.
- <...>  
Text zwischen <...> bezeichnet Tasten der Tastatur. Beispielsweise bedeutet <Strg>+<o>, daß die Tasten <Strg> und die Taste <o> zusammen gedrückt werden müssen.

### 5.3 Microsoft Excel und VBA

Microsoft Excel ist ein Tabellenkalkulationsprogramm. ÖKO-BILLY wurde unter Microsoft Excel 5 sowie Excel 97 erstellt und ist für Excel 97 optimiert. Während ein Textverarbeitungsprogramm zum Umgang mit Text erstellt ist, dient ein Tabellenkalkulationsprogramm zum Umgang mit Zahlen. Die Arbeitsoberfläche ist eine zweidimensionale Tabelle mit nummerierten Zeilen und Spalten. Kleinste Einheit einer Tabelle ist die Zelle, welche eine eindeutige Zeilen- und Spaltennummerierung hat. In die Zellen können Zahlenwerte eingegeben und durch Formeln miteinander verknüpft werden.

Die Arbeitsoberfläche, in welcher sich die Zellen befindet, wird als Tabellenblatt bezeichnet. Mehrere Tabellenblätter sind zu einer Arbeitsmappe zusammengefaßt, welche die eigentliche Excel-Datei bildet.

Wird beispielsweise in die Zelle A1 die Formel " $=B1*C1$ " eingegeben, so bildet Excel das Produkt aus den Zellen B1 und C1 und stellt dieses in A1 dar.

Zur grafischen Auswertung können die in den Zellen eingegebenen Zahlen in Diagrammen dargestellt werden. Zudem ist die optische Gestaltung von Text sowie die Erstellung von grafischen Elementen möglich.

VBA steht für "Visual Basic für Applikationen" und bezeichnet eine Makrosprache, welche ursprünglich nur für Excel zur Verfügung stand und mittlerweile auch in anderen Microsoft-Anwendungen zu finden ist. Eine Makrosprache ist eine einfache Form einer Programmiersprache. Das Ziel eines Makros ist es, häufig sich wiederholende Befehlsfolgen zu speichern und bei Bedarf auszuführen. Makros können entweder mit einem Makrorekorder aufgezeichnet werden, welcher die Tastenanschläge und Mauseaktionen speichert, oder sie werden direkt im Visual Basic-Editor geschrieben. VBA-Makros können aber auch mehr sein als eine simple Befehlsabfolge. Es lassen sich zum Teil sehr komplexe und differenzierte Anwendungen ausführen, wie sie für ÖKO-BILLY erforderlich sind.

Die Makros einer Datei sind jedoch im Gegensatz zu den Tabellenblättern auf den ersten Blick nicht zu sehen, sondern werden zum Starten aktiv aufgerufen, automatisch im Hintergrund gestartet oder stehen über Schaltflächen zur Verfügung.

Beispiel für ein einfaches Makro:

```
Sub Dateiöffnen_einxls()  
Zeile10:  
    Application.ScreenUpdating = False  
    On Error GoTo Zeile20  
    Workbooks("EIN.XLS").Activate  
    Sheets("T0S").Select  
    Range("A2").Select  
    Application.ScreenUpdating = True  
    Exit Sub  
Zeile20:  
    Workbooks.Open FileName:=ThisWorkbook.Path + "\EIN.XLS",  
    Application.Run Macro:="Ansicht_GanzerBildschirm_An"  
    Sheets("T0S").Select  
    Range("A2").Select  
    Application.ScreenUpdating = True  
End Sub
```

Dieses Beispiel eines Makro ist eines von mehr als achtzig, welche sich in ÖKO-BILLY befinden und stammt von der ÖKO-BILLY Hauptseite (Makro wird hier leicht verändert wiedergegeben). Es öffnet die Datei "ein.xls", welche die Einführung in die Thematik Ökobilanzen enthält. Die erste Zeile enthält den Makronamen. "Sub" leitet das Makro (Subroutine) ein, "End Sub" beendet es. Zunächst wird die Aktualisierung der Bildschirmdarstellung ("ScreenUpdating") außer Kraft gesetzt und damit das Anzeigen jedes Zwischenschrittes. Das Ergebnis (der Aufruf der Datei) wird somit erst nach Durchlaufen des Makros präsentiert.

Der Hinweis, bei einem Fehler zu Zeile 20 zu gehen, hat den Hintergrund, daß zunächst nachgesehen wird, ob die Datei bereits geöffnet ist und dann nur ein Wechsel der Fenster erforderlich wäre. Es werden noch ein Tabellenblatt ("Sheet") und eine bestimmte Zelle ("Range") ausgewählt, zu denen nach dem Wechsel gesprungen werden soll. Wenn also die Datei bereits geöffnet war, dann kann das Makro schon verlassen werden.

Ist die Datei jedoch nicht geöffnet, bedeutet dies für Excel ein Fehler ("On Error ..."). In diesen Fall sind die folgenden Zeilen im Makro zu durchlaufen. Es wird mitgeteilt, wo sich die zu öffnende Datei befindet und wie sie heißt. Nun wird ein anderes Makro aufgerufen ("Run Macro"), welches die Bildschirmdarstellung ändern soll. Ziel ist eine Darstellung mit maximiertem Fenster unter Ausblenden der Symbolleisten. Anschließend wird noch gesagt, zu welcher Seite und zu welcher Zelle gesprungen werden soll. Mit dem Ende des Makros wird die Bildschirmdarstellung wieder aktualisiert. Entweder hat Excel die andere Datei eingeblendet oder sie geöffnet. In beiden Fällen wird sie nun auf dem Bildschirm präsentiert.

## 5.4 Systemvoraussetzungen

ÖKO-BILLY setzt keine besonderen Anforderungen an die Hardware und Software eines Personalcomputers (PC) voraus. Die Hardware-Voraussetzungen sind die gleichen, wie sie für das Microsoft Betriebssystem Windows 95 (und höher) gelten. Kann Windows 95

laufen, so läuft auch ÖKO-BILLY. Zu der Standardausstattung gehört neben dem Gehäuse, ein Monitor, eine Tastatur und eine Maus. Als Arbeitsspeicher gelten 16 MB als ausreichend. Ein schneller Prozessor der neuesten Generation ist nicht erforderlich.

ÖKO-BILLY ist nicht als eigenständige Anwendung konzipiert. Es erfordert eine übergeordnete Software (Microsoft Excel 97). Der Vorteil liegt darin, daß der Anwender auf eine bereits bekannte Benutzeroberfläche trifft und sich nicht mit neuen Befehlen vertraut machen muß. Der Nachteil ist, daß Excel 97 installiert sein muß. Da aber Windows 95 das Standardbetriebssystem der heutigen PCs und Excel 97 ein weit verbreitetes Tabellenkalkulationsprogramm ist, kann davon ausgegangen werden, daß die Hard- und Softwarevoraussetzungen in der Praxis keine Probleme bereiten.

## 5.5 Installation

Zur Installation werden alle dazugehörigen Dateien in ein beliebiges gemeinsames Verzeichnis kopiert. Dies sind die Excel-Dateien:

- ökobilly.xls
- ein.xls.
- vers.xls
- pap.xls
- dest.xls
- ku.xls

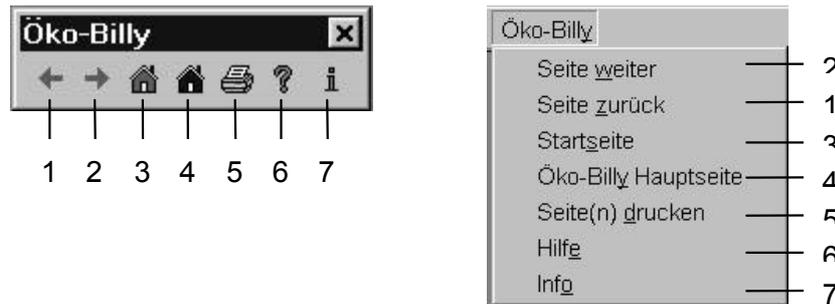
sowie die Hilfe Datei hilfe.htm

ÖKO-BILLY ist so konzipiert, daß in der Regel zunächst die Hauptdatei "ökobilly.xls" geöffnet wird. Über sie werden alle anderen Dateien aufgerufen. Diese lassen sich zwar auch unabhängig von ÖKO-BILLY öffnen. Es ist jedoch mit Schwierigkeiten zu rechnen, weil in den anderen Excel-Dateien auf Makros aus der Datei ökobilly.xls zurückgegriffen wird. Daher ist es erforderlich, daß die Datei ökobilly.xls geöffnet ist und somit deren Makros zur Verfügung stehen.

Für eine ausführliche Beschreibung aller Dateien siehe Anhang 1 ("Bereiche von ÖKO-BILLY").

## 5.6 Bedienung

Die Bedienung von ÖKO-BILLY ist denen anderer Microsoft Windows-Programme angelehnt und daher ohne große Schwierigkeiten zu verstehen. Es wurden ein eigenes Menü und eine eigene Symbolleiste erstellt. Sie haben beide die Bezeichnung ÖKO-BILLY und sind auch gleich strukturiert (Abb. 49, Tab. 40). Die Befehle befinden sich jeweils in der gleichen Reihenfolge. In der Symbolleiste sind sie durch ein Symbol wiedergegeben, im Menü durch Text. Im Gegensatz zu einem fest in der Menüleiste verankerten Menü kann eine Symbolleiste frei an jeder Stelle des Bildschirms plziert werden und so den persönlichen (Sicht)-Bedürfnissen angepaßt werden. Das Menü kann über die Tastatur und eine Maus bedient werden, die Symbolleiste nur über die Maus.



**Abb. 49:** Symbolleiste und Menü von ÖKO-BILLY

Tab. 40 zeigt die in ÖKO-BILLY zur Verfügung stehenden Befehle. Zusätzlich sind die Tastenkombinationen aufgeführt, mit denen die Befehle ebenfalls ausgeführt werden können.

**Tab. 40:** Übersicht über die Symbole, Befehle und Tastenkombinationen von ÖKO-BILLY

	Symbol in Symbolleiste	Bezeichnung im Menü	Tastenkombination
1		Seite zurück	<Strg>+<z>
2		Seite weiter	<Strg>+<w>
3		Startseite des Bereiches	<Strg>+<s>
4		ÖKO-BILLY Hauptseite	<Strg>+<o>
5		Seite(n) drucken	<Strg>+<p>
6		Hilfe	<Strg>+<h>
7		Info	-

Die Befehle "Seite weiter" und "Seite zurück" bewirken, daß in ÖKO-BILLY eine Seite weiter oder zurück gegangen wird. "Startseite" geht zur ersten Seite eines Bereiches (zum Beispiel Ökobilanz Papier). "ÖKO-BILLY Hauptseite" wechselt aus einem beliebigem Bereich zurück zu ÖKO-BILLY. "Seite(n) drucken" veranlaßt den Druck dieser Seite. "Hilfe" öffnet die ÖKO-BILLY eigene Hilfe-Datei und "Info" gibt den Namen des Programms, seines Autors sowie die Versionsnummer an. Tieferegehende Kenntnisse von Microsoft Excel sind aufgrund der zur Verfügung gestellten Bedienungsmöglichkeiten von ÖKO-BILLY somit nicht notwendig.

ÖKO-BILLY ist weitgehend gegen unbefugte Veränderungen gesichert. Arbeitsmappen und Blätter sind geschützt. Blätter können daher nicht gelöscht, verschoben, ausgeblendet, eingeblendet oder umbenannt werden. Es können auch keine neuen Blätter eingefügt werden. Innerhalb eines Blattes können keine ungewollten Änderungen an Tabellen und Diagrammen vorgenommen werden. Grafiken können zudem nicht gelöscht werden. Eine Dateneingabe ist nur in den Tabellenfeldern möglich, welche extra hierfür freigegeben sind. Hier wird die Schrift in blauer Farbe dargestellt (sonst schwarz).

Alle Excel-Dateien von ÖKO-BILLY sind mit Absicht nicht schreibgeschützt, um die Möglichkeit zu schaffen, eingegebene Daten zu übernehmen oder (autorisierte) Änderungen vornehmen zu können<sup>30</sup>. Soll dies nicht geschehen, so ist einmal die Funktion des automatischen Speicherns (Menü Extras) zu deaktivieren, ferner sollte auf das Abspeichern beim Schließen der Datei verzichtet werden. Es wird zudem empfohlen, von allen Dateien eine Sicherheitskopie zu erstellen. Dies gilt besonders für den schulischen Einsatz, da ein Aufheben der getroffenen Schutzmaßnahmen für einen sachkundigen Benutzer relativ leicht möglich ist.

## 5.7 Fehlermeldungen in ÖKO-BILLY

Wenn ÖKO-BILLY ordnungsgemäß installiert wurde, sind keine Fehlermeldungen zu erwarten, welche aufgrund von Beeinträchtigungen des Programmablaufs ausgegeben werden.

Die Eingabe von Benutzer-Daten ist ohne Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit. Es sind ohnehin nur zulässige Änderungen der in ÖKO-BILLY blau markierten Daten möglich. Weitergehende Veränderungen an Tabellenblättern und Makros sind nur unter Aufheben des Blattschutzes möglich, welcher unbefugte Änderungen verhindert. Werden dann allerdings fehlerhaft zum Beispiel Makros verändert, kann dies ÖKO-BILLY völlig funktionsunfähig werden lassen. Zwar sind alle Seiten in ÖKO-BILLY mit einem solchen Blattschutz versehen, dieser ist jedoch absichtlich nicht noch mit einem Paßwort versehen. Es soll dem Benutzer vorbehalten bleiben, bei Bedarf selbst ein eigenes Paßwort einzusetzen sowie autorisierte Änderungen vornehmen zu können.

Der Ausdruck "#DIV/0!" erscheint statt eines Ergebnisses, wenn eine Division durch Null versucht wurde (Nenner gleich Null).

## 5.8 Beschreibung von ÖKO-BILLY

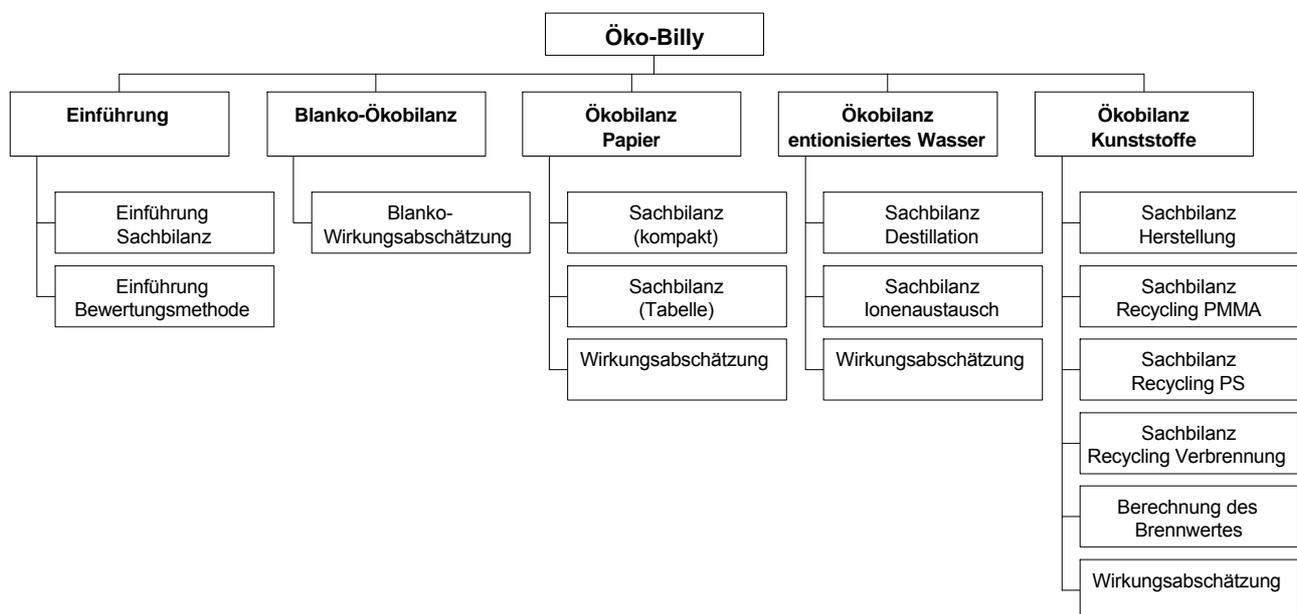
ÖKO-BILLY ist modular aus sechs Excel-Dateien aufgebaut. Im Mittelpunkt steht die Hauptdatei "ökobilly.xls", welche als Schaltstelle in ÖKO-BILLY dient. Über sie werden alle anderen Dateien geöffnet. Im einzelnen besteht ÖKO-BILLY aus folgenden Dateien (im folgenden als Bereiche bezeichnet):

---

<sup>30</sup> ÖKO-BILLY ist Freeware. Es wird kostenlos abgegeben und darf beliebig kopiert werden. Das Copyright ist jedoch geschützt. Es dürfen aber für den eigenen Gebrauch an den Daten, dem Layout, dem generellen Aufbau und den Makros Änderungen vorgenommen werden.

- ÖKO-BILLY Hauptdatei                      ökobilly.xls
- Einführung                                      ein.xls.
- Blanko-Ökobilanz                              vers.xls
- Ökobilanz Papier                              pap.xls
- Ökobilanz entionisiertes Wasser              dest.xls
- Ökobilanz Kunststoffe                      ku.xls
- Hilfe                                              hilfe.htm

Die Bereiche bestehen in der Regel aus mehreren einzelnen Seiten. Eine Übersicht über den Aufbau der Bereiche liefert Abb. 50.



**Abb. 50:** Aufbau von ÖKO-BILLY

Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Bereiche (einschließlich zahlreicher Abbildungen) findet sich in Anhang 1. Die Hintergrundberechnungen, welche in ÖKO-BILLY automatisch ausgeführt werden, sind in Anhang 2 aufgeführt.

## 5.9 Zusammenfassung des Abschnitts

Mit ÖKO-BILLY liegt ein Programm vor, welches für die Schule zum einen eine Einführung in die Thematik der Ökobilanz bietet, zum anderen auch eine leichte Auswertung der zu Grunde liegenden Schulversuche erlaubt.

ÖKO-BILLY ist modular aufgebaut. Für die Einführung, das Beispiel und die Auswertungen der Experimente liegt jeweils eine eigene Datei vor, welche bei Bedarf über das Hauptmenü geladen werden. Der Aufbau einer solchen Datei ist annähernd gleich. Einer je nach Bedarf mehr oder weniger umfassenden Sachbilanz folgt die Wirkungsabschätzung, welche auf der Methode der Umweltbelastungspunkte beruht.

Alle Input-Output-Daten sowie die Ökofaktoren können durch den Benutzer geändert werden. Auf diese Weise kann der Einfluß bestimmter Sachbilanzdaten auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung untersucht werden.

Mathematische Berechnungen in der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sind so transparent wie möglich gehalten, um jederzeit einen Einblick in die Abläufe zu haben. Über umfangreiche Makros und Zellformeln wurden Be- und Umrechnungen sowie das Kopieren von Zellinhalten automatisiert. Auch die Formeln und Makros können verändert und eigenen Bedürfnissen angepaßt werden.

Mit dem Programm ÖKO-BILLY sind die Voraussetzungen geschaffen, erstens das Thema Ökobilanzen experimentell im Chemieunterricht angehen zu können, weil die zumindest teilweise komplexen und umfassenden Berechnungen keinen Grund mehr darstellen, Ökobilanzen nicht zu behandeln.

Zweitens kann durch die computerunterstützte und somit beschleunigte Auswertung der Experimente dem engen zeitlichen Rahmen einer Schulstunde Rechnung getragen werden.

Drittens bedeutet der Einsatz des Computers als Medium auch heutzutage noch einen starken Motivationsfaktor, auf den im Unterricht nicht verzichtet werden sollte.



## 6 Zusammenfassung

### 6.1 Vorgehensweise und Ergebnisse

Im Zentrum dieser Arbeit stand die Umsetzung der Thematik Ökobilanzen für den Chemieunterricht an allgemeinbildenden Schulen. Wesentliches Ziel war es, Möglichkeiten zu finden, wie Ökobilanzen im Unterricht von Schülern selbst erstellt werden können. Hierbei galt es, zwei wesentliche Einflußfaktoren zu berücksichtigen: die fachlichen, sowie die didaktisch-methodischen Grundlagen.

#### Fachliche Grundlagen

Die fachlichen Grundlagen umfassen sowohl eine dem Chemieunterricht angepaßte Vorgehensweise, wie eine Ökobilanz zu erstellen ist, als auch die Auswahl einer für den Unterricht geeigneten Methode der Wirkungsabschätzung.

Ökobilanzen sind definiert als ein Verfahren zur Ermittlung der potentiellen Umweltbelastungen eines Produktes über dessen gesamten Lebensweg. Ein solcher Lebensweg besteht aus mehreren Abschnitten. Am Anfang steht die Rohstoffgewinnung, dann folgt die Herstellung des Produktes, darauf der Gebrauch/Verbrauch und schließlich die Entsorgung oder das Recycling.

Das Aufstellen einer Ökobilanz ist mehrstufig. Nach der Festlegung des Bilanzierungsziels sowie des Untersuchungsrahmens kann mit der Ermittlung und Erfassung der Input- und Output-Daten begonnen werden. Inputs sind die in das betrachtete System eingehenden, Outputs die ausgehenden Stoff- und Energieströme. Die Daten sind im Rahmen der Sachbilanz tabellarisch zu erfassen. Auf der Basis der Sachbilanz werden im nächsten Schritt der Wirkungsabschätzung ausgewählte potentielle Umweltbelastungen bestimmt. Hierzu ist eine Methode erforderlich, welche über ein Modell die Verknüpfung zwischen den Stoff- und Energieströmen der Sachbilanz einerseits und ihren potentiellen Auswirkungen in der Umwelt andererseits ermöglicht. Jede Methode für die Wirkungsabschätzung beinhaltet eine Reihe von Wirkungskategorien, welchen die Daten der Sachbilanz zugeordnet werden. Daraufhin erfolgt die Berechnung der Wirkungskategorie-Ergebnisse. Der Wirkungsabschätzung schließt sich die Auswertung an. Hier werden die signifikanten Parameter herausgearbeitet, welche für das Ergebnis der Wirkungsabschätzung bedeutend sind. Nach Prüfung auf Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz erfolgt ein abschließender Bericht. Der Ablauf einer Ökobilanzierung ist in den DIN EN ISO-Normen 14040 bis 14043 beschrieben.

Für den Chemieunterricht ist jedoch der obige stark gekürzt wiedergegebene Ablauf zu umfassend und zu schwierig. Daher wurde eine vereinfachte Checkliste erarbeitet, welche sowohl zur Planung als auch als Leitfaden zum Aufstellen einer vereinfachten Ökobilanz im Chemieunterricht dient. Ziel war es hierbei, sich zum einen auf die für den Unterricht in der Sekundarstufe II als notwendig angesehenen Inhalte zu beschränken, zum anderen dennoch alle erforderlichen ökobilanztypischen Komponenten (Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung) behandeln zu können.

Für die Wirkungsabschätzung ist, wie oben dargestellt, auch eine geeignete Methode erforderlich, welche für die Ermittlung der Umweltbelastungen auf der Grundlage der Sachbilanzdaten dient. Von mehreren existierenden Methoden wurde die der Umweltbelastungspunkte ausgewählt. Sie gilt als einfach und transparent, ist jedoch hinsichtlich

ihrer Ergebnisse durchaus vergleichbar mit anderen komplexeren Methoden, wie am Beispiel einer Ökobilanz für Bier gezeigt werden konnte.

Die Methode der Umweltbelastungspunkte umfaßt sechs Kategorien der Umweltbelastung, welchen die einzelnen Sachbilanz-Positionen zugeordnet werden können (Fläche, Abfall, Energie, Lärm, Luft- und Wasserbelastung). Basis für die Berechnung der Umweltbelastungen sind sogenannte Ökofaktoren. Sie sind ein Maß für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung. Diese Schädlichkeit wird über die ökologische Knappheit erfaßt. Darunter versteht man das Verhältnis zwischen der maximalen Belastbarkeit einer Umweltressource (z. B. Wasser) und der momentanen Belastung. Es gibt somit eine Grenzbelastung (kritischer Fluß) und eine aktuelle Belastung (Ist-Fluß). Mit Hilfe der Ökofaktoren kann eine beliebige Umwelteinwirkung beurteilt werden. Dazu wird diese mit ihrem Ökofaktor multipliziert. Das Ergebnis ist eine Umweltbelastungskennzahl (ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten, UBP), welche die Umweltbelastung ausdrückt.

Die vereinfachte Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz (dargestellt als Checkliste) sowie die Methode der Umweltbelastungspunkte bilden die fachliche Grundlage für die Behandlung der Thematik im Chemieunterricht.

### **Didaktisch-methodische Grundlagen**

Neben den fachlichen Grundlagen galt es auch, die didaktischen und methodischen Voraussetzungen zu erörtern.

Ziel einer Behandlung des Themas Ökobilanzen im Unterricht kann es nicht sein, den Schülern ein umfassendes und zugleich detailliertes Fachwissen zu vermitteln. Statt dessen ist anzustreben, ein grundlegendes Verständnis zu erreichen, d.h., aufzuzeigen, was eine Ökobilanz ist, wie sie erstellt wird und wo die Möglichkeiten und Grenzen des Instruments liegen.

Wie die didaktische Analyse nach KLAFKI zeigt, sollte die Thematik vor allem aufgrund ihrer gegenwärtigen und zukünftigen Bedeutung für die Schüler im Chemieunterricht einen Platz finden. Nach KLAFKI ist die Umweltzerstörung und das daraus resultierende Problem der Verantwortung sowie der Kontrolle technischer Entwicklung eines der gegenwärtigen globalen und existentiellen Schlüsselprobleme. Ziel des Unterrichts muß es sein, den Schülern auf diese "*Umweltfrage*" - wie KLAFKI es nennt - Antworten zu geben. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist die Fähigkeit zum vernetzenden Denken ("*Zusammenhangsdenken*"). Weil Gesellschaft, Technik, Politik, Wirtschaft und Umwelt miteinander verbunden sind, seien die dringenden ökologischen, ökonomischen und sozialen Probleme nur zu lösen, wenn deren Wirkungen und Rückwirkungen untereinander verstanden werden. Als eines von wenigen Schulthemen ist die Thematik Ökobilanzen in der Lage, die Verknüpfung von technischem Produktionsprozeß und die hierdurch verursachten Umweltbelastungen aufzuzeigen. In der Auseinandersetzung mit dem Produktlebensweg sowie den anfallenden Stoff- und Energieströmen wird zugleich auch das vernetzende Denken geschult.

Aufgrund der Komplexität der Thematik kann ihre Behandlung im Unterricht nur dann erfolgen, wenn eine umfassende didaktische Reduktion vorgenommen wird. Von den verschiedenen Möglichkeiten des auch als Elementarisierung bezeichneten Schritts ist die durch Vernachlässigung von zunächst unrelevanten Nebensächlichkeiten in diesem Zusammenhang die wichtigste. Das betrifft zum einen die Produktauswahl und die betrachteten Abschnitte des Lebensweges. Für den Sachunterricht der Primarstufe sollte man sich auf bekannte faßbare Gegenstände aus der Lebensumwelt beschränken. Es

sollten ausschließlich qualitative oder halbquantitative Betrachtungen vorgenommen werden. Im Chemieunterricht der Sekundarstufe I können weitere Lebenswegabschnitte wie das Recycling hinzukommen; in der gymnasialen Oberstufe ist schließlich die Behandlung eines vollständigen Lebensweges möglich. In den höheren Schulstufen können zunehmend auch quantitative Betrachtungen vorgenommen werden. In der Sekundarstufe I kann eine Sachbilanz aufgestellt, in der Sekundarstufe II zudem eine Wirkungsabschätzung zur Ermittlung der Umweltbelastungen berechnet werden.

Aufgrund umfassender Elementarisierung kann die Thematik Ökobilanzen im Sinne einer vereinfachten ökologischen Betrachtung bereits im Sachunterricht der Primarstufe behandelt werden. Im Rahmenplan Grundschule des Landes Hessen bietet sich dafür das Aufgabengebiet Umwelterziehung an, welches das Ziel hat, die Grundschüler mit ihrer Lebensumwelt vertraut zu machen sowie das umweltgerechte Handeln und Denken zu fördern. Methodische Möglichkeiten sind eine unter ökologischen Gesichtspunkten vorgenommene Betrachtung der Schülermäppchen, der Schulranzen oder der Abfalleimer in der Klasse. Die Ergebnisse können als Balkendiagramme ausgewertet werden.

Auch im Chemieunterricht der Sekundarstufe I kann die Thematik Ökobilanzen vereinfacht behandelt werden. Nach dem hessischen Rahmenplan bietet sich hierfür die Kategorie Umwelt an, in der die Eingriffe des Menschen in die Umwelt und die daraus resultierenden Auswirkungen thematisiert werden. Innerhalb der Sekundarstufe I sollte die Thematik Ökobilanzen in der Klasse 10 (2. Halbjahr) angesetzt werden (in den Jahrgängen 8 und 9 sollten die zum Verständnis notwendigen Grundlagen erarbeitet sein). Das für die 10. Klasse vorgesehene Rahmenthema "Werkstoffe und Wertstoffe" beinhaltet die Herstellung und das Recycling verschiedener Werkstoffe wie Kunststoffe oder Metalle. Im Zusammenhang mit der Frage des Energieeinsatzes und der Emissionen bei der Herstellung sowie dem Recycling verschiedener Werkstoffe kann auch die Thematik Ökobilanzen inhaltlich gut eingebunden werden. Es können beispielsweise einfache Schulexperimente zum Recycling von Tetrapacks durchgeführt und die Ergebnisse halbquantitativ mit Literaturdaten verglichen werden. Eine weitere Möglichkeit ist das Aufstellen eines "Umweltbarometers", bei dem die Schüler unterschiedliche Verpackungen entsprechend ihren Umwelteigenschaften unter Zuhilfenahme von Ergebnissen aus Ökobilanzen einordnen.

Im Chemieunterricht der Sekundarstufe II kann die Thematik besonders gut eingesetzt werden. Zwar gibt es - wie gezeigt - auch für die unteren Jahrgangsstufen Möglichkeiten, sich der Thematik zu nähern, jedoch ist eine umfassende Betrachtung erst in der gymnasialen Oberstufe möglich, da hier sowohl die notwendigen fachlichen Voraussetzungen als auch beispielsweise die Fähigkeit zum Denken in Modellen und zur Abstraktion vorhanden sind.

Von den angebotenen Inhaltsbereichen weist nach den hessischen Kursstrukturplänen für das Fach Chemie der Bereich der Kohlenstoffchemie entsprechend seinen erzieherischen Zielsetzungen mehrere Anknüpfungspunkte zu Ökobilanzen auf:

- Ökobilanzen gewähren durch ihre ganzheitliche Betrachtungsweise Einsichten in chemische Produktionsabläufe in einer Detailtiefe, wie sie sonst kaum möglich sind. Über diesen ökologischen Aspekt hinaus stellen der Verbrauch an Ressourcen und an Energie sowie die Entsorgung von Abfällen aber auch betriebliche oder private Kosten dar, welche beispielsweise durch alternative Herstellungs- oder Recyclingverfahren eventuell gesenkt werden können.

- Ökobilanzen zeigen auf, in welchen Mengen Ressourcen entlang des Lebensweges eingesetzt werden. In der Regel ist dies für den Verbraucher (und somit auch dem Schüler) nicht zu erkennen. In der Auseinandersetzung mit der Thematik Ökobilanzen wird die persönliche Verantwortung gestärkt, weil die Auswirkungen des eigenen Handelns erkennbar werden.
- Mittels Ökobilanzierung wird deutlich, wo Abfälle anfallen und wie diese entsorgt oder wiederverwertet werden. Alternative Entsorgungswege können daraufhin mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert werden.

Für die methodische Umsetzung in der Sekundarstufe II wurde ein experimenteller und ein computerunterstützter Zugang entwickelt.

### **Der experimentelle Zugang**

Es wurde in dieser Arbeit eine experimentelle Herangehensweise gewählt, um erstens dem experimentellen Charakter des Faches und der Naturwissenschaft Chemie Rechnung zu tragen; zweitens, um den Lerneffekt bei den Schülern aufgrund eigener manueller Tätigkeiten zu fördern und drittens, um die für die Ökobilanz erforderlichen Daten in der Praxis erheben zu können, ohne auf Literaturdaten zurückgreifen zu müssen.

Die grundlegenden experimentellen Aspekte sind bereits vielfach in Schulversuchen behandelt worden. Neu ist jedoch die Ausrichtung auf die Thematik Ökobilanz und somit auf das Ziel, brauchbare Sachbilanzdaten in möglichst kurzer Zeit unter möglichst einfachen schulexperimentellen Bedingungen zu erhalten.

Ausgangspunkt für die Konzeption "Ökobilanzen im Chemieunterricht" sind zwei Experimentalblöcke zur Herstellung von entionisiertem Wasser (Ökobilanz entionisiertes Wasser) sowie zur Darstellung und zum Recycling von Kunststoffen (Ökobilanz Kunststoffe). Beide Blöcke sind so konzipiert, daß sie von den Schülern selbständig durchgeführt werden können. Ziel der Versuche ist die Bereitstellung von Daten zu Stoff- und Energieströmen, auf deren Basis dann mit Hilfe des Programms ÖKO-BILLY eine vereinfachte Ökobilanz entsprechend der Checkliste und der Methode der Umweltbelastungspunkte erstellt werden kann.

Der erste Block beinhaltet die Experimente zur Destillation von Wasser sowie zum Ionenaustausch. Beides sind Verfahren zur Herstellung von entionisiertem Wasser. Von dem gesamten Lebensweg des destillierten Wassers wird also lediglich die Herstellung untersucht. Die Förderung des Wassers (Rohstoffgewinnung) sowie sein Verbrauch und die Entsorgung werden nicht betrachtet, da sie im ersten Fall experimentell nicht zugänglich ist, im zweiten Fall keine Umweltbelastungen auftreten.

In der Wirkungsabschätzung werden aufgrund der Methodik für die Destillation nur der Verbrauch an elektrischer Energie sowie für den Ionenaustausch die Freisetzung von Chlorid- und Sulfationen beurteilt. Diese stammen aus der Regeneration des Kationenaustauschers mit Salzsäure oder Schwefelsäure. Die bei der Regeneration des Anionenaustauschers abgegebenen Natriumionen werden innerhalb der Methode nicht als Umweltbelastung angesehen. Als Ergebnis der Wirkungsabschätzung zeigt sich, daß die Destillation um ein Vielfaches umweltbelastender ist als der Ionenaustausch. Bei der Regeneration des Kationenaustauschers ist der Einsatz von Salzsäure gegenüber Schwefelsäure vorzuziehen.

Der zweite Block umfaßt Experimente zur Darstellung und zum Recycling von Kunststoffen. Es werden zum einen Schulversuche beschrieben, mit denen Polymethacryl-

säuremethylester (PMMA) und Polystyrol (PS) radikalisch (letzteres auch kationisch) dargestellt werden können. Zum anderen werden Versuche zu einem rohstofflichen Recycling (PMMA), zu einem werkstofflichen Recycling (PS) und einem energetischen Recycling (PMMA, PS) gezeigt. Die Rohstoffgewinnung wird nicht betrachtet, da sie experimentell nicht zugänglich ist. Die Nutzung wird ebenfalls ausgeklammert, da hier keine Umweltbelastungen zu erwarten sind.

Als Ergebnisse der vereinfachten Ökobilanz auf Basis der schulexperimentellen Daten kann gesagt werden, daß sich für die Darstellung von Kunststoffen die Polymerisation von Methacrylsäuremethylester mit Dibenzoylperoxid sowie von Styrol mit Eisen(III)-chlorid am günstigsten erwiesen hat. Beste Recyclingvariante ist die Verbrennung der Kunststoffe.

Bei der Betrachtung solcher vereinfachter Ökobilanzen muß beachtet werden, daß diese auf die schulischen Bedingungen ausgerichtet sind. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder Erfassung der tatsächlichen technischen Bedingungen. Ziel war es statt dessen, mittels experimentell gewonnener Daten beispielhaft die Erstellung einer Ökobilanz im Unterricht zu demonstrieren.

Ein Vergleich der schulischen und industriellen Input-Output-Daten zeigt zum Teil gravierende Abweichungen. Die Gründe liegen in unterschiedlichen Bilanzierungszielen mit oftmals anderen Systemgrenzen. Diese Einschränkungen treffen besonders für die Gegenüberstellung der Verfahren zur Darstellung und Recycling von Kunststoffen zu. Die schulexperimentellen Verfahren der Destillation und des Ionenaustausches zeigen aufgrund gleicher beziehungsweise ähnlicher bestimmender physikalischer Konstanten (Verdampfungsenthalpie von Wasser, Austauschkapazität des Harzes) eine bessere Vergleichbarkeit mit industriellen Daten.

### **Der computerunterstützte Zugang**

Die Auswertung der beiden Experimentalblöcke erfolgt mit Hilfe des Programms ÖKO-BILLY - einem in dieser Arbeit erstellten Lern- und Auswertungsprogramm für die schulische Behandlung des Themas Ökobilanzen. Es basiert auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 97 und ist durch eine Vielzahl von Makros (gespeicherte Folge von Befehlen) so weit automatisiert, daß es von Schülern problemlos selbst bedient werden kann.

ÖKO-BILLY ist somit ein Programm, welches zu einer vertiefenden Behandlung der Thematik Ökobilanzen im Chemieunterricht der Sekundarstufe II verhilft. Schwerpunkt des Programms ist die Auswertung von Schulversuchen mit dem Ziel, eine vereinfachte Ökobilanz zu erstellen. Vorteil eines solchen Auswertungsprogramms ist eine schnelle und fehlerfreie Berechnung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung.

ÖKO-BILLY besteht aus mehreren, voneinander unabhängigen Bereichen. Diese Bereiche haben jeweils spezifische Aufgaben. Die "ÖKO-BILLY Hauptdatei" ist der Ausgangspunkt von ÖKO-BILLY, über den alle anderen Bereiche aufgerufen werden können.

- In der Einführung wird am Beispiel einer brennenden Kerze gezeigt, welche Input-Output-Faktoren für eine Sachbilanz anfallen können und welche davon letztlich für die Wirkungsabschätzung ausschlaggebend sind. Die Mengen der Inputs Paraffin, Baumwolldocht und Luftsauerstoff können variiert werden, um so ihre Auswirkung auf die Outputs Kohlendioxid-, Wasser- und Wärmeabgabe zu zeigen. Ferner wird die Methode der Umweltbelastungspunkte vorgestellt. Hierbei können die Input-Output-Daten des Beispiels zum Auswerten geladen

werden. Die zentralen Ökofaktoren können (wie in jedem ÖKO-BILLY Bereich) herauf- oder heruntergesetzt und so die Schwerpunkte bei der Beurteilung der Umweltauswirkungen verändert werden.

- Der Bereich "Blanko-Wirkungsabschätzung" ermöglicht es, beliebige Umwelteinwirkungen nach der Methode der Umweltbelastungspunkte zu erfassen, um daraufhin eine Wirkungsabschätzung aufstellen zu können. Somit kann jeder beliebige experimentelle Versuch nach dieser Methode schnell und unproblematisch ausgewertet werden.
- In "Ökobilanz Papier" sind die Sachbilanz-Daten aus einer Modell-Ökobilanz zur Papier-Herstellung abrufbar, auf deren Basis, auch wiederum nach der Methode der Umweltbelastungspunkte, eine Ökobilanz erstellt werden kann.
- Bei "Ökobilanz entionisiertes Wasser" und "Ökobilanz Kunststoffe" handelt es sich um zwei zentrale Bereiche in ÖKO-BILLY, welche zur Auswertung der entsprechenden Schulversuche dienen. Ziel ist es, mittels der durch die Versuche gewonnenen Daten eine Ökobilanz zu den jeweiligen Produkten (entionisiertes Wasser sowie Polystyrol und Polymethacrylsäuremethylester) aufzustellen. Dies kann unter Anleitung durch die Schüler selbständig geschehen.

Die beiden Experimentalblöcke und das Programm ÖKO-BILLY können auf unterschiedliche Weise methodisch miteinander verknüpft werden. Zum einen lassen sie sich zu einer Gesamtkonzeption zusammenfügen, in der beide Experimentblöcke und ÖKO-BILLY (mit Einführung, Beispiel und Auswertung) kombiniert sind. Zum anderen sind zwei Teilkonzeptionen möglich, wobei entweder ein ausgewählter Experimentalblock durchgeführt und in ÖKO-BILLY ausgewertet oder nur theoretisch in gearbeitet wird. Welches Konzept letztlich herangezogen wird, hängt vom zeitlichen Rahmen, den Vorkenntnissen und Fähigkeiten der Lerngruppe sowie den technischen Möglichkeiten (chemische Geräte, Computer) ab. Eine Anpassung der Konzeption an unterschiedliche Rahmenbedingungen ist ohne weiteres möglich.

## 6.2 Schlußfolgerungen und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellte Herangehensweise an die Thematik Ökobilanzen ist eine geeignete Grundlage für die praktische Behandlung im Chemieunterricht. Die Kombination aus experimenteller Datenbasis und computerunterstützter Auswertung ermöglicht die ökologische Betrachtung auch aufwendigerer Schulexperimente in einem akzeptablen Zeitrahmen.

Über einen derartigen Zugang können auch andere Sachverhalte unter dem Gesichtspunkt der Ökobilanz betrachtet werden, beispielsweise die Stoff- und Energieströme im Klassenzimmer, in der Schule insgesamt oder zu Hause im Haushalt. Das Programm ÖKO-BILLY ist so flexibel, daß es auch für solche Beispiele zur Auswertung herangezogen werden kann.

Abschließend bleibt festzuhalten, daß der Themenbereich Ökobilanzierung aufgrund seiner Vielfalt bezüglich Methodik und Beispiele auch weiterhin im Blickpunkt fachdidaktischer Forschung stehen sollte.

## Literaturverzeichnis

- [1] SCHALTEGGER, S.; KUBAT, R.: Das Handwörterbuch der Ökobilanzierung, 2. Auflage. Wirtschaftswissenschaftliches Zentrum der Universität Basel, Basel 1995
- [2] Umweltrecht. 8. Auflage. Beck, 1994
- [3] BLIEFERT, C.: Umweltchemie. VCH, Weinheim 1994
- [4] MEYERS GROSSES TASCHENLEXIKON. 2. Auflage. BI-Taschenbuchverlag, Mannheim 1987
- [5] KLÖPFFER, W.: Die Bedeutung der Persistenz von Stoffen für eine nachhaltige Stoffpolitik. Vortrag anlässlich des Seminars der Hessischen Landesanstalt für Umwelt: Stoffbezogene Umweltplanung – Nachhaltige Stoffpolitik. RPU Frankfurt/Main, 10.11.1998
- [6] FREY, O.: Arten, Mengen und Zusammensetzung von Elektro-/Elektronikschrott. In: TILTMANN, K. O.; SCHÜREN, A. (Hrsg.): Recyclingpraxis Elektronik. TÜV Rheinland, Köln 1984
- [7] FRISCHE, R.; ESSER, G.; SCHÖNBORN, W.; KLÖPFFER, W.: Criteria for Assessing the Environmental Behavior of Chemicals: Selection and Preliminary Quantification. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 6 (1982) S. 283 - 293
- [8] CORINO, C.: Ökobilanzen. Entwurf und Beurteilung einer allgemeinen Regelung. Band 19 (Umweltrechtliche Studien). Werner, Düsseldorf 1995
- [9] SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC): Guidelines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice'. From the workshop, held at Sesimbra, Portugal, 31 March-3 April 1993. Pensacola 1993
- [10] SCHMIDT, A.: Ökobilanzen: Darstellung des Diskussionsstandes und Bewertung des Instrumentes bezüglich seiner Potentiale zur Entschärfung des Umweltproblems. Diplom-Arbeit, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Technische Universität Berlin. Berlin 1993
- [11] BECK, M. (Hrsg.): Ökobilanzierung im betrieblichen Management, 1. Auflage. Vogel, Würzburg 1993
- [12] WEINBRENNER, P.: Joghurt ist nicht gleich Joghurt - Die Produktlinienanalyse als Entscheidungshilfe für ökologisches Verbraucherverhalten. Anleitung zur selbständigen Durchführung und Auswertung von Produktlinienanalysen. Nr. 48 (Schriften zur Didaktik und Methodik der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Bielefeld. Bielefeld, o. Jahr
- [13] BUNDESUMWELTMINISTERIUM, UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Handbuch Umweltcontrolling. Vahlen, München 1995
- [14] HULPKE, H. (Hrsg.): Römp Lexikon Umwelt. 9. Auflage. Thieme, Stuttgart 1993
- [15] Brockhaus Naturwissenschaften und Technik. Brockhaus, Wiesbaden 1983
- [16] KOß, V.: Umweltchemie - Eine Einführung für Studium und Praxis. Springer, Berlin/Heidelberg 1997

- [17] GROTZ, S.; SCHOLL, G.: Application of LCA in German Industry. *Int. J. LCA* 1 (1996) 4 S. 226-230
- [18] NEITZEL, H.: Application of Life Cycle Assessment in Environmental Labelling. *Int. J. LCA* 2 (1997) 4 S. 241-249
- [19] DOLD, G.: Computerunterstützung der produktbezogenen Ökobilanzierung. Gabler, Wiesbaden 1996
- [20] HEINE, G.: Umweltbezogenes Recht im Mittelalter. In: HERRMANN, B. (Hrsg.): Umwelt in der Geschichte: Beiträge zur Umweltgeschichte. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1989
- [21] VON CARLOWITZ, H. C.: Sylvicultura Oeconomica: Anweisung zur wilden Baumzucht. Leipzig 1713
- [22] VIGON, B. W. (et al.): Life Cycle Assessment. Inventory Guidelines and Principles. CRC Press (Lewis Publishers), Boca Raton 1994
- [23] KLÖPFER, W.; RENNER, I.: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. In: UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung, Texte 23/95. Berlin 1995
- [24] BOUSTEAD, I.: LCA - How it Came About - The Beginning in the U.K.. *Int. J. LCA* 1 (1996) 3 S. 147-150
- [25] OBERBACHER, B.; NIKODEM, H.; KLÖPFER, W.: LCA - How it came about - An Early Systems Analysis of Packaging for Liquids. *Int. J. LCA* 1 (1996) 2 S. 62-65
- [26] KLÖPFER, W.: Life Cycle Assessment: From the Beginning to the Current State. *Environ. Sci. & Pollut. Res.* 4 (1997) 4 S. 223-227
- [27] MEADOWS, D. [et al.]: Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Dt. Verl.-Anst., Stuttgart 1972
- [28] HUNT, R. G.; FRANKLIN, W. E.: LCA - How it came about it - Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *Int. J. LCA* 1 (1996) 1 S. 4-7
- [29] RICE, G.; CLIFT, R.; BURNS, R.: LCA Software Review - Comparison of Currently Available European LCA Software. *Int. J. LCA* 2 (1997) 1 S. 53-59
- [30] MÜLLER-WENK, R.: Die ökologische Buchhaltung: Ein Informations- und Steuerungssystem für umweltkonforme Unternehmenspolitik. 1. Auflage. Campus, Frankfurt 1978
- [31] KAIMER, M.; SCHADE, D.: Ökobilanzen - Umweltorientierte Informations- und Bewertungsinstrumente - Stand der Diskussion. Arbeitsbericht Nr. 4. Akademie für Technikfolgenabschätzung, Stuttgart 1994
- [32] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL, Hrsg.): Oekobilanz von Packstoffen. Stand 1990. Schriftenreihe Umwelt Nr. 132. Bern 1991. (Neufassung der Studie von 1984)

- [33] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL, Hrsg.): Ökoinventare für Verpackungen. Band I und II. Schriftenreihe Umwelt Nr. 250/I und 250/II. 2. Auflage. Bern 1998
- [34] FINK, P.: The Roots of LCA in Switzerland - Continuous Learning by Doing. *Int. J. LCA* 2 (1997) 3 S. 131-134
- [35] PFEIFER, R. P.: Comparison Between Filament Lamps and Compact Fluorescent Lamps. *Int. J. LCA* 1 (1996) 1 S. 8-14
- [36] HEIJUNGS, R. (et al.): Environmental Life Cycle Assessment of Products. Teil I (Guide) und II (Background). Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden 1992 (Englische Version 1993)
- [37] GABATHULER, H.: The CML Story: How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA. *Int. J. LCA* 2 (1997) 4 S. 187-194
- [38] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Ökologische Bilanz von Rapsöl beziehungsweise Rapsölmethylester als Ersatz von Dieselmethylester (Ökobilanz Rapsöl). Texte 4/93. Berlin 1993
- [39] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Produktlinienanalyse Waschen und Waschmittel. Texte 1/97. Berlin 1997
- [40] MARSMANN, M.; KLÜPPEL, H.-J.; SAUR, K.: Foreword: Development of Life Cycle Thinking. *Int. J. LCA* 2 (1997) 1 S. 2-4
- [41] REINHARDT, G. A.: Zur Ökobilanz von Verpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen. *PdN-Ch* (1996) 6 S. 8-15
- [42] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) / DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen (EN ISO 14040:1997). Deutsche Fassung 1997
- [43] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) / DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (EN ISO 14041:1998). Deutsche Fassung 1998
- [44] TODD, J. A.: Streamlining. In: CURRAN, M. A. (et al.): Environmental Life-Cycle Assessment. McGraw-Hill, New York 1996
- [45] SAUR, K.: Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. LCA* 2 (1997) 2 S. 66-70
- [46] Comité Européen de Normalisation (CEN) / Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung (EN ISO 14042:2000). Deutsche Fassung 2000
- [47] HOFSTETTER, P.; BRAUNSCHWEIG, A.: Bewertungsmethoden in Ökobilanzen - ein Überblick. *GAIA* 3 (1994) 4 S. 227
- [48] BÖHLER, A.; KOTTMANN, H.: Ökobilanzen - Beurteilung von Bewertungsmethoden. *UWSF-Z.Umweltchem.Ökotox* 8 (1996) 2 S. 107
- [49] POWELL, J. C.; PEARCE, D. W.; CRAIGHILL, A. L.: Approaches to Valuation in LCA Impact Assessment. *Int. J. LCA* 2 (1997) 1 S. 11-15

- [50] SEPPÄLÄ, J.; HÄMÄLÄINEN, R. P.: On the Meaning of the Distance-to-Target Weighting Method and Normalization in Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. LCA* **6** (2001) 4 S. 211-218
- [51] VOLKWEIN, S., KLÖPFFER, W.: The Valuation Step within LCA. Part I: General principles. *Int. J. LCA* **1** (1996) 1 S. 36-39
- [52] UDO DE HAAS, H. A. (Hrsg.): Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment. SETAC Europe, Brussels 1996
- [53] OWENS, J. W.: LCA Impact Assessment Categories. Technical Feasibility and Accuracy. *Int. J. LCA* **1** (1996) 3 S. 151-158
- [54] FINNVEDEN, G.: Valuation Methods Within LCA - Where are the Values?. *Int. J. LCA* **2** (1997) 3 S. 163-169
- [55] VOLKWEIN, S.; GIHR, R.; KLÖPFFER, W.: The Valuation Step Within LCA. Part II: A Formalized Method of Prioritization by Expert Panels. *Int. J. LCA* **1** (1996) 4 S. 182-192
- [56] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) / DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Auswertung (EN ISO 14043:2000). Deutsche Fassung 2000
- [57] SAUR, K.: Life Cycle Interpretation - A Brand New Perspective?. *Int. J. LCA* **2** (1997) 1 S. 8-10
- [58] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden (VDI 4600). Beuth Verlag, Berlin 1997
- [59] FRITSCH, U. R.; JENSEIT, W.; HOCHFELD, C.: Methodikfragen bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA). Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens Nr. 104 01 123. Öko-Institut, Darmstadt 1999
- [60] FINNVEDEN, G.; LINDFORS, L.-G.: Data Quality of Life Cycle Inventory Data - Rules of Thumb. *Int. J. LCA* **3** (1998) 2 S. 65-66
- [61] DERENNE, B.: Life Cycle Analysis - Usefulness and Limitations. *Ecodecision* (1995) Spring S. 54-56
- [62] POHL, C. (et al.): Imprecision and Uncertainty in LCA. In: SCHALTEGGER, S. (et al.): Life Cycle Assessment (LCA) - Quo vadis?. Birkhäuser, Basel 1996
- [63] KLÖPFFER, W.: Peer (expert) Review in LCA According to SETAC and ISO 14040; *Int. J. LCA* **2** (1997) 4 S. 183-184
- [64] KENNEDY, D. J.; MONTGOMERY, D. C.; ROLLIER, D. A.; KEATS, J. B.: Data Quality. *Int. J. LCA* **2** (1997) 4 S. 229-239
- [65] COULON, R.; CAMOBRECO, V.; TEULON, H.; BESNAINOU, J.: Data Quality and Uncertainty in LCI. *Int. J. LCA* **2** (1997) 3 S. 178-182
- [66] NASH, J.; STOUGHTON, M.: Learning to Live with Life Cycle Assessment. *Environ. Sci. Technol.* **28** (1994) 5 S. 236A-237A
- [67] HULPKE, H.; MARSMANN, M.: Ökobilanzen und Ökovergleiche. *Nachr. Chem. Tech. Lab.* **42** (1994) 1 S. 11-27

- [68] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Ökobilanzen für Produkte: Bedeutung - Sachverstand – Perspektiven. Texte 38/92. Berlin 1992
- [69] ARNOLD, F.: Life Cycle doesn't work. *The Environmental Forum* **10** (1993) 5 (Sept.-Oct.) S. 18-23
- [70] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL, Hrsg.): Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 133. Bern 1990
- [71] BRAUNSCHWEIG, A.; MÜLLER-WENK, R.: Ökobilanzen für Unternehmungen: Eine Wegleitung für die Praxis. Haupt, Stuttgart 1993
- [72] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL, Hrsg.): Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997. Bern 1998
- [73] GIEGRICH, J. (et al.): Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen: Evaluation von Bewertungsmethoden, Perspektiven. In: UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bilanzbewertung. Texte 23/95. Berlin 1995
- [74] VON BARATTA, M.: Der Fischer Weltalmanach 2000 - Zahlen, Daten, Fakten. Fischer, Frankfurt 1999
- [75] BRAUNSCHWEIG, A.; FÖRSTER, R.; HOFSTETTER, P.; MÜLLER-WENK, R.: Evaluation und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden für Ökobilanzen - Erste Ergebnisse, Institut für Wirtschaft und Ökologie. Hochschule St. Gallen. St. Gallen 1994
- [76] PETER, D.: Case Study 'Feldschlösschen'. In: SCHALTEGGER, S. (et al.): Life Cycle Assessment (LCA) - Quo vadis?. Birkhäuser, Basel 1996
- [77] FALBE, J.; REGITZ, M. (Hrsg.): Römpp Chemie Lexikon. 9. Auflage. Thieme, Stuttgart 1989
- [78] KLÖPFER, W.: Allocation Rule for Open-Loop Recycling in Life Cycle Assessment - A Review. *Int. J. LCA* **1** (1996) 1 S. 27-31
- [79] EKVALL, T.; TILLMAN, A.-M.: Open-Loop Recycling: Criteria for Allocation Procedures. *Int. J. LCA* **2** (1997) 3 S. 155-162
- [80] HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; UDO DE HAES, H. A.; VAN DEN BERG, N. W.; DUTILH, C. E.: Life Cycle Assessment - What It Is And How To Do It. UNEP, Paris 1996
- [81] GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; VAN OERS, L.; VAN DE MEENT, D.; VERMEIRE, T.; RIKKEN, M.: LCA Impact Assessment of Toxic Releases: Generic modelling of fate, exposure and effect for ecosystems and human beings with data for about 100 chemicals. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden 1996
- [82] EILKS, I.; KLINKEBIEL, G.: Biodiesel - Ökobilanzen im Chemieunterricht. *NiU-Chemie* **9** (1998) 45 S. 32-33
- [83] MESCHENMOSER, H.: Ökobilanz für den Möbelbau - Umweltbildung in der handwerklichen Berufsausbildung. *a+I/Technik* **17** (1995) S. 27-31

- [84] TEICHERT, V.: Ökobilanzen in der betrieblichen Praxis. *a+I/Wirtschaft* 11 (1993) S. 42-45
- [85] FLEISCHER, G.: Aus dem Leben einer Milchtüte - Die Bilanz des Abfalls, Studieneinheit 10. Aus der Reihe: Dtsch. Inst. f. Fernstudienforschung (Hrsg.): Funkkolleg Technik - einschätzen, beurteilen, bewerten. Beltz Quadriga Verlag, Tübingen 1994
- [86] BADER, H. J.; STEINER, D.: Die Lehrpläne der Bundesländer Deutschlands für das Unterrichtsfach Chemie an Gymnasien - Eine Übersicht. Palm & Enke, Erlangen/Jena 1994
- [87] KLAFKI, W.: Die bildungstheoretische Didaktik im Rahmen kritisch-konstruktiver Erziehungswissenschaft. Oder: Zur Neufassung der Didaktischen Analyse. In: GUDJONS, H.; WINKEL, R.: Didaktische Theorien. Bergmann und Helbig Verlag, Hamburg 1997
- [88] PFEIFER, P.; HÄUSLER, K.; LUTZ, B. (HRSG.): Konkrete Fachdidaktik. R. Oldenbourg Verlag, München 1992
- [89] KLAFKI, W.: Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik - zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik. 5. Auflage. Beltz, Weinheim 1996
- [90] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Ökobilanz für Getränkeverpackungen (Hauptteil). Texte 37/00. Berlin 2000
- [91] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Ökobilanzen für graphische Papiere. Texte 22/00. Berlin 2000
- [92] BAUMERT, J.; LEHMANN, R.: TIMSS - Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich - Deskriptive Befunde. Leske+Budrich, Opladen 1997
- [93] DEUTSCHES PISA-KONSORTIUM: PISA 2000 - Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich. Leske+Budrich, Opladen 2001
- [94] OSSIMITZ, G.: Entwicklung systemischen Denkens. Profil Verlag, München 2000
- [95] VESTER, F.: Leitmotiv für ein vernetztes Denken. 6. Auflage. Wilhelm Heyne Verlag, München 1997
- [96] V. HAUFF (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft - Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven 1987
- [97] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.): Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro - Dokumente - Agenda 21. Berlin 1997
- [98] R. KYBURZ-GRABER; D. HÖGGER; A. WYRSCH: Sozio-ökologische Umweltbildung in der Praxis - Hindernisse, Bedingungen, Potentiale. Schlußbericht zum Forschungsprojekt "Bildung für eine nachhaltige Schweiz" (1996 - 1999). Universität Zürich, Abt. Höheres Lehramt Mittelschulen, Zürich 2000
- [99] HESSISCHES KULTUSMINISTERIUM (Hrsg.): Rahmenplan Grundschule. 1. Auflage. Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt 1995

- [100] MITZLAFF, H.: Zur Situation der Umweltbildung in der Grundschule. In: MEIER, R.; UNGLAUBE, H.; FAUST-SIEHL, G. (Hrsg.): Sachunterricht in der Grundschule. Arbeitskreis Grundschule - Der Grundschulverband - e.V., Frankfurt 1997
- [101] GÄRTNER, H.; HELLBERG-RODE, G.: Schulische Umweltbildung im Kontext nachhaltiger Entwicklung. In: BAIER, H. ET AL. (Hrsg.): Umwelt, Mitwelt, Lebenswelt im Sachunterricht. Verlag Julius Klinhardt, Bad Heilbrunn 1999
- [102] KAHLERT, J.: Worin kaufe ich meinen Orangensaft? - Eine Einführung in die Idee der Ökobilanzen. *Praxis Grundschule* (1995) 2 S. 8-15
- [103] KAISER, A.: Praxisbuch handelnder Sachunterricht. Band 2. 2. Auflage. Schneider-Verlag, Hohengehren 1999
- [104] KAISER, A.: Praxisbuch handelnder Sachunterricht. Band 1. 6. Auflage. Schneider-Verlag, Hohengehren 1999
- [105] HESSISCHES KULTUSMINISTERIUM (Hrsg.): Rahmenplan Chemie, Sekundarstufe I. 1. Auflage. Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt 1996
- [106] BASCHEK, T.: Unterrichtsentwürfe zu dem Thema: Ökobilanzen für die Sekundarstufe I. Wissenschaftliche Hausarbeit für das Lehramt an Haupt- und Realschulen, Institut für Didaktik der Chemie, Fachbereich Chemie, J. W. Goethe-Universität Frankfurt. Frankfurt 2000
- [107] KAHLERT, J.: Aber die Cola-Dose ist doch so praktisch... - Lebensstil gegen Ökobilanz?. *Praxis Schule 5-10* (1996) 2 S. 60-65
- [108] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (Hrsg.): Hinter die Verpackung geschaut - Eine Unterrichtseinheit zur Ökobilanz von Verpackungen für das 5. bis 9. Schuljahr. Bern 1991
- [109] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (Hrsg.): Ökobilanzen - Eine Unterrichtseinheit zu den Themen Verpackung, Umweltschutz und Abfallvermeidung ab 8. Schuljahr. Bern 1992
- [110] BLAß, T.: Ökobilanzen - Ein Thema für den Unterricht. Schriftliche Hausarbeit zur Prüfung für das Lehramt an Realschulen, Didaktik der Chemie, Fachbereich Chemie, C. v. Ossietzky-Universität. Oldenburg 1996
- [111] HESSISCHES KULTUSMINISTERIUM (Hrsg.): Kursstrukturpläne Gymnasiale Oberstufe - Physik, Biologie, Chemie. Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt 1994
- [112] STEINER, D., SCHMELZER, H.: Abgasreinigung in nordbayrischen Kraftwerken als Schulversuch und als Ökobilanz. *NiU-Chemie* 6 (1995) 27 S. 31-35
- [113] HARSCH, G.; HEIMANN, R.: Der Estercyclus – ein experimentelles Projekt zur Schulung ressourcenbewußten Denkens und Handelns. *Chem.Schul* 41 (1994) Beiheft S. 7-18
- [114] HAMMAR, F.: Wasseraufbereitung, *Nachr. Chem. Tech. Lab.* 46 (1998) 5 S. M 27
- [115] ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, 6. Auflage, 1999 (elektronische Ausgabe)
- [116] BEITZ, W.; K.-H. KÜTTNER (HRSG.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg 1995

- [117] CHEMICAL RUBBER PUBLISHING COMPANY: CRC Handbook of Chemistry and Physics. 78. Auflage. CRC Press, Boca Raton (USA) 1997-98)
- [118] SCHWEDT, G.; SCHNEPEL, F.-M.: Analytisch-chemisches Umweltpraktikum – Anleitungen zur Untersuchung von Luft, Wasser und Boden. Thieme, Stuttgart 1981
- [119] HÜTTER, L.: Wasser und Wasseruntersuchung. 4. Auflage. Salle und Sauerländer, Frankfurt/Aarau 1990
- [120] STADTWERKE FRANKFURT AM MAIN (ABT. TECHNISCHER BEREICH WASSER): Analysenbericht des Trinkwassers im Versorgungsgebiet Frankfurt - Marie-Curie-Straße, Niederursel. 1996
- [121] WASSERTECHNISCHE ANLAGEN GMBH (WABAG) (Hrsg.): WABAG Handbuch Wasser. 8. Auflage. Vulkan-Verlag, Essen 1996
- [122] HOLLEMNN, A.; WIBERG, E.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 101. Auflage, de Gruyter, Berlin/New York 1995
- [123] HERMANN WALDNER GMBH & CO. KG: Wasser-Destillationsanlage Zyclodest und WFI-Systeme. Firmenbroschüre. Wangen 2001
- [124] HOIß, J.: Zyclodest-System – eine neue Methode zur Herstellung von hochreinem Wasser. *Pharm.Ind.* **41** (1979) 2 S. 177-182 (Sonderdruck)
- [125] HOIß, J.: Zyclodest-Anlagen – Reistwasser-Destillationsapparaturen auch für kleine Nennleistungen. *Pharm.Ind.* (1982) 5 o.A.d.S. (Sonderdruck)
- [126] GFL - GESELLSCHAFT FÜR LABORTECHNIK MBH: Wasser-Destillierapparate für Mono- und Bidestillation. Firmenbroschüre. Burgwedel 2001
- [127] LANDGRAF LABORGERÄTE: Labor-Katalog. 10. Auflage. Langenhagen 2000
- [128] BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT (Hrsg.): Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. 3. Auflage. Bern 1996
- [129] CSC JÄKLECHEMIE GMBH & CO. KG: persönliche Mitteilung an den Autor. Nürnberg 1999
- [130] SG WASSERAUFBEREITUNG UND REGENERIERSTATION GMBH: Ionenaustauscher-Harmonie aus Technik und Erfahrung. Firmenbroschüre. Barsbüttel 2001
- [131] VENTEN, E.: Wasser-Destillationsverfahren - Ein technisch-wirtschaftlicher Vergleich. *Chemische Rundschau* (1976) 20 S. 8-11
- [132] DUALES SYSTEM DEUTSCHLAND AG: [www.gruener-punkt.de](http://www.gruener-punkt.de) (Feb. 2002)
- [133] FRANCK, A.; BIEDERBICK, K.: Kunststoff-Kompodium. 3. Auflage. Vogel, Würzburg 1990
- [134] BUKATSCH, F.; GLÖCKNER, W. (Hrsg.): Experimentelle Schulchemie. Band 6/I Organische Chemie II. Aulis Verlag Deubner, Köln 1975
- [135] VOLLHARDT, K. P. C.: Organische Chemie. 1. korr. Nachdr. d. 1. Aufl. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1990

- [136] BREITMAIER, E.; JUNG, G.: Organische Chemie II - Spezielle Verbindungsklassen, Naturstoffe, Synthesen, Strukturaufklärung. Thieme, Stuttgart 1983
- [137] RAAF, H.: Organische Chemie im Probierring. 14. Auflage, Franck, Stuttgart 1979
- [138] MARK, H. F.; BIKALES, N. M.; OVERBERGER, C. G.; MENGES, G. (Hrsg.): Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. John Wiley & Sons, New York 1988
- [139] SAUVET, G.; SIGWALT, P.: Carbocationic Polymerization: General Aspects and Initiation. In: ALLEN, G. (Hrsg.): Comprehensive Polymer Science. The Synthesis, Characterization, Reactions & Applications of Polymers. Band 3 (Chain Polymerization I). Pergamon Press, Oxford 1989
- [140] FREYER, C. V.: Kationische Polymerisation von Vinylmonomeren - experimentelle und theoretische Untersuchung von Reaktionsmechanismen. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Chemie, Biologie und Geowissenschaften. München 1989
- [141] MENGES, G.: Recycling von Kunststoffen. Hanser, München 1992
- [142] SAECHTLING, H.; OBERBACH, K.: Kunststoff-Taschenbuch. 27. Auflage. C. Hanser Verlag, München/Wien 1998
- [143] SYKES, P.: Wie funktionieren organische Reaktionen - Reaktionsmechanismen für Einsteiger. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1996
- [144] MELLE, I.; JANSEN, W.: Einfaches Kalorimeter zur Bestimmung der Verbrennungsenthalpie von Kohlenstoff. *PdN-Ch* (1993) 2 S. 20
- [145] BRAUN, H.: Emissionen bei Strohfeuerungen - Energietechnische und umweltschutzrelevante Untersuchungen. Forschungsbericht aus der Reihe Umweltschutz, Lebensmittelangelegenheiten, Veterinärverwaltung. Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz. Wien 1986
- [146] APME (Hrsg.): Polymethyl Methacrylate Sheet. Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [147] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMTECHNIK UND INNOVATIONSFORSCHUNG (FhG-ISI): C-Ströme: Abschätzung der Material-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Ströme für Modellsysteme im Zusammenhang mit dem nichtenergetischen Verbrauch, orientiert am Lebensweg - Stand und Szenarienbetrachtung. Band 1 (Abschätzungen für das Gesamtsystem). Karlsruhe 1999
- [148] EGER, C.: Chemisches Recycling von PMMA im Wirbelschichtreaktor. Dissertation, Universität Hamburg, Fachbereich Chemie. Hamburg 1999
- [149] SAMBALE, H.: Recycling von Thermoplasten durch Direktverarbeitung von Lösungen. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fachbereich Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften. Berlin 1999
- [150] HEYDE, M.; KREMER, M.: Recycling and Recovery of Plastics from Packagings in Domestic Waste. LCA-type Analysis of Different Strategies. Eco-Infoma Press, Landsberg 1999
- [151] VERBAND KUNSTSTOFFERZEUGENDE INDUSTRIE E.V. (VKE) (Hrsg.): Produktions- und Verbrauchsdaten für Kunststoffe in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung 1999 - Ergebnisse einer Umfrage (Endbericht). Frankfurt 2000

- [152] APME (Hrsg.): PVC (Bulk Polymerised). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [153] APME (Hrsg.): Polypropylene Resin (PP). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [154] APME (Hrsg.): PET Resin (Bottle Grade). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [155] APME (Hrsg.): Polyethylene Resin (Low Density) (LDPE). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [156] APME (Hrsg.): Polystyrene (General Purpose) (GPPS). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [157] APME (Hrsg.): Polymethyl Methacrylate Beads (PMMA). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [158] APME (Hrsg.): Polycarbonate (PC). Eco-Profiles-Report, 1999. [www.apme.org](http://www.apme.org) (Feb. 2002)
- [159] LINDNER, C.; FELDMANN, H.: Kunststoffabfälle - Ist-Situation und Ausblick bei Produktion und Entsorgung. Bei: FAULSTICH, M.; URBAN, A.; BILITEWSKI, B. (Hrsg.): 6. Fachtagung "Thermische Abfallbehandlung". Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Technischen Universität München, Nr. 162. München 2001
- [160] SENATSVERWALTUNG FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): Ökobilanzen populär – Produktbilanzen am Beispiel von Getränkeverpackungen, Kühlschränken und grafischen Papieren. Berlin 1995

# Ökobilanzen im Chemieunterricht

## Anhang

Anhang 1: Die Bereiche von ÖKO-BILLY .....	A3
Anhang 2: Hintergrundberechnungen in ÖKO-BILLY .....	A35
Anhang 3: Gesamtliste Ökofaktoren .....	A45



## Anhang 1: Die Bereiche von ÖKO-BILLY

A1.1	ÖKO-BILLY Hauptseite.....	A3
A1.2	Einführung.....	A4
A1.3	Blanko-Wirkungsabschätzung.....	A7
A1.4	Ökobilanz Papier.....	A11
A1.5	Ökobilanz entionisiertes Wasser.....	A16
A1.6	Ökobilanz Kunststoffe.....	A21
A1.7	Die Hilfe-Datei.....	A32

## Anhang 1: Die Bereiche von ÖKO-BILLY

### A1.1 ÖKO-BILLY Hauptseite

Die ÖKO-BILLY Hauptseite ist die erste Seite, welche der Benutzer sieht (Abb. A1) (Erläuterungen siehe Tab. A1). Sie heißt Hauptseite, weil der über sie alle anderen Bereiche ausgewählt werden. Ferner kann von dieser Seite, wie auch von allen anderen Startseiten, die Hilfe aufgerufen werden. Die Befehlsschaltflächen einer Hauptseite sind rechteckig mit abgerundeten Ecken.

<b>ÖKO-BILLY 3.0</b> Hauptseite	
<b>Einführung</b>	Einführung in die Theorie der Ökobilanzierung (Sachbilanz und Wirkungsabschätzung) am Beispiel einer Kerze
<b>Blanko- Wirkungsabschätzung</b>	Wirkungsabschätzung für beliebige Sachbilanzdaten nach der Methode der UBP
<b>Ökobilanz Papier</b>	Ökobilanz zur Herstellung von weißem und recyceltem Papier
<b>Ökobilanz entionisiertes Wasser</b>	Ökobilanz zur Herstellung von entionisiertem Wasser durch Ionenaustausch und Destillation (experiment. Datenbasis)
<b>Ökobilanz Kunststoffe</b>	Ökobilanz zur Herstellung und zum Recycling von Kunststoffen (experiment. Datenbasis)
<b>Hilfe</b>	Informationen zur Bedienung von Öko-Billy und zur Theorie der Ökobilanzierung
<b>Ganze Ansicht</b>	<b>Normale Ansicht</b>
	<b>Zoom-Faktor</b> 100% ▼

**Abb. A1:** Hauptseite von ÖKO-BILLY mit Wahl der Bereiche und Ansichtsoptionen

**Tab. A1:** Inhalt der Bereiche in ÖKO-BILLY

ÖKO-BILLY Bereich	Inhalt
Einführung	Einführung in die Theorie der Ökobilanzierung (Sachbilanz und Wirkungsabschätzung) am Beispiel einer Kerze
Blanko–Wirkungsabschätzung	Wirkungsabschätzung für beliebige Sachbilanzdaten
Ökobilanz Papier	Ökobilanz zur Herstellung von weißem und recyceltem Papier
Ökobilanz entionisiertes Wasser	Ökobilanz zur Herstellung von entionisiertem Wasser durch Ionenaustausch und Destillation (experimentelle Datenbasis)
Ökobilanz Kunststoffe	Ökobilanz zur Herstellung und zum Recycling von Kunststoffen (experimentelle Datenbasis)
Hilfe	Informationen zur Installation und Bedienung von ÖKO-BILLY sowie zur Theorie der Ökobilanzierung

Weiterhin können hier (wie auf jeder anderen Hauptseite) verschiedene Ansichten eingestellt werden. Mit Öffnen der Datei wird automatisch die "ganze Ansicht" hergestellt. Die Absicht ist dabei, alle unerwünschten Symbolleisten und andere Bildelemente (wie Bearbeitungsleiste und Arbeitsmappenregister) verschwinden zu lassen, um die relevanten Informationen von ÖKO-BILLY besser herausstellen zu können. Ist dies aber nicht gewünscht, so kann durch ein Klick auf die Schaltfläche "Normale Ansicht" die normale, bekannte Bildschirmdarstellung von Excel wieder hergestellt werden. Die Schaltfläche "Ganze Ansicht" stellt wieder die reduzierte Ansicht her. Mit dem Listenfeld "Zoom-Faktor" kann die Größe bestimmt werden, mit der die Bildschirmanzeige erfolgt. Standardeinstellung ist 100 %, das sich als geeignete Größe für einen 17-Zoll-Monitor herausgestellt hat. Für einen kleineren Monitor, beispielsweise mit 14-Zoll, werden 75 % empfohlen. Die Zoom-Einstellungen gelten immer für die gerade geöffnete Datei und können daher für mehrere gleichzeitig geöffnete Dateien unterschiedlich eingestellt werden<sup>1</sup>.

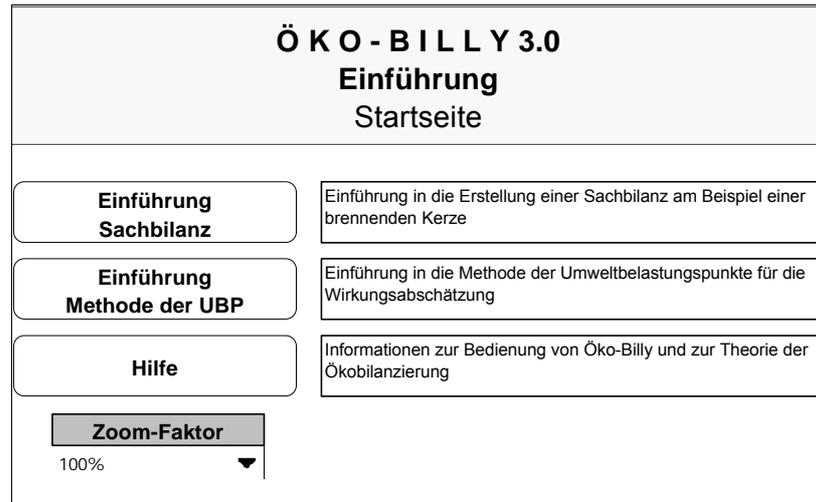
Die in ÖKO-BILLY berechneten Ergebnisse der Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen können sich aufgrund des Rundens und unterschiedlicher Eingangsparameter von denen in Kapitel 4 leicht unterscheiden.

Im folgenden werden die einzelnen Bereiche von ÖKO-BILLY einschließlich der Hilfe erläutert.

## A1.2 Einführung

Der Bereich Einführung in ÖKO-BILLY bietet eine Einführung in die Theorie der Ökobilanzierung (Sachbilanz und Wirkungsabschätzung) am Beispiel einer Kerze (Abb. A2).

<sup>1</sup> Bei den folgenden Abbildungen der Startseiten von ÖKO-BILLY ist das Listenfeld "Zoom Faktor" nicht mehr aufgeführt. Es können stets die hier erläuterten Einstellungen vorgenommen werden.



**Abb. A2:** Startseite des Bereiches "Einführung"

Das Beispiel Kerze wurde ausgewählt, weil es exemplarisch und überschaubar an einem Gegenstand aus der Alltagswelt des Schülers bestimmte Probleme bei der Erstellung einer Ökobilanz aufzeigt (welche Input-Output-Faktoren fallen für eine Sachbilanz an und welche sind davon letztlich für die Wirkungsabschätzung ausschlaggebend?). Aus dem umfassenden Lebensweg einer Kerze wird sich in dieser Einführung somit auf die Gebrauchsphase, das Abbrennen der eigentlichen Kerze, beschränkt. Andere mögliche Parameter, wie die Herstellung und der Gebrauch von Streichhölzern oder eines Feuerzeugs, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit vernachlässigt. Das gleiche gilt für einen Kerzenständer oder die Raumbelichtung.

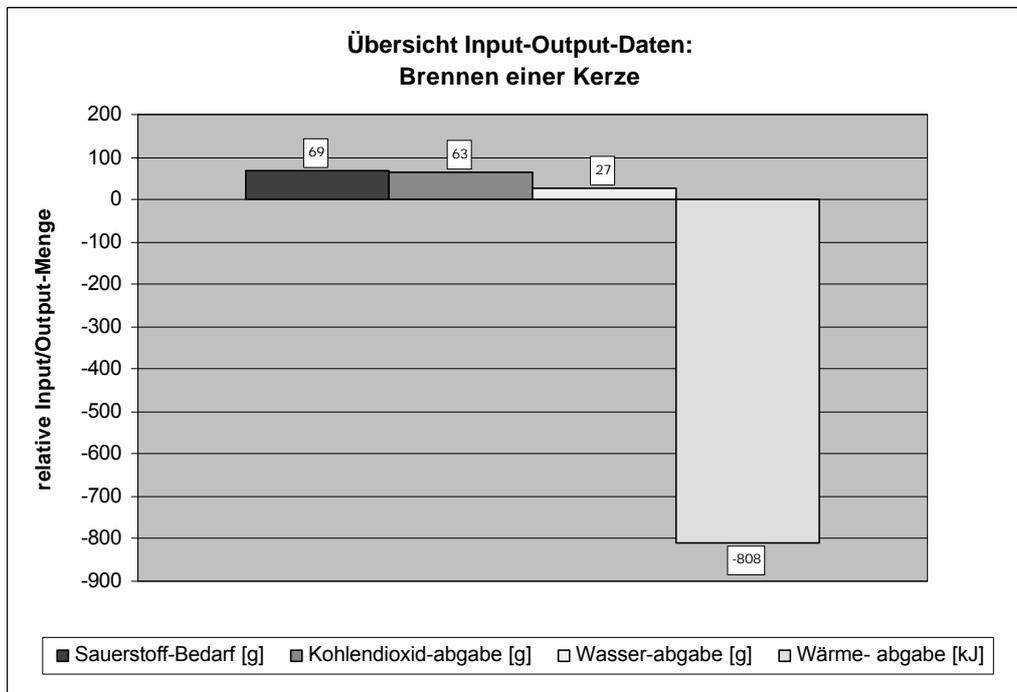
Die Mengen der Inputs Paraffin und Baumwolldocht können variiert werden, um so ihre Auswirkung auf die Outputs Kohlendioxid-, Wasser- und Wärmeabgabe zu zeigen. Die Mengen des bei der Verbrennung entstehenden Kohlendioxids und Wasser wurden stöchiometrisch berechnet.

Anschließend wird die Methode der Umweltbelastungspunkte vorgestellt. Hierbei können die Input-Output-Daten des Beispiels zum Auswerten geladen werden. Die zentralen Ökofaktoren können (wie in jedem ÖKO-BILLY Bereich) herauf- oder heruntergesetzt und so die Schwerpunkte bei der Beurteilung der Umweltauswirkungen verändert werden.

Bestandteile der brennenden Kerze		Sauerstoff-Bedarf [g]	Kohlendioxid-abgabe [g]	Wasser-abgabe [g]	Wärme-abgabe [kJ]
Paraffin [g]	20,0	6,89E+01	6,23E+01	2,66E+01	-8,05E+02
Baumwolldocht [g]	0,2	2,37E-01	3,26E-01	1,11E-01	-2,92E+00
<b>Summe</b>		<b>6.91E+01</b>	<b>6.26E+01</b>	<b>2.67E+01</b>	<b>-8.08E+02</b>

**Abb. A3:** Ermittlung der Umweltbelastungen einer Kerze (Seite "Einführung Sachbilanz")

Die Ergebnisse werden auf der gleichen Seite in einem dreidimensionalen Block-Diagramm dargestellt (Abb. A4). Für die zu verbrennenden Bestandteile einer Kerze (Paraffin, Baumwolldocht) sind der Sauerstoff-Bedarf, die Kohlendioxid- und Wasserabgabe sowie der Energieumsatz im Rahmen der Verbrennung aufgeführt.



**Abb. A4:** Ergebnisse der Umweltbelastungen einer Kerze (Beispiel, Seite "Einführung Sachbilanz")

### Einführung Methode für Wirkungsabschätzung

Dieses Blatt bietet eine Einführung in die Methode der Umweltbelastungspunkte, welche innerhalb von ÖKO-BILLY verwendet wird.

Abb. A5 zeigt die einzelnen Elemente der Seite. Das obere Listenfeld ermöglicht die Auswahl eines sogenannten Ökofaktors, welcher für die weitere Berechnung benötigt wird. Ein Ökofaktor für zum Beispiel eine Emission drückt das Verhältnis der momentanen Umweltbelastung durch diese Emission zu einer maximal akzeptablen Belastung aus. Wird durch das Listenfeld ein Ökofaktor ausgewählt, so zeigt ÖKO-BILLY daraufhin die Werte zur Berechnung in der darunter stehenden Formel. Diese Werte sind frei editierbar und unterscheiden sich durch eine blaue Farbe von den nicht frei editierbaren. Der errechnete Ökofaktor wird für die nachfolgende Berechnung einer beliebigen Umweltbelastung verwendet. Diese kann selbstverständlich auch geändert werden. Auf diese Weise erhält der Benutzer ein Einblick in die Methodik. Die Berechnung der Ökofaktoren wird transparent dargestellt. Es ist möglich, Ökofaktoren selbst zu variieren und ihr Einfluß auf das Endergebnis zu sehen.

Durch das untere Listenfeld können die für das Beispiel Kerze (Seite "Einführung Sachbilanz") ermittelten Umwelteinwirkungen, das sind Kohlendioxid-Belastung und Energieverbrauch, über ihre entsprechenden Ökofaktoren beurteilt werden. Der Sauerstoffbedarf

sowie die Wasserabgabe aus der Verbrennung werden innerhalb der Methode nicht als umweltbelastend eingestuft.

Anhand des Beispiels einer brennenden Kerze wird eine erste Brücke geschlagen zwischen einem praktischen Beispiel und der Theorie der Ökobilanzierung.

**Einführung Bewertungsmethode -  
Methode der Umweltbelastungspunkte**

**Ökofaktoren (Schweiz 1990-1998)**  
 Kohlenstoffoxide --> Luft

$$\text{Ökofaktor} = \frac{1 \text{ UBP}}{1,5\text{E}+07 \text{ t/a}} \times \frac{44,2\text{E}06 \text{ t/a}}{1,5\text{E}+07 \text{ t/a}} \times \frac{1,0\text{E}+12 \text{ /a}}{1,5\text{E}+07 \text{ t/a}} = 2,0\text{E}-01 \text{ UBP/g}$$

Umwelt-  
belastung-  
kennzahl =  $2,0\text{E}-01 \text{ UBP/g} \times 10,0 \text{ g} = 2,0\text{E}+00 \text{ UBP}$

**Übernahme Benutzerdaten "Beispiel Kerze"**

**Abb. A5:** Wirkungsabschätzung nach der Methode der Umweltbelastungspunkte (Seite "Einführung Wirkungsabschätzung")

### A1.3 Blanko-Wirkungsabschätzung

Dieser Bereich besteht nur aus der Seite "Blanko-Wirkungsabschätzung" (Abb. A6). Sie erlaubt das Erstellen einer Wirkungsabschätzung nach der Methode der Umweltbelastungspunkte auf der Basis folgender Umwelteinwirkungen (zum Teil noch weiter differenziert):

- Bodenverbrauch
- Deponieraumverbrauch
- Energieverbrauch
- Lärmemissionen
- Luftemissionen
- Wasseremissionen

Ö K O - B I L L Y 3.0 Blanko-Wirkungsabschätzung Startseite	
<b>Blanko- Wirkungsabschätzung</b>	Wirkungsabschätzung für beliebige Sachbilanzdatenn nach der Methode der UBP
<b>Hilfe</b>	Informationen zur Bedienung von Öko-Billy und zur Theorie der Ökobilanzierung
<b>Zoom-Faktor</b> 100% ▼	

**Abb. A6:** Startseite des Bereiches "Blanko-Wirkungsabschätzung"

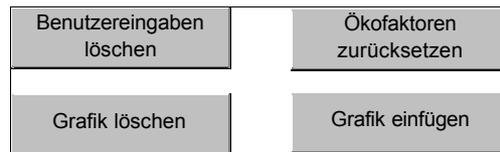
Sinn dieser Seite ist es, ein leeres Formular für eine Wirkungsabschätzung nach der Methode der Umweltbelastungspunkte für beliebige Sachbilanzdaten bereitzustellen (Abb. A7). Damit ist es möglich, mehrere verschiedene Produkte unter ihrem ökologischen Gesichtspunkt miteinander zu vergleichen.

Die Daten werden in die Spalte Umwelteinwirkung eingegeben. Der Standard-Ökofaktor ist vorgegeben. Beide Werte können beliebig geändert werden. Das Produkt aus Ökofaktor und Umwelteinwirkungen ist (wie aus dem Bereich Einführung bekannt) die errechnete Umweltbelastung. Diese hat die Einheit Umweltbelastungspunkte. Die Methode ermöglicht die Summe aller Umweltbelastungen zu bilden. Die Umweltbelastungen der miteinander verglichenen Produkte werden durch die Reduzierung auf einen Punkt-Wert direkt gegeneinander abwägbar. Die freie Variation der Werte für Ökofaktor und Umwelteinwirkung ermöglicht es, eigene Schwerpunkte in der Beurteilung zu setzen.

Umwelteinwirkung	Ökofaktor	Umwelteinwirkung	Umweltbelastung
<b>Energieverbrauch</b>			
Primärenergie	1,0 UBP/MJ	0,0E+00 MJ	0,0E+00 UBP
<b>Bodenverbrauch</b>			
Versiegelung	550,0 UBP/m <sup>2</sup>	0,0E+00 m <sup>2</sup>	0,0E+00 UBP
<b>Lärmemissionen</b>			
Straßenverkehr mit LKWs	1600,0 UBP/km	0,0E+00 km	0,0E+00 UBP
Straßenverkehr mit PKWs	140,0 UBP/km	0,0E+00 km	0,0E+00 UBP
Straßenverkehr (Mix)	210,0 UBP/km	0,0E+00 km	0,0E+00 UBP
<i>Summe Lärmemissionen</i>			0,0E+00 UBP
<b>Luftemissionen</b>			
Chlorwasserstoff	47,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
FCKW	2000,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Kohlenstoffoxide (als CO <sub>2</sub> )	0,2 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	32,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Methan	4,2 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Schwefeloxide (als SO <sub>2</sub> )	53,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Stickstoffoxide (als NO <sub>2</sub> )	67,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
<i>Summe Luftemissionen</i>			0,0E+00 UBP
<b>Wasseremissionen</b>			
Ammonium (in N)	54,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Chlorid (in Cl)	0,026 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
DOC (in C)	18,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Nitrat (in N)	16,00 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Phosphor (in P)	2000,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Sulfat	0,077 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
<i>Summe Wasseremissionen</i>			0,0E+00 UBP
<b>Deponieraumverbrauch</b>			
Reststoffdeponie (Siedlungsabfall)	0,5 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
Untertagedeponie (Sonderabfall)	24,0 UBP/g	0,0E+00 g	0,0E+00 UBP
<i>Summe Deponieraumverbrauch</i>			0,0E+00 UBP
Summe aller Umweltbelastungen			<b>0,0E+00 UBP</b>

**Abb. A7:** Wirkungsabschätzung für beliebige Umweltbelastungen (Beispiel, Seite "Blanko-Wirkungsabschätzung")

Auf der gleichen Seite befinden sich unterhalb der Tabelle vier Befehlsschaltflächen Abb. A8). Die beiden oberen Schaltflächen löschen zum einen alle Benutzereingaben in der Spalte "Umwelteinwirkung", zum anderen setzen sie die Werte für die Ökofaktoren zurück.

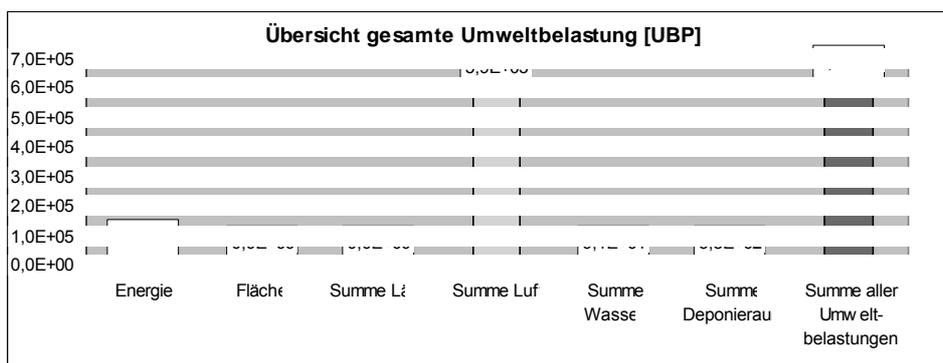


**Abb. A8:** Schaltflächen (Seite "Blanko-Wirkungsabschätzung")

Die Schaltfläche rechts unten öffnet einen Dialog zum Einfügen eines von mehreren möglichen Diagrammen. Sie dienen zur grafischen Auswertung der Wirkungsabschätzung und zeigen jeweils die Ergebnisse einer Kategorie. Das Löschen eines Diagramms geschieht über die Schaltfläche "Grafik löschen". Folgende Diagramme stehen zur Verfügung:

- Abfall
- Energie
- Fläche
- Lärm
- Luftbelastung
- Wasserbelastung
- Übersicht gesamte Umweltbelastung

Abb. A9 zeigt als Beispiel für die Ergebnisdarstellung das Diagramm "Übersicht Gesamtbelastung", welches die Ergebnisse aller Kategorien der Wirkungsabschätzung zusammenfaßt. Zusätzlich ist die Summe aller Umweltbelastungen aufgeführt. Die Skalierung ist variabel und wird in Umweltbelastungspunkten (UBP) angegeben. Je größer der Zahlenwert, desto größer ist die Umweltbelastung. Bei diesem fiktivem Beispiel überwiegen also Deponieraum und Bodenverbrauch.

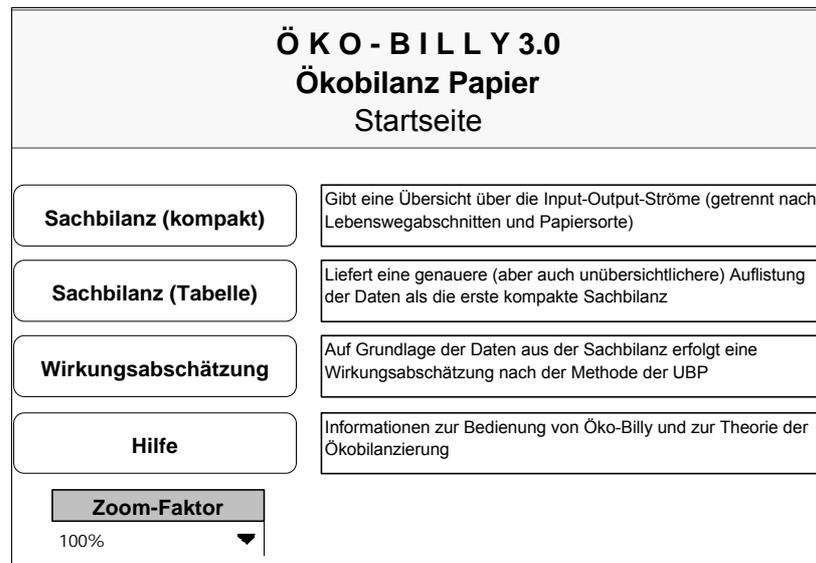


**Abb. A9:** Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Wirkungsabschätzung (Seite "Blanko-Wirkungsabschätzung")

## A1.4 Ökobilanz Papier

Der Bereich "Ökobilanz Papier" entstand auf der Basis einer Modell-Ökobilanz zur Papierherstellung. Ziel dieses Bereiches ist die Anwendung des bisher Erlernten zur Erstellung einer Sachbilanz und zur Durchführung der Wirkungsabschätzung auf ein konkretes Beispiel. Bei der Ökobilanz Papier geht es um die Beurteilung von (weißem) neuwertigem und (grauen) recyceltem grafischem Papier (zum Beispiel als Schreibpapier).

Es stehen innerhalb dieses Bereiches drei Seiten zur Verfügung (Abb. A10), wovon die Sachbilanz tabellarisch (Abb. A11) oder auch in kompakter Form (Abb. A12) angezeigt werden kann.



**Abb. A10:** Startseite des Bereiches "Ökobilanz Papier"

Die Sachbilanz-Tabelle zeigt die jeweiligen Inputs und Outputs über alle Lebenswegabschnitte für weißes und Recycling-Papier (Abb. A11)<sup>2</sup>. Eine Übersicht über die betrachteten Inputs und Outputs gibt Tab. A2.

<sup>2</sup> Fehlen bei den Wasseremissionen Angaben, so wird der Wert gleich Null gesetzt. Eine Aufsummierung ist für die AOX, BSB und CSB-Werte nicht möglich. Für die Wirkungsabschätzung wird der DOC aus dem CSB-Wert berechnet ( $=0,33 \cdot \text{CSB}$ ).

**Tab. A2:** Inputs und Outputs der tabellarischen Sachbilanz (Seite "Sachbilanz- Tabelle")

Input	Output
Energie	Energie (durch Verbrennung)
Holz	Luftemissionen
Mineralien	Wasseremissionen
Wasser	Reststoffe
Hilfs- und Betriebsstoffe	

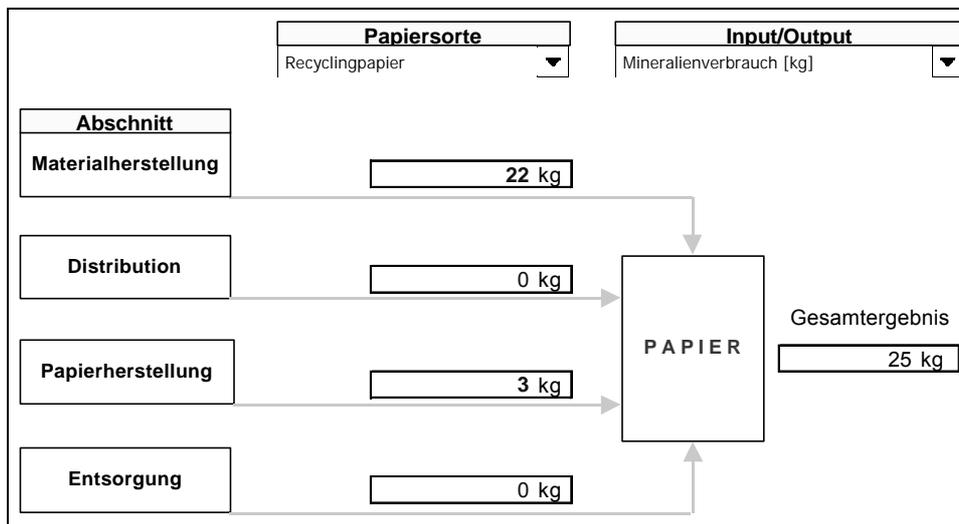
Input/Output	Weißes Papier				Recyclingpapier			
	Materialherstellung	Distribution	Papierherstellung	Entsorgung	Materialherstellung	Distribution	Papierherstellung	Entsorgung
<b>INPUT</b>								
<b>Energie [kg]</b>								
Braunkohle [MJ]	600	0	1430	0	830	0	1430	0
Erdgas [MJ]	535	0	435	0	395	0	435	0
Erdöl [MJ]	3310	210	6880	50	1250	210	6880	0
Steinkohle [MJ]	860	0	1880	0	1110	0	1880	0
Wasserkraft [MJ]	1110	0	130	0	180	0	130	0
Kernenergie [MJ]	4930	0	2680	0	1940	0	2680	0
<b>Gesamt [MJ]</b>	<b>11345</b>	<b>210</b>	<b>13435</b>	<b>50</b>	<b>5705</b>	<b>210</b>	<b>13435</b>	<b>0</b>
<b>Holz [kg]</b>	<b>1710</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>171</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Mineralien [kg]</b>								
Kalkstein [kg]	22	0	3	0	4	0	3	0
Steinsatz [kg]	69	0	0	0	18	0	0	0
<b>Gesamt [kg]</b>	<b>91</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>
<b>Wasser [l]</b>	<b>65300</b>	<b>0</b>	<b>28270</b>	<b>1400</b>	<b>27700</b>	<b>0</b>	<b>28270</b>	<b>0</b>
<b>Hilfs- und Betriebsstoffe [kg]</b>								
Chemikalien [kg]	14	0	0	5	27	0	0	0
Füllstoffe [kg]	0	0	200	0	0	0	100	0
Schwefel [kg]	9	0	0	0	3	0	0	0
Schmierstoffe [kg]	0,8	0	0	0	0,1	0	0,0	0,0
<b>Gesamt [kg]</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>200</b>	<b>5</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>
<b>OUTPUT</b>								
<b>Energie [MJ]</b>								
Strom [MJ]	0	0	0	1200	107	0	0	0
Wärme [MJ]	70	0	0	4500	420	0	0	0
<b>Gesamt [MJ]</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5700</b>	<b>527</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>527</b>
<b>Luftemissionen [kg]</b>								
CO <sub>2</sub> fossil [kg]	420	20	860	4	310	20	860	0
CO <sub>2</sub> regenerativ [kg]	1360	0	0	1380	250	0	0	0
Methan [kg]	0,51	0,004	1,02	0,001	0,58	0,004	1,02	0
NO <sub>x</sub> [kg]	3,05	0,22	1,04	2,26	0,98	0,22	1,04	0
SO <sub>2</sub> [kg]	5,66	0,02	1,03	0,34	0,95	0,02	1,03	0
Staub [kg]	1,57	0,02	0,28	0,07	0,32	0,02	0,28	0
NMVOG [kg]	0,5	0,04	0,22	0,01	0,12	0,04	0,22	0
VOC (unspez.) [kg]	0,00006	0	0	0	0,00019	0	0	0
Dioxine [kg]	0	0	0	6,3E-10	5,54E-11	0	0	0
<b>Gesamt [kg]</b>	<b>1791</b>	<b>20</b>	<b>864</b>	<b>1387</b>	<b>563</b>	<b>20</b>	<b>864</b>	<b>0</b>
<b>Wasseremissionen [kg]</b>								
AOX [g Hal]	888	0	0	0	88	0	0	0
BSB [kg O <sub>2</sub> ]	7,0	0	0	0	1,0	0	0	0
CSB [kg O <sub>2</sub> ]	20,9	0	3,0	0	4,6	0	3,0	0
<b>Reststoffe [kg]</b>								
Abfälle [kg]	69	0	22	141	86	0	22	0
Abraum [kg]	450	0	1050	0	610	0	1050	0
<b>Gesamt [kg]</b>	<b>519</b>	<b>0</b>	<b>1072</b>	<b>141</b>	<b>696</b>	<b>0</b>	<b>1072</b>	<b>0</b>

**Abb. A11:** Sachbilanz der Ökobilanz Papier (Seite "Sachbilanz Tabelle")

Die Sachbilanz in kompakter Form (Abb. A12) zeigt getrennt für die Lebenswegabschnitte und die Papiersorte die jeweiligen Inputs und Outputs. Die Lebenswegabschnitte sind

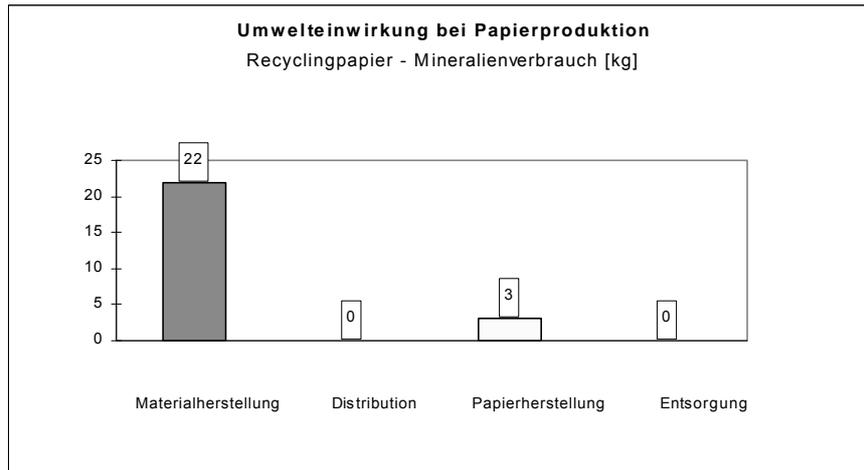
aufgegliedert nach Material- und Papierherstellung sowie Entsorgung. Zusätzlich ist die Distribution (Vertrieb) aufgenommen. Die Papiersorte sowie die Inputs und Outputs können über ein Listenfeld ausgewählt werden. Im einzelnen sind dies:

- Energieverbrauch [MJ]
- Holzverbrauch [kg]
- Mineralienverbrauch [kg]
- Wasserverbrauch [l]
- Verbrauch Hilfsstoffe [kg]
- Energiegewinn (durch Verbrennung) [MJ]
- Luftemissionen [kg]
- Wasseremissionen - AOX [g Hal]
- Wasseremissionen - BSB [kg O<sub>2</sub>]
- Wasseremissionen - CSB [kg O<sub>2</sub>]



**Abb. A12:** Beispiel für die Zusammenfassung der Umwelteinwirkungen (Seite "Sachbilanz kompakt")

Die einzelnen Datenfelder sind zudem so gehalten, daß sie vom Benutzer auch verändert werden können. Die Benutzereingaben werden ebenso wie die Standardwerte zur besseren Darstellung sofort in ein Diagramm umgesetzt (Abb. A13).



**Abb. A13:** Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Sachbilanz (Seite "Sachbilanz kompakt")

Der Sachbilanz schließt sich eine Seite "Wirkungsabschätzung" an, welche analog der Seite "Blanko-Wirkungsabschätzung" aufgebaut ist. Es stehen auch die selben Befehlschaltflächen zum Löschen und Zurücksetzen der Benutzereingaben sowie zum Einfügen von Grafiken zur Verfügung (Abb. A14). Es wurde lediglich ein Listenfeld hinzugefügt, mit dem bestimmt werden kann, ob die Sachbilanz-Daten zum weißen oder recycelten Papier geladen werden sollen.

Die folgende Tab. A3 zeigt die Zuordnung der vorliegenden Sachbilanzpositionen zu den Wirkungskategorien. Der DOC-Wert (Dissolved Organic Carbon) wird aus der Angabe für den CSB (Chemischer Sauerstoff) näherungsweise errechnet ( $DOC = CSB * 0,33$ ).

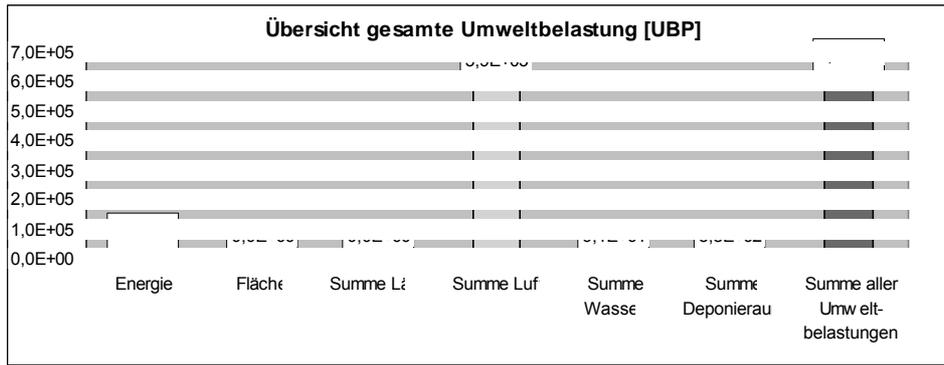
**Tab. A3:** Zuordnung der Sachbilanzpositionen zu den Kategorien (Papier; vollständiger Lebensweg)

Sachbilanzposition	Kategorie
Energieverbrauch, -gewinn	Energie
Luftemissionen	Luftbelastung
Kohlendioxide	Kohlenstoffoxide
Methan	Methan
Stickoxide	Stickoxide
Schwefeldioxid	Schwefeloxide
NMVOC	Kohlenwasserstoffe ohne Methan
Wasseremissionen	Wasserbelastung
CSB	DOC
Abfall	Abfall
Reststoff-Abfall	Reststoff-Deponie

Umwelteinwirkung	Ökofaktor	Umwelteinwirkungen der Lebensphasen				Umweltbelastung (Anteil an Summe)
		Materialherstellung	Distribution	Papierherstellung	Entsorgung	
<b>Energieverbrauch</b>						
Primärenergie	1,0 UB/P/MJ	4.9E+04	2.2E+02	2.0E+04	-1.2E+04 MJ	5.7E+04 UB/P 3.3 %
<b>Bodenverbrauch</b>						
Versiegelung	550,0 UB/P/m <sup>2</sup>	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 m <sup>2</sup>	0.0E+00 UB/P %
<b>Lärmmissionen</b>						
Straßenverkehr mit LKWs	1600,0 UB/P/km	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 km	0.0E+00 UB/P
Straßenverkehr mit PKWs	140,0 UB/P/km	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 km	0.0E+00 UB/P
Straßenverkehr (Mix)	210,0 UB/P/km	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 km	0.0E+00 UB/P
Summe Lärm		0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 km	0.0E+00 UB/P %
<b>Luftmissionen</b>						
Chlorwasserstoff	47,0 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
FCKW	2000,0 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
Kohlenstoffoxide (als CO <sub>2</sub> )	0,2 UB/P/g	1.8E+06	2.0E+04	8.6E+05	1.4E+06 g	8.2E+05 UB/P
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	32,0 UB/P/g	5.0E+02	4.0E+01	2.2E+02	1.0E+01 g	2.5E+04 UB/P
Methan	4,2 UB/P/g	5.1E+02	4.0E+00	1.0E+03	1.0E+00 g	6.4E+03 UB/P
Schwefeloxide (als SO <sub>2</sub> )	53,0 UB/P/g	5.7E+03	2.0E+01	1.0E+03	4.0E+01 g	3.6E+05 UB/P
Stickstoffoxide (als NO <sub>2</sub> )	67,0 UB/P/g	3.1E+03	2.2E+02	1.0E+03	2.3E+03 g	4.4E+05 UB/P
Summe Luft		9.7E+03	2.8E+02	3.3E+03	2.3E+03 g	1.6E+06 UB/P 96.6 %
<b>Wassermissionen</b>						
Ammonium (in N)	54,0 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
Chlorid (in Cl)	0,026 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
DOC (in C)	18,0 UB/P/g	6.9E+00	0.0E+00	1.0E+00	0.0E+00 g	1.4E+02 UB/P
Nitrat (in N)	16,00 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
Phosphor (in P)	2000,0 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
Sulfat	0,077 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
Summe Wasser		6.9E+00	0.0E+00	1.0E+00	0.0E+00 g	1.4E+02 UB/P 0.0 %
<b>Deponieraumverbrauch</b>						
Reststoffdeponie (Siedlungsabfall)	0,5 UB/P/g	5.2E+02	0.0E+00	1.1E+03	1.4E+02 g	8.7E+02 UB/P
Untertagedeponie (Sonderabfall)	24,0 UB/P/g	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00 g	0.0E+00 UB/P
Summe Deponieraum		5.2E+02	0.0E+00	1.1E+03	1.4E+02 g	8.7E+02 UB/P 0.1 %
<b>Summe Lebensphasen [UBP]</b>		<b>9,3E+05</b>	<b>2,1E+04</b>	<b>3,3E+05</b>	<b>4,2E+05</b>	<b>1,7E+06 UB/P</b>
<b>Summe Lebensphasen [%]</b>		<b>54,7</b>	<b>1,3</b>	<b>19,3</b>	<b>24,8</b>	<b>100,0 %</b>
		Materialherstellung	Distribution	Papierherstellung	Entsorgung	Summe Lebensweg

Abb. A14: Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz Papier)

Auch hierfür stehen zahlreiche Diagramme zur Verfügung. Abb. A15 zeigt als Beispiel eines davon mit einer Übersicht zur Gesamtbelastung.



**Abb. A15:** Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz Papier)

### A1.5 Ökobilanz entionisiertes Wasser

Der Bereich "Ökobilanz entionisiertes Wasser" dient sowohl der Auswertung der hierfür erstellten Schulversuche dient als auch der Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz auf der Basis der experimentell gewonnen Input-Output-Daten.

Diese Daten werden mit Hilfe von ÖKO-BILLY gesammelt und hinsichtlich ihrer Umweltbelastungen beurteilt. Dementsprechend besteht dieser Bereich aus drei Seiten; jeweils einer Sachbilanz für die Destillation und den Ionenaustausch sowie einer Seite für eine gemeinsame Wirkungsabschätzung (Abb. A16).

**Ö K O - B I L L Y 3.0**  
**Ökobilanz entionisiertes Wasser durch**  
**Destillation / Ionenaustausch**  
 Startseite

<b>Sachbilanz Destillation</b>	Auf der Basis experimenteller Daten wird eine Sachbilanz zur Destillation erstellt
<b>Sachbilanz Ionenaustausch</b>	Auf der Basis experimenteller Daten wird eine Sachbilanz zum Ionenaustausch erstellt
<b>Wirkungsabschätzung</b>	Wirkungsabschätzung auf Grundlage der beiden Sachbilanzen nach der Methode der UBP
<b>Hilfe</b>	Informationen zur Bedienung von Öko-Billy und zur Theorie der Ökobilanzierung

**Zoom-Faktor**  
 100% ▼

**Abb. A16:** Startseite des Bereiches "Ökobilanz entionisiertes Wasser"

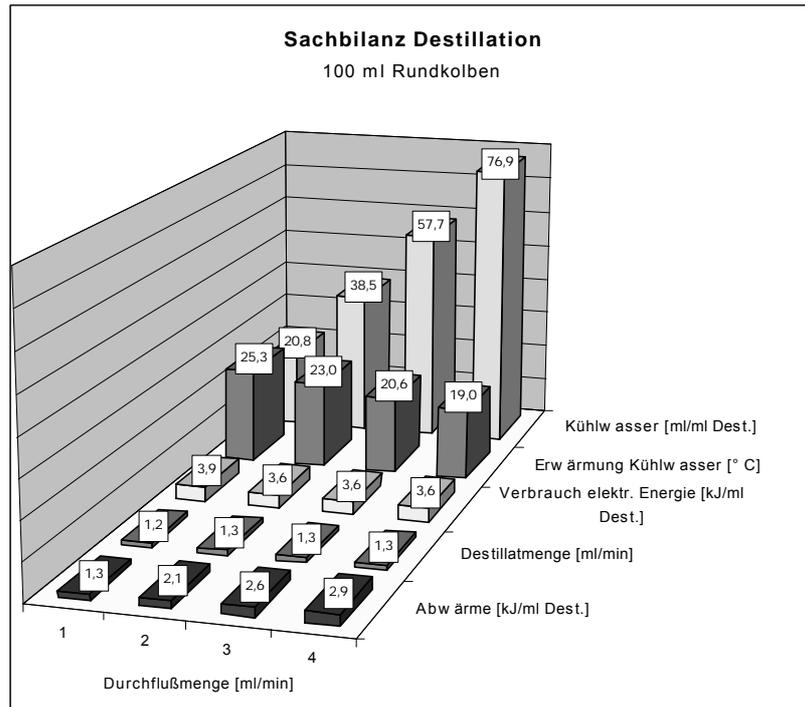
Für die Sachbilanz Destillation werden Daten zum Verbrauch an elektrischer Energie [Wh/min], der Destillatmenge [ml/min] und der Kühlwassererwärmung [°C] benötigt. Diese

werden in eine vorbereitete Tabelle eingetragen (Abb. A17). Alle anderen Angaben, wie beispielsweise die Umrechnung des Energieverbrauches in kJ-Einheiten oder die mit dem Kühlwasser abgegebene Wärme, erfolgen automatisch. Die Daten, welche eingegeben werden müssen, heben sich durch eine blaue Schrift von den anderen ab. Die Ergebnisse der drei Positionen hängen von den Parametern Kühlwassermenge und Rundkolbengröße ab, welche dementsprechend zu berücksichtigen sind. Mit dem oberen Listenfeld können experimentell ermittelte Daten zu den Inputs und Outputs für verschiedene Rundkolbengrößen für den Fall geladen werden, daß keine experimentellen Daten zur Verfügung stehen.

Input/Output	Kühlwassermenge [ml/min]			
	25	50	75	100
INPUT				
Kühlwasser [ml/ml Dest.]	20,8	38,5	57,7	76,9
Verbrauch elektr. Energie [Wh/min]	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>
Verbrauch elektr. Energie [kJ/ml Dest.]	3,9	3,6	3,6	3,6
Verbrauch Primärenergie [MJ/ml Dest.]	1,1E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,0E-02
OUTPUT				
Destillatmenge [ml/min]	<b>1,2</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>
Erwärmung Kühlwasser [° C]	<b>25,3</b>	<b>23,0</b>	<b>20,6</b>	<b>19,0</b>
Abwärme [kJ/ml Dest.]	1,3	2,1	2,6	2,9

**Abb. A17:** Sachbilanz für die Destillation (Seite "Sachbilanz Destillation")

Die Ergebnisse der Sachbilanz werden in einem dreidimensionalen Blockdiagramm dargestellt (Abb. A18). Hier sind die Ergebnisse der in der Sachbilanz-Tabelle aufgeführten Inputs/Outputs für verschiedene Kühlwasserdurchflußmengen und unter Berücksichtigung der Rundkolbengröße gegeneinander aufgetragen.



**Abb. A18:** Beispiel für die Ergebnisdarstellung in der Sachbilanz (Seite "Sachbilanz Destillation")

Die Sachbilanz Ionenaustausch ist dreigeteilt. Zunächst ist der Gesamtsalzgehalt durch Kationenaustausch zu bestimmen (Abb. A19). Hierzu sind Angaben über den Verbrauch an Natronlauge vor und nach Kationenaustausch sowie die Konzentration und der Titer der Lauge notwendig. Als nächstes wird die Menge an entsalzbarem Trinkwasser pro Säule errechnet sowie der Bedarf an Washwasser (pro funktionelle Einheit) (Abb. A20). Abschließend wird die Säure-, Laugen- und Wassermenge für die Regeneration der Säule bestimmt (Abb. A21). Es müssen dafür die Austauscherkapazität der Säule, die Äquivalentkonzentration und die Washwasserbedarf pro Regeneration bekannt sein.

Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes durch Kationenaustausch	
Verbrauch an Natronlauge vor dem Kationenaustausch [pro	3,4 ml
Verbrauch an Natronlauge nach dem Kationenaustausch [pro	5,5 ml
Konzentration der Natronlauge	0,1 mmol/l
Titer der Natronlauge	0,984
Äquivalentgehalt (Kationen- bzw. Anionen)	4,1 mmol/l
Gesamtsalzgehalt	8,2 mmol/l

**Abb. A19:** Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes (Seite "Sachbilanz Ionenaustausch")

<b>Bestimmung der entsalzbaren Menge an Trinkwasser und Waschwasserbedarf</b>	
Menge entsalztes Trinkwasser [pro Säule]	50,0 ml
Bedarf Waschwasser [pro Säule]	34,0 ml
Austauscherkapazität der Säule	21,0 mval
Menge entsalzbares Trinkwasser [pro Säule]	5,1E+00 l
Bedarf Waschwasser [pro ml ention. Wasser]	6,6E-03 ml

**Abb. A20:** Bestimmung der Waschwassermenge (Seite "Sachbilanz Ionenaustausch")

<b>Bestimmung der Säure-, Laugen- und Wassermenge für die Regeneration</b>	
Massenkonzentration w (Säure bzw. Lauge)	3,0 %
Äquivalentgehalt (Kationen- bzw. Anionen)	4,1 mmol/l
Bedarf Säure bzw. Lauge [pro Säule]	28,0 ml
Bedarf Waschwasser [pro Säule]	100,0 ml
Bedarf Säure bzw. Lauge [pro ml ention. Wasser]	5,5E-03 ml
Belastung Natrium-Ionen [pro ml ention. Wasser]	9,4E-05 g
Bedarf Waschwasser [pro ml ention. Wasser]	2,0E-02 ml

**Abb. A21:** Bestimmung der Säure-, Laugen- und Wassermenge für Regeneration (Seite "Sachbilanz Ionenaustausch")

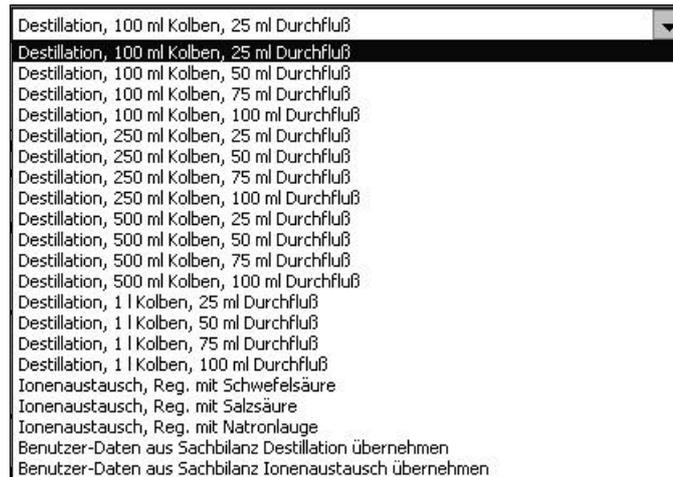
Die Wirkungsabschätzung zur Auswertung sind analog den vorhergehenden aufgebaut (Abb. A22). Dies gilt auch für die Diagramme zur Auswertung (z.B. Übersicht Gesamtbelastung), welche hier jedoch nicht abgebildet sind.

Umwelteinwirkung	Ökofaktor	Umwelteinwirkungen der Lebensphasen				Umweltbelastung (Anteil an Summe)
		Materialherstellung	Distribution	Herstellung ention. Wasser	Entsorgung	
<b>Energieverbrauch</b>						
Primärenergie	1,0 UB/MJ	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 MJ	0,0E+00 UB %
<b>Bodenverbrauch</b>						
Versiegelung	550,0 URP/m <sup>2</sup>	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 m <sup>2</sup>	0,0E+00 UB %
<b>Lärmmissionen</b>						
Straßenverkehr mit LKWs	1600,0 UB/km	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB
Straßenverkehr mit PKWs	140,0 UB/km	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB
Straßenverkehr (Mix)	210,0 UB/km	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB
Summe Lärm		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB %
<b>Luftmissionen</b>						
Chlorwasserstoff	47,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
FCKW	2000,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Kohlenstoffoxide (als CO <sub>2</sub> )	0,20 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	32,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Methan	4,2 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Schwefeloxide (als SO <sub>2</sub> )	53,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Stickstoffoxide (als NO <sub>2</sub> )	67,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Summe Luft		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB %
<b>Wassermissionen</b>						
Ammonium (in N)	54,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Chlorid (in Cl)	0,03 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	1,5E-04	0,0E+00 g	3,8E-06 UB
DOC (in C)	18,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Nitrat (in N)	16,00 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Phosphor (in P)	2000,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Sulfat	0,077 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Summe Wasser		0,0E+00	0,0E+00	1,5E-04	0,0E+00 g	3,8E-06 UB 100,0 %
<b>Deponieraumverbrauch</b>						
Reststoffdeponie (Siedlungsabfall)	0,50 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Untertagedeponie (Sonderabfall)	24,0 UB/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB
Summe Deponieraum		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB %
<b>Summe Lebensphasen [UBP]</b>		0,0E+00	0,0E+00	3,8E-06	0,0E+00	3,8E-06 UB
<b>Summe Lebensphasen [%]</b>				100,0		100,0 %
		Materialherstellung	Distribution	Herstellung ention. Wasser	Entsorgung	Summe Lebensweg

**Abb. A22:** Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz entionisiertes Wasser)

Das Listenfeld für das Laden vorgegebener Sachbilanzwerte beziehungsweise die Übernahme von Benutzereingaben ist in Abb. A23 dargestellt. Es lässt sich aus einer Vielzahl von Szenarien zur Destillation und Ionenaustausch eine auswählen, deren Daten dann automatisch in die Tabelle für die Wirkungsabschätzung übernommen werden.

Für die Destillation wird nur der Verbrauch an elektrischer Energie berücksichtigt. Beim Ionenaustausch entsteht durch den Einsatz von Natronlauge zur Regeneration keine Belastung. Mit Regeneration der Austauschersäule durch Salzsäure gelangen Chloridionen ins Abwasser. Wird stattdessen Schwefelsäure eingesetzt, kommt es zu einer Umweltbelastung durch Sulfationen. Sowohl Chlorid- als auch Sulfationen werden nach der Methode als umweltbelastend eingestuft.



**Abb. A23:** Listenfeld für das Laden von Standard-Daten und Übernahme von Benutzerdaten (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz entionisiertes Wasser)

Auch bei dieser Wirkungsabschätzung können verschiedene Diagramme zur Darstellung der Kategorieergebnisse geladen werden (analog zum Beispiel Ökobilanz Papier).

## A1.6 Ökobilanz Kunststoffe

Der Bereich "Ökobilanz Kunststoffe" dient zur Auswertung der Versuche zur Darstellung und zum Recycling von Kunststoffen. Exemplarisch aus der großen Gruppe der Polymere wurden der Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) und Polystyrol (PS) ausgewählt.

Der Bereich ist in sechs Teile aufgeteilt (Abb. A24). Zunächst gibt es eine gemeinsame Seite "Sachbilanz Herstellung" für PS und PMMA. Die Seiten für die Sachbilanz zum Recycling sind wiederum getrennt. Ebenfalls extra aufgeführt ist die Sachbilanz "Recycling durch Verbrennung". Es folgt abschließend die Wirkungsabschätzung.

<b>ÖKO - BILLY 3.0</b> <b>Ökobilanz Kunststoffe</b> Startseite	
<b>Sachbilanz Herstellung</b>	Auf der Basis experimenteller Daten wird eine Sachbilanz zur Herstellung von PS und PMMA erstellt
<b>Sachbilanz Recycling PMMA</b>	Auf der Basis experimenteller Daten entsteht eine Sachbilanz zum Recycling von PMMA
<b>Sachbilanz Recycling PS</b>	Auf der Basis experimenteller Daten wird eine Sachbilanz zum Recycling von PS erstellt
<b>Sachbilanz Recycling durch Verbrennung</b>	Auswertungshilfe zur Berechnung des Brennwertes durch Kalorimetrie
<b>Berechnung des Brennwertes</b>	Berechnungshilfe zur theoretischen Ermittlung des Brennwertes auf der Basis der chemischen Summenformel
<b>Wirkungsabschätzung</b>	Wirkungsabschätzung auf Grundlage der Sachbilanzen nach der Methode der UBP
<b>Hilfe</b>	Informationen zur Bedienung von Öko-Billy und zur Theorie der Ökobilanzierung
<b>Zoom-Faktor</b>	100% <input type="button" value="▼"/>

**Abb. A24:** Startseite des Bereiches "Ökobilanz Kunststoffe"

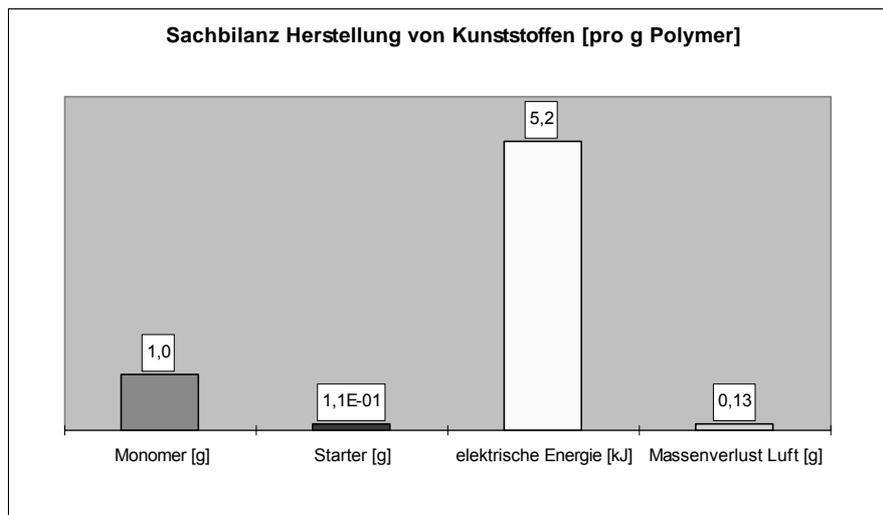
Auf der ersten Seite "Sachbilanz Herstellung" geschieht die Auswertung der Versuche zur Polymerisation von Styrol zu PS beziehungsweise Methacrylsäuremethylester zu PMMA (Abb. A25). Je nach Monomer bedarf es eines unterschiedlichen Starters. Dibenzoylperoxid wird für das Starten im Rahmen einer radikalischen Polymerisation eingesetzt, Eisen(III)-chlorid bei einer kationischen Polymerisation. Beim PMMA kann die Herkunft des Monomers unterschiedlich sein. Zum einen kann es industriell hergestelltes Monomer sein; zum anderen kann es aus einem Recyclingprozeß sein. Beim letzteren wird dann noch differenziert zwischen recyceltem industriellem PMMA-Material und recyceltem ehemals selbsthergestelltem PMMA.

Bis auf die kationische Polymerisation bedarf es bei allen anderen der Zufuhr thermischer Energie. Die leichter zu ermittelnde Angabe in der Einheit Wh wird automatisch in kJ umgerechnet. Während der Polymerisation entweicht ein gewisser Teil des Monomers. Dieser wird aus der Gewichts Differenz zwischen Polymer und Monomer errechnet. Notwendig dafür sind Massenangaben der Edukte und Produkte. Somit ergeben sich für die für die verschiedenen Arten der Polymerisation unterschiedliche Belastungen durch Energieverbrauch und Belastungen der Luft durch Kohlenwasserstoffe.

Alle Angaben der Sachbilanz werden direkt in relative Werte bezogen auf die funktionelle Einheit (g Polymer) umgerechnet. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden in einem Blockdiagramm dargestellt (Abb. A26).

Input/Output	Absoluter Wert	Relativer Wert
INPUT		
Methacrylsäure-methylester	9,4 g	1,0 g/g Polymer
Dibenzoylperoxid	1,0 g	1,1E-01 g/g Polymer
Verbrauch elektrische Energie	13,4 Wh	1,4 Wh/g Polymer
Verbrauch elektrische Energie	48,2 kJ	5,2 kJ/g Polymer
Verbrauch Primärenergie	1,4E-01 MJ	1,5E-02 MJ/g Polymer
OUTPUT		
Masse Polymer	9,3 g	
Massenverlust in die Luft	1,2 g	0,13 g/g Polymer

**Abb. A25:** Sachbilanz Kunststoff-Herstellung (Seite "Sachbilanz Herstellung")

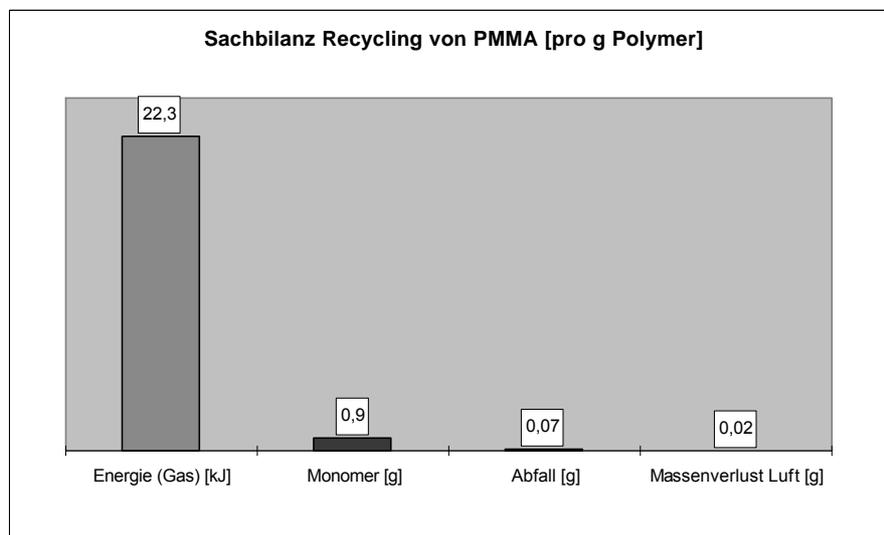


**Abb. A26:** Ergebnis für Kunststoff-Herstellung (Beispiel, "Seite Sachbilanz Herstellung")

Die nächsten Seiten in diesem Bereich behandeln das Recyceln der Kunststoffe PMMA und PS. Das PMMA, welches entweder neuwertig (das heißt gekauftes) Material oder selbst im Versuch hergestellt sein kann, wird durch Erhitzen über einem Brenner rohstofflich recycelt (Seite "Sachbilanz Recycling von PMMA", Abb. A27). Als Input-Daten sind die Edukt-Massen und der Gasverbrauch erforderlich. Aus dem Verbrauch an Erdgas wird automatisch die bei dem Versuch eingesetzte Heizenergie ermittelt. Aus der Differenz von dem gewonnenen Monomeren und dem beim Erhitzen übrig gebliebenem Kunststoff-Abfall wird der Massenverlust in die Luft errechnet. Die Kohlendioxid-Abgabe aufgrund der Verbrennung des Erdgases wird ebenfalls automatisch bestimmt. Die Ergebnisse werden wieder grafisch angezeigt (Abb. A28).

Input/Output	Absoluter Wert	Relativer Wert
INPUT		
PMMA	10,0 g	
Gasverbrauch	6,1 l	0,6 l/g Polymer
Gasverbrauch	4,0 g	0,7 g/g Polymer
Verbrauch Energie (Gas)	223,2 kJ	22,3 kJ/g Polymer
Verbrauch Primärenergie	2,5E-01 MJ	2,5E-02 MJ/g Polymer
OUTPUT		
Masse Monomer	9,2 g	0,9 g/g Polymer
Kunststoff-Abfall	0,7 g	0,07 g/g Polymer
Massenverlust in die Luft	0,2 g	0,02 g/g Polymer

**Abb. A27:** Sachbilanz für das Recycling von PMMA mit Wahl verschiedener Edukte (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling von PMMA")



**Abb. A28:** Ergebnis der Sachbilanz für das Recycling von PMMA (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling von PMMA")

Der Kunststoff Polystyrol (PS) kann durch Lösen in Cyclohexanon werkstofflich recycelt werden (Seite "Sachbilanz Recycling PS"). Das gelöste Polymer wird durch Abdestillation des Lösemittels zurückgewonnen. Das Lösemittel kann beliebig oft wieder eingesetzt werden. Die Sachbilanz ist in drei Teile geteilt. Der erste Teil behandelt das eigentliche

Lösen von PS-Granulat in Cyclohexanon (Abb. A29). Erforderlich sind Daten zu den Edukt-Mengen, zu dem Wasserbedarf für den Rückfluskkühler sowie für die elektrische Energie. Im zweiten Teil werden die Input-Output-Daten für den Rückgewinnungsprozeß des Lösemittels erhoben (Abb. A30). Notwendige Benutzerangaben sind für den Bedarf an Wasser (Liebigkühler) und an elektrischer Energie erforderlich. Weiterhin müssen die Masse des recycelten Lösemittels und des zurückgewonnenen PS gemacht werden. Zudem ist der Verlust an Lösemittel in die Luft (Verdunsten des restlichen Cyclohexanons aus dem Sekundär-Polystyrol) einzutragen.

Input/Output	Absoluter Wert	Relativer Wert
<b>1. Lösen von PS-Abfällen im Lösemittel</b>		
INPUT		
PS	<b>5,0 g</b>	
Cyclohexanon	<b>50,0 ml</b>	10,0 ml/g Polymer
Cyclohexanon	47,5 g	9,5 g/g Polymer
Wasserbedarf für Rückfluskkühler	<b>9,3 l</b>	1,9 l/g Polymer
elektrische Energie zum Lösen von PS	<b>36,4 Wh</b>	7,3 Wh/g Polymer
elektrische Energie zum Lösen von PS	131,0 kJ	26,2 kJ/g Polymer
OUTPUT		
PS-Cyclohexanon-Gemisch	52,5 g	

**Abb. A29:** Teil 1 der Sachbilanz für das Recycling von PS (Seite "Sachbilanz Recycling von PS")

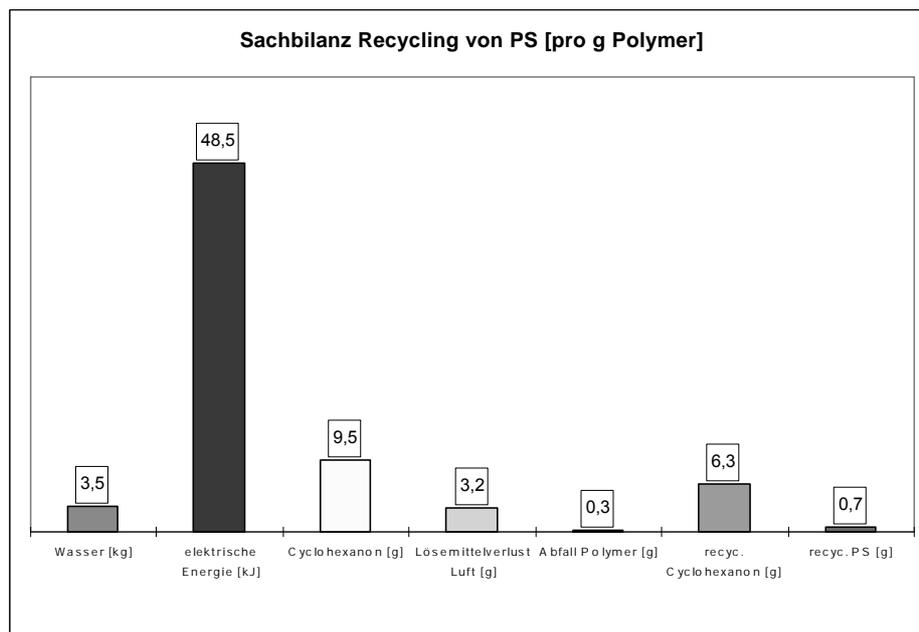
2. Rückgewinnung des gelösten PS durch Abdestillieren des Lösemittels		
INPUT		
PS-Cyclohexanon-Gemisch	52,5 g	
Wasserbedarf für Liebigkühler	8,0 l	1,6 l/g Polymer
elektrische Energie zur Destillation	31,0 Wh	6,2 Wh/g Polymer
elektrische Energie zur Destillation	111,6 kJ	22,3 kJ/g Polymer
OUTPUT		
recyceltes Cyclohexanon	33,0 ml	6,6 ml/g Polymer
recyceltes Cyclohexanon	31,4 g	6,3 g/g Polymer
Lösemittelverlust in die Luft	17,0 ml	3,4 ml/g Polymer
Lösemittelverlust in die Luft	16,2 g	3,2 g/g Polymer
recyceltes PS	3,5 g	0,7 g/g Polymer
Abfall Polymer	1,5 g	0,3 g/g Polymer

**Abb. A30:** Teil 2 der Sachbilanz für das Recycling von PS (Seite "Sachbilanz Recycling von PS")

Die wichtigsten Ergebnisse von Teil 1 und 2 werden in einer Zusammenfassung erfaßt (Abb. A31) und grafisch in einem Diagramm ausgewiesen (Abb. A32).

Zusammenfassung		
INPUT		
Wasser	17,3 kg	3,5 kg/g Polymer
Verbrauch elektrische Energie	242,6 kJ	48,5 kJ/g Polymer
Verbrauch Primärenergie	0,7 MJ	0,1 MJ/Polymer
Cyclohexanon	47,5 g	9,5 g/g Polymer
OUTPUT		
Lösemittelverlust in die Luft	16,2 g	3,2 g/g Polymer
Abfall Polymer	1,5 g	0,3 g/g Polymer
recyceltes Cyclohexanon	31,4 g	6,3 g/g Polymer
recyceltes PS	3,5 g	0,7 g/g Polymer

**Abb. A31:** Zusammenfassung der Sachbilanz für das Recycling von PS (Seite "Sachbilanz Recycling von PS")



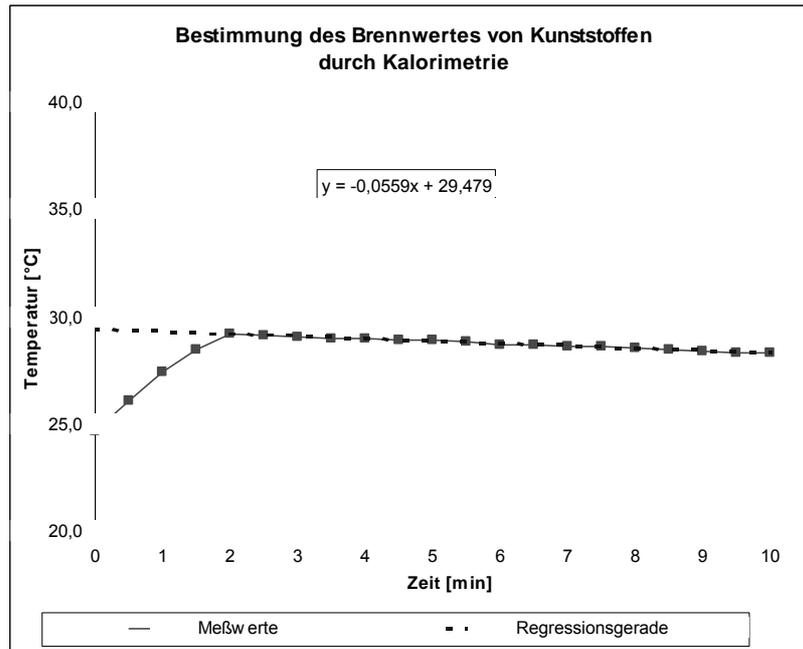
**Abb. A32:** Ergebnis der Sachbilanz für das Recycling von PS durch Lösen (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling von PS")

Kunststoffe können nicht nur rohstofflich (Beispiel PMMA) oder werkstofflich (Beispiel PS) recycelt werden. Bei einem energetischem Recyceln wird durch Verbrennung der Kunststoffe Energie freigesetzt. Zur Bestimmung dieser Energiemenge, der Verbrennungsenthalpie, wird das Verfahren der Kalorimetrie benutzt (Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung"). Eine definierte Menge eines brennbaren Stoffes (beispielsweise Kunststoff

oder Papier) wird in einem Reagenzglas ähnlichem Hohlgefäß verbrannt, welches in einem Wasserbad steht. Zur besseren Verbrennung wird Sauerstoff zugeführt. Die Verbrennungsgase werden durch ein Kupferrohr durch das Wasserbad nach draußen geleitet. Aus der Temperaturerhöhung, welche das Wasserbad während und nach der Verbrennung erfährt, kann die Verbrennungsenthalpie ermittelt (Abb. A33). Die Meßpunkte werden in ÖKO-BILLY grafisch aufgetragen. Die Regressionsgerade (mit Achsenabschnitt) wird bestimmt und ebenfalls angezeigt (Abb. A34). Unter Angabe der spezifischen Wärmekapazitäten  $c_p$  und der Massen des Eduktes, des Verbrennungsrückstandes und der mit dem Wasserbad in Berührung kommenden Teile des Versuchsaufbaus kann dann die Verbrennungsenthalpie ausgerechnet werden (Abb. A35).

Zeit-Temperatur-Kurve		Regressionsgerade	
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
0	24,7	0	
0,5	26,1	0,5	
1	27,4	1	
1,5	28,5	1,5	
2	29,2	2	
2,5	29,2	2,5	29,2
3	29,1	3	29,1
3,5	29,0	3,5	29,0
4	29,0	4	29,0
4,5	28,9	4,5	28,9
5	28,9	5	28,9
5,5	28,9	5,5	28,9
6	28,7	6	28,7
6,5	28,7	6,5	28,7
7	28,6	7	28,6
7,5	28,6	7,5	28,6
8	28,6	8	28,6
8,5	28,5	8,5	28,5
9	28,4	9	28,4
9,5	28,4	9,5	28,4
10	28,4	10	28,4

**Abb. A33:** Meßwerte für die Zeit-Temperatur-Kurve zum Aufstellen der Regressionsgeraden bei der Kalorimetrie (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung")



**Abb. A34:** Zeit-Temperatur-Kurve mit Regressionsgeraden sowie Geradengleichung (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung")

<b>spezif. Wärmekapazität [J/(g*K)]</b>	
$c_p$ (Kupfer)	0,385 J/(g*K)
$c_p$ (Glas)	0,847 J/(g*K)
$c_p$ (Wasser)	4,190 J/(g*K)
<b>Masse [g]</b>	
m(Kupfer)	83,658 g
m(Gummi)	0,487 g
m(Becher+Rührer)	50,195 g
m(Glas)	41,379 g
m(Wasser+Becher+Rührer)	433,322 g
m(Kohle)	0,100 g
m(Kunststoff)	0,189 g
<b>Molmasse [g/mol]</b>	
Kohlenstoff	12,011 g/mol
<b>Temperaturdifferenz [K]</b>	
Delta T	5,0 K
<b>Wärmemenge [J]</b>	
Q	-5113,7 J
<b>Brennwert (oberer Heizwert) [MJ/kg]</b>	
$H_o$	-27,1 MJ/kg
<b>Brennwert (oberer Heizwert) Literaturangabe [MJ/kg]</b>	
$H_o$	-41,0 MJ/kg
<b>Abweichung vom Literaturwert [%]</b>	
	34,0 %

**Abb. A35:** Berechnung der Verbrennungsenthalpie (Beispiel, Seite "Sachbilanz Recycling durch Verbrennung")

Werden andere Kunststoffe außer PS und PMMA verbrannt, so müssen für die Wirkungsabschätzung die Menge an freigesetztem Kohlendioxid sowie an Abfall bekannt sein, da diese Größen mit ÖKO-BILLY nicht berechnet werden können.

Die Berechnung des Brennwertes über Kalorimetrie ist zeit- und arbeitsaufwendig. Für eine Näherungsberechnung bei Kohlenwasserstoffen kann die Formel nach BRAUN herangezogen werden (Seite "Berechnung des Brennwertes", Abb. A36). Es ist hierzu lediglich die Angabe der Summenformel erforderlich. Der Brenn- beziehungsweise Heizwert wird automatisch ermittelt. Bei Angabe eines Literaturwertes (in der Regel Herstellerangabe) wird die prozentuale Abweichung des Näherungswertes ermittelt. Über das Listenfeld können vorgegebene Beispiel-Daten

<b>Kunststoff</b>	PS (Hüls) ▼				
<b>Summenformel</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>O</b>
	8	8	0	0	0
Herstellerangabe			45,0 MJ/kg		
Molmasse Kunststoff			104,2 g/mol		
Berechneter Brennwert $H_O$			-39,4 MJ/kg		
Berechneter Heizwert $H_U$			-37,6 MJ/kg		
Abweichung des Brennwertes von Herstellerangabe			187,5 %		

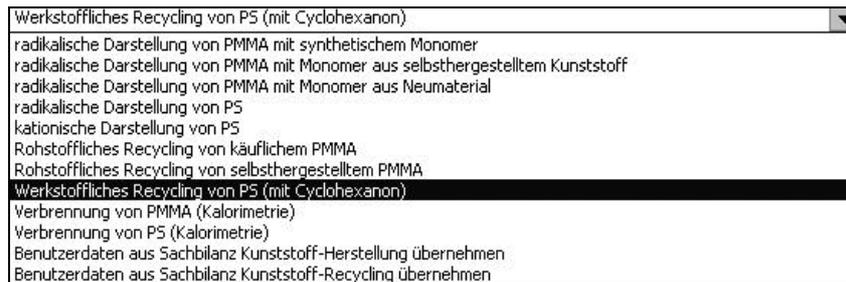
**Abb. A36:** Näherungsberechnung des Brennwertes und Heizwertes für Kohlenwasserstoffe nach BRAUN (Seite "Berechnung des Brennwertes")

Die Wirkungsabschätzung für die Ökobilanz Kunststoffe ist analog den vorhergehenden aufgebaut (Seite "Wirkungsabschätzung", Abb. A37). Dies gilt auch für die Diagramme zur Auswertung (z.B. Übersicht Gesamtbelastung), welche hier jedoch nicht abgebildet sind.

Benutzerdaten aus Sachbilanz Kunststoff-Herstellung übernehmen		PMMA radikalisch mit synthetischem Monomer				
Umwelteinwirkung	Ökofaktor	Umwelteinwirkungen der Lebensphasen				Umweltbelastung (Anteil an Summe)
		Materialherstellung	Distribution	Herstellung	Entsorgung	
<b>Energieverbrauch</b>						
Primärenergie	1,0 UB/P/MJ	0,0E+00	0,0E+00	1,5E-02	0,0E+00 MJ	1,5E-02 UB/P 0,4 %
<b>Bodenverbrauch</b>						
Versiegelung	550,0 UB/P/m <sup>2</sup>	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 m <sup>2</sup>	0,0E+00 UB/P %
<b>Lärmmissionen</b>						
Straßenverkehr mit LKWs	1600,0 UB/P/km	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB/P
Straßenverkehr mit PKWs	140,0 UB/P/km	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB/P
Straßenverkehr (Mix)	210,0 UB/P/km	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB/P
Summe Lärm		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 km	0,0E+00 UB/P %
<b>Luftmissionen</b>						
Chlorwasserstoff	47,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
FCKW	2000,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Kohlenstoffoxide (als CO <sub>2</sub> )	0,20 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	32,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	1,3E-01	0,0E+00 g	4,0E+00 UB/P
Methan	4,2 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Schwefeloxide (als SO <sub>2</sub> )	53,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Stickstoffoxide (als NO <sub>2</sub> )	67,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Summe Luft		0,0E+00	0,0E+00	1,3E-01	0,0E+00 g	4,0E+00 UB/P 99,6 %
<b>Wassermissionen</b>						
Ammonium (in N)	54,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Chlorid (in Cl)	0,026 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
DOC (in C)	18,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Nitrat (in N)	16,00 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Phosphor (in P)	2000,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Sulfat	0,077 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Summe Wasser		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P %
<b>Deponieraumverbrauch</b>						
Reststoffdeponie (Siedlungsabfall)	0,5 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Untertagedeponie (Sonderabfall)	24,0 UB/P/g	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P
Summe Deponieraum		0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00 g	0,0E+00 UB/P %
<b>Summe Lebensphasen [UBP]</b>		0,0E+00	0,0E+00	4,1E+00	0,0E+00	4,1E+00 UB/P
<b>Summe Lebensphasen [%]</b>				100,0		100,0 %
		Materialherstellung	Distribution	Herstellung	Entsorgung	Summe Lebensweg

Abb. A37: Wirkungsabschätzung (Seite "Wirkungsabschätzung" – Ökobilanz Kunststoffe)

Für den Fall, daß vom Benutzer selbst eingegebene Daten (Benutzerdaten) aus der Sachbilanz übernommen wurden, wird rechts oberhalb der Tabelle für die Wirkungsabschätzung in Kurzform mitgeteilt, welche Daten geladen wurden. Abb. A38 zeigt das Listenfeld der Wirkungsabschätzung zum Laden vorgegebener Sachbilanz-Werte oder zur Übernahme von Benutzerdaten.



**Abb. A38:** Listenfeld für das Laden vorgegebener Sachbilanz-Werte oder Übernahme von Benutzerdaten (Seite "Wirkungsabschätzung")

Auch bei dieser Wirkungsabschätzung können verschiedene Diagramme zur grafischen Auswertung der Kategorieergebnisse geladen werden (analog zum Beispiel Ökobilanz Papier).

## A1.7 Die Hilfe-Datei

Die Hilfe-Datei zu ÖKO-BILLY (hilfe.htm) ist eine HTML-Datei, welche die wesentlichen Inhalte zu ÖKO-BILLY und zur Theorie der Ökobilanzierung enthält. HTML ist eine Dokumentenbeschreibungssprache (Hypertext Markup Language) und bietet die Möglichkeit, Verweise (Hyperlinks) zu definieren. Mittels solcher Hyperlinks ist beispielsweise ein einfaches Navigieren im Text sowie der Verweis auf andere Internet-Seiten möglich, die dann direkt aus dem Text heraus aufgerufen werden können.

Inhaltliche Grundlagen sind die Kapitel 2, 3 und 5.

Die Hilfe von ÖKO-BILLY gehören:

- eine kurze didaktische Einführung,
- Hinweise zur Installation und Bedienung,
- Erläuterungen zum Aufbau einer Ökobilanz, dem Primärenergieaufwand und zur Methode der Umweltbelastungspunkte
- sowie Möglichkeiten zum Bezug der Dissertationsschrift und der Kontaktaufnahme zum Autor.

Die Hilfe wird bei Aufruf über das ÖKO-BILLY-Menü, die Symbolleiste oder der Befehlschaltfläche gestartet. Es öffnet sich automatisch ein Browser, der die Hilfe-Datei darstellt.



## **Anhang 2: Hintergrundberechnungen in ÖKO-BILLY**

A2.1	Einführung .....	A34
A2.2	Blanko-Wirkungsabschätzung.....	A35
A2.3	Ökobilanz Papier .....	A36
A2.4	Ökobilanz entionisiertes Wasser .....	A36
A2.5	Ökobilanz Kunststoffe .....	A38

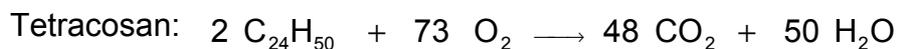
## Anhang 2: Hintergrundberechnungen in ÖKO-BILLY

Innerhalb des ÖKO-BILLY-Programms wurden eine Vielzahl von Berechnungen automatisiert. Das sind zum Beispiel Formeln in Zellen, welche sofort das entsprechende Ergebnis liefern. Es können aber auch über Makros Werte in Tabellen eingeladen werden (beispielsweise auf den Seiten für die Wirkungsabschätzung). Dies ist notwendig, um die Auswertung der Versuche zu vereinfachen und die Erstellung der Ökobilanz zu beschleunigen. Dennoch ist es aus Gründen der Transparenz und des Verständnisses erforderlich, die Berechnungen zu kennen. Im folgenden sollen daher die Hintergrundberechnungen erläutert werden.

### A1.8 Einführung

#### Seite Einführung Sachbilanz

Es wird beispielhaft eine Kerze aus 20 g Paraffin und 0,2 g Baumwolldocht angenommen. Weiterhin wird davon ausgegangen, daß das Paraffin der Kerze und der Baumwolldocht vollständig zu Kohlendioxid und Wasser verbrennen. Für das Hartparaffin wird stellvertretend n-Tetracosan ( $C_{24}H_{50}$ ) mit einem Schmelzpunkt von 54 °C angenommen. Baumwolle besteht zu 90 % aus Cellulose (Rest ebenfalls vernachlässigt). Die angegebenen Mengen Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasser stammen aus stöchiometrischen Berechnungen.



Vom System abgegebene Energie erhält ein negatives Vorzeichen, aufgenommene Energie ein positives. Der Heizwert ist näherungsweise über die Formel nach BRAUN ermittelt (Abschnitt 4.3.3.3).

#### Seite Einführung Wirkungsabschätzung

Die Methode der Umweltbelastungspunkte ist bereits ausführlich vorgestellt worden (Abschnitt 2.8). Hier soll lediglich das Berechnungsverfahren erläutert werden.

Die Beurteilung einer Umweltbelastung (beispielsweise einer Emission) erfolgt mathematisch durch Multiplikation der Belastung (etwa Masse der Emission in kg) mit einem Ökofaktor. Dieser ist ein Zahlenwert, in dem zum Ausdruck kommt, wie sehr die Umwelt belastet werden darf.

In die Berechnung des Ökofaktors für eine Umweltbelastung fließen Ist-Flüsse  $F$  (gegenwärtige Belastungen) und Kritische Flüsse  $F_k$  (angestrebte Belastung) ein. Eine dimensionslose Konstante  $c$  ( $10^{12}$ ) dient zur Vermeidung hoher negativer Potenzen.

Je höher der Zahlenwert für das Ergebnis der Multiplikation von Umweltbelastung und Ökofaktor, desto größer ist letztlich die betrachtete Umweltbelastung. Die Einheit sind Umweltbelastungspunkte (UBP).

$$\text{Ökofaktor} = \frac{1}{F_k} \times \frac{F}{F_k} \times c$$

Ökofaktor                    Maß für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung [z. B. UBP/kg]

F<sub>k</sub>                            Kritischer Fluß [z. B. kg/a]

F                              Ist-Fluß [z. B. kg/a]

c                                10<sup>12</sup> /a-Konstante

$$\text{Umweltbelastungskennzahl} = \text{Ökofaktor} \times \text{Umwelteinwirkung}$$

Umweltbelastungskennzahl    Maß für die Umweltbelastung [UBP]

Ökofaktor                    Maß für die potentielle ökologische Schädlichkeit einer Umwelteinwirkung [z. B. UBP/kg]

Umwelteinwirkung          Sachbilanzposition [z. B. kg]

Für das Beispiel Kerze werden nur die Kohlendioxid-Abgabe sowie der Energieverbrauch im Hinblick auf seine Umweltbelastungen berücksichtigt. Die Entnahme von Sauerstoff sowie die Wasserabgabe aus der Verbrennung werden nicht als umweltbelastend eingestuft.

Die Ökofaktoren sowie die Umwelteinwirkungen beziehen sich zwar formal auf ein Jahr, jedoch kann jede beliebige Einwirkung als einmaliges Ereignis im Jahr angesehen werden. Es muß daher bei einem diskontinuierlichen Prozeß (zum Beispiel Abbrennen eines Streichholzes) nicht auf ein Jahr hochgerechnet werden.

## A1.9 Blanko-Wirkungsabschätzung

### Seite Blanko-Wirkungsabschätzung

Mittels dieser Tabelle können auf Basis der Methode der Umweltbelastungspunkte verschiedenartige Umweltbelastungen ermittelt werden. Es ist nur die Eingabe der zu beurteilenden Umwelteinwirkung erforderlich.

Der Vorteil der Methode liegt darin, daß nicht nur gleichartige Umwelteinwirkungen (etwa Wasserbelastungen), sondern auch unterschiedliche (beispielsweise Luftbelastung und Deponieraumverbrauch) über die Umweltbelastungspunkte miteinander addiert werden können. Es können jedoch nur solche Einwirkungen im Rahmen der Methode untersucht werden, die als umweltbelastend eingestuft wurden. Nur für diese existiert auch ein Ökofaktor.

## A1.10 Ökobilanz Papier

### Seite Sachbilanz (kompakt)

Hier werden für die Lebenswegabschnitte von Papier die jeweils für eine Papiersorte ausgewählten Inputs/Outputs aufgeführt und zu einem Gesamtergebnis aufaddiert. Grundlage sind die auf der Seite "Sachbilanz Tabelle" Daten, welche jeweils für einen Input oder Output zusammengefasst wurden. Ein Energiegewinn aus der Verbrennung (Entsorgung von weißem Papier) wird mit einem Energieverbrauch verrechnet.

### Seite Wirkungsabschätzung

Die Umweltbelastung (genauer Umweltbelastungskennzahl) ist das Produkt von Ökofaktor und Umwelteinwirkung. Die letzteren sind entsprechend den betrachteten Lebenswegabschnitte nochmals untergliedert. Somit können die Gesamt-Belastungen für eine Kategorie entweder über einen Abschnitt aufaddiert werden (zum Beispiel alle Luftbelastungen bei der Materialherstellung), oder aber auch anteilmäßig untersucht werden (beispielsweise unterschiedliche Stickoxid-Emissionen in allen Lebenswegphasen).

Die Prozentangaben geben jeweils den Anteil der Kategorie an der Gesamtbelastung an, um so zu einer Aussage zu kommen, welchen Beitrag etwa der Energieverbrauch an der Gesamtbelastung ausmacht. Es werden nur Prozentzahlen angezeigt, welcher größer als Null sind. Zahlen kleiner Null werden generell in rot dargestellt. Vom Benutzer editierbare Daten sind in blau gehalten. Werden die vorgegebenen Daten verändert, so erscheinen sie automatisch in fetter Schrift.

## A1.11 Ökobilanz entionisiertes Wasser

### Seite Sachbilanz Destillation

Ziel dieser Seite ist die Erfassung der Inputs und Outputs der Destillation. Der Input elektrische Energie (Wh/min) wird automatisch in kJ pro ml Destillatmenge umgerechnet (1 Wh gleich 3,6 kJ).

Die mit dem Kühlwasser abgeführte Abwärme errechnet sich aus der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, der Kühlwassermenge sowie der Erwärmung des Kühlwassers (ausgedrückt als Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser und einem fiktivem Gewässer).

$$W = C_p \times m \times \Delta T$$

W mit dem Kühlwasser abgegebene Energiemenge bezogen auf 1 ml Destillat [J]

$C_p$  Spezifische Wärmekapazität von Wasser bei konstantem Druck [J/(g\*K)]

m Kühlwassermenge pro ml Destillat [g/ml Destillat]

$\Delta T$  Temperaturdifferenz zwischen dem Kühlwasser ( $T_2$ ) und eines fiktiven Gewässers ( $T_1$ ) [K]

Bei der Berechnung wird von einer Gewässertemperatur  $T_1$  mit 10 °C ausgegangen. Für  $C_p$  wurde für den Temperaturbereich von 10 bis 50 °C ein Wert von 4,18 J/(g\*K) angenommen, welcher für die Schule eine ausreichende Genauigkeit besitzt. Für die Kühlwassermenge  $m$  wurde eine Dichte von 1,0 g/cm<sup>3</sup> angenommen.

## Seite Sachbilanz Ionenaustausch

Zunächst erfolgt eine Bestimmung des Gesamtsalzgehaltes der Probe. Hierzu versetzt man eine aufgekochte Wasserprobe mit einer definierten Menge Titrisol-Salzsäure und schickt eine Hälfte der Lösung über einen Kationenaustauscher. Die andere bleibt unverändert. Beide werden mit Titrisol-Natronlauge titriert. Den Verbrauch an Natronlauge beider Titrationen, also vor und nach dem Ionenaustausch, setzt man nun zueinander in Beziehung. Unter Berücksichtigung des Verbrauchs an Natronlauge, ihrer Konzentration sowie des Titors gilt für den Gehalt  $M_k$  an Kationen in einem Liter Wasser:

$$M_k = (b - a) \times 20 \times c \times t$$

$M_k$     Gehalt an Kationen [mol/l]

a        Verbrauch an Natronlauge vor dem Kationenaustausch [l]

b        Verbrauch an Natronlauge nach dem Kationenaustausch [l]

c        Konzentration der Natronlauge [mol/l]

t        Titer der Natronlauge

In der nächsten Stufe erfolgt die Berechnung der maximal möglichen Gesamtmenge an Trinkwasser, welches mit einer Säulenfüllung entsalzt werden kann, sowie die dafür notwendige Menge an Waschwasser zum Waschen der Säule. Hierfür bedarf es Angaben zur Menge an entsalztem Trinkwasser pro Durchlauf, der verwendeten Menge an Waschwasser sowie der bekannten Austauscherkapazität der Säule. Die Menge an zu entsalzendem Trinkwasser pro Säule ist direkt aus dem Verhältnis Austauscherkapazität der Säule und Äquivalentgehalt (an Kationen beziehungsweise Anionen) zu bestimmen. Der Bedarf an Waschwasser für die Entsalzung wird proportional über die Waschwassermenge aus einem Durchlauf ermittelt. Nach einem vollständigen Austausch ist die Säule zu regenerieren. Der Kationenaustauscher wird mit einer Salzsäure- oder Schwefelsäurelösung behandelt (Beladen mit Protonen); der Anionenaustauscher mit Natronlauge (Beladen mit Hydroxidionen).

$$\text{HCl} = \text{GK} \times 36,5$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{GK} \times 60$$

$$\text{NaOH} = \text{GA} \times 40$$

HCl	Masse Salzsäure (w(HCl) = 100 %) [g/m <sup>3</sup> ]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Masse Schwefelsäure (w(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) = 100 %) [g/m <sup>3</sup> ]
NaOH	Masse Natronlauge (w(NaOH) = 100 %) [g/m <sup>3</sup> ]
GK	Gesamtkationen [mmol/l bzw. mval/kg]
GA	Gesamtanionen [mmol/l bzw. mval/kg]

Die jeweils errechnete Menge bezieht sich immer auf eine Massenkonzentration von  $w = 100 \%$  und ist auf den Gehalt der vorliegenden Handelskonzentration umzurechnen. Der erste Faktor gibt den Gesamtgehalt an Kationen bzw. Anionen an. Es wird mit einem Wert für Gesamtkationen bzw. –anionen von 4,2 mmol/l gearbeitet. Der zweite Faktor entspricht der Äquivalentkonzentration. Diese ist für Salzsäure und Natronlauge gleich der Molmasse. Für Schwefelsäure, die verdünnt nicht voll dissoziiert vorliegt, wird statt einer Äquivalentkonzentration von 49 mit 60 gerechnet.

Der Bedarf an Säure beziehungsweise Lauge pro ml entionisiertes Wasser wird aus proportional aus dem Verhältnis des Säure-Bedarfs für die Regeneration einer Säulenfüllung sowie der Menge an entsalztem Wasser pro Säule ermittelt.

Mit dem Einsatz der Regeneriermittel gelangen auch die dort enthaltenen Sulfat-, Chlorid- oder Natrium-Ionen ins Abwasser. Ihre Menge wird aus der eingesetzten Masse an Säuren und Laugen bestimmt.

### **Seite Wirkungsabschätzung**

Die Umweltbelastung (genauer Umweltbelastungskennzahl) ist das Produkt von Ökofaktor und Umwelteinwirkung. Die letzteren sind entsprechend den betrachteten Lebenswegabschnitte nochmals untergliedert. Somit können die Gesamt-Belastungen für eine Kategorie entweder über einen Abschnitt aufaddiert werden (zum Beispiel alle Luftemissionen bei der Materialherstellung), oder aber auch anteilmäßig untersucht werden (beispielsweise unterschiedliche Stickoxid-Emissionen in allen Lebenswegphasen).

Die Prozentangaben geben jeweils den Anteil der Kategorie an der Gesamtbelastung an, um so zu einer Aussage zu kommen, welchen Beitrag etwa der Energieverbrauch an der Gesamtbelastung ausmacht. Es werden nur Prozentzahlen angezeigt, welcher größer als Null sind. Zahlen kleiner Null werden generell in rot dargestellt. Vom Benutzer editierbare Daten sind in blau gehalten. Werden die vorgegebenen Daten verändert, so erscheinen sie automatisch in fetter Schrift.

## **A1.12 Ökobilanz Kunststoffe**

### **Seite Sachbilanz Herstellung**

Im Rahmen der Herstellung von Kunststoffen werden verschiedene Fälle betrachtet:

- PMMA durch radikalische Polymerisation von industriell hergestelltem Monomer
- PMMA durch radikalische Polymerisation von Monomer aus ursprünglich selbsthergestelltem PMMA
- PMMA durch radikalische Polymerisation von Monomer aus industriell hergestelltem PMMA
- PS durch radikalische Polymerisation
- PS durch kationische Polymerisation

Bei der Dateneingabe ist ein Fall auszuwählen. Es können die vorgegebenen Input-Output-Daten verwendet werden oder es werden eigene eingesetzt. Beispielsweise sind für die Darstellung von PMMA durch radikalische Polymerisation der Verbrauch an Methacrylsäuremethylester, Dibenzoylperoxid und elektrischer Energie einzutragen. Die Umrechnung von der Einheit Wh in kJ erfolgt automatisch (1 Wh gleich 3,6 kJ). Ferner ist auch die Masse des Polymers als Output anzugeben. Hieraus wird der Massenverlust an Monomerem als Luftbelastung während der Polymerisation bestimmt (Differenz der Input minus Output-Massen).

Die Umrechnung der absoluten Angaben in relative erfolgt ebenfalls automatisch. Bezugsgröße (funktionelle Einheit) ist 1 g Polymer als Output (gleich hergestellter Kunststoff).

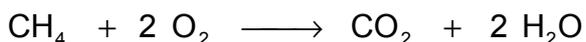
### Seite Sachbilanz Recycling PMMA

Für die thermische Depolymerisation kann zwischen zwei unterschiedlichen Edukten gewählt werden:

- Edukt ist selbsthergestelltes PMMA
- Edukt ist industriell hergestelltes PMMA

Als Input-Daten sind der Verbrauch von PMMA und Erdgas anzugeben. Der Gasverbrauch wird aus der Angabe in Liter nach Gramm sowie Kilo-Joule umgerechnet. Die Verbrennungsenthalpie  $\Delta H$  von Methan beträgt - 890,8 kJ/mol. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung errechnet sich ein Molvolumen von 24,5 l bei einer Temperatur von 25 °C. Der Brenner verbraucht beispielsweise 2 l Erdgas pro Minute. Daraus ergibt sich ein Energieverbrauch von 73 kJ/min.

Als Output-Daten sind die Massen des gewonnenen Monomers und des übrig gebliebenen Kunststoff-Abfalls einzutragen. Die Berechnung der freigesetzten Kohlendioxid-Menge beruht auf der Annahme, daß Erdgas nur aus Methan besteht und dieses vollständig zu Kohlendioxid und Wasser verbrennt.



Der Massenverlust in die Luft ist die Massendifferenz zwischen eingesetztem Kunststoff und der Summe der Massen des gewonnenen Monomers sowie des Abfalls.

Die Umrechnung der absoluten Angaben in relative erfolgt ebenfalls automatisch. Die Bezugsgröße (funktionelle Einheit) ist bei den Recyclingprozessen auch 1 g Polymer, bezieht sich aber auf den Input (zum Recycling eingesetzter Kunststoff).

### Seite Sachbilanz Recycling PS

Das Recycling von Polystyrol (PS) erfolgt in zwei Schritten. Zunächst ist der Kunststoff unter Rückfluß in Cyclohexanon zu lösen. Das Lösemittel wird durch Destillation zurückgewonnen werden. Als "Zwischenprodukt" entsteht ein PS-Cyclohexanon-Gemisch. Dieses ist Output vom ersten Schritt beziehungsweise Input vom zweiten.

Als Input des ersten Recyclingschrittes sind die Menge des eingesetzten Polystyrols, des Lösemittels, der Wasserbedarf des Rückflußkühlers sowie die elektrische Energie für das

Erwärmen des PS-Cyclohexanon-Gemisches einzutragen. Die Massenangabe für den Cyclohexanon wird von Milliliter automatisch in Gramm umgerechnet (Dichte 0,95). Die Angabe für den Wasserverbrauch wird von Litern nach Gramm umgewandelt (Dichte 1). Die Umrechnung der elektrischen Energie von der Einheit Watt-Stunden in Kilo-Joule erfolgt ebenfalls automatisch (1 Wh gleich 3,6 kJ).

Für den zweiten Recyclingschritt müssen Angaben zu dem Wasserbedarf für den Rückflußkühler gemacht werden. Diese werden zunächst in Litern angegeben und dann in Gramm umgerechnet. Zudem ist der Bedarf an elektrischer Energie zu nennen (Watt-Stunden beziehungsweise Kilo-Joule). Die Menge an PS- Cyclohexanon -Gemisch wird automatisch aus dem ersten Recyclingschritt übernommen. Als Output ist die Menge recycelten Cyclohexanon einzutragen sowie die Lösemittelverluste in die Luft. Die Angaben erfolgen zunächst in Milliliter, werden jedoch in Gramm umgerechnet.

In der Zusammenfassung werden die wesentlichen Daten aus dem ersten und zweiten Recyclingschritt zusammengeführt::

- Energie-Input [kJ]
- Wasser-Input [kg]
- Cyclohexanon -Input [g]
- Massenverlust Cyclohexanon in die Luft [g]
- Menge recyceltes PS [g]

Die Umrechnung der absoluten Angaben in relative erfolgt ebenfalls automatisch. Die Bezugsgröße (funktionelle Einheit) ist bei den Recyclingprozessen auch 1 g Polymer, bezieht sich aber auf den zum Recycling eingesetzten Kunststoff.

### **Seite Sachbilanz Recycling durch Verbrennung**

Das energetische Recycling (Verbrennung) von Kunststoffen wird über die kalorimetrische Bestimmung des Brennwertes simuliert (Abschnitt 4.3.3.3). Für die Erstellung der Zeit-Temperatur-Kurve sind zu den vorgegebenen ½Minuten-Abständen die jeweilige Temperatur des Wasserbades zuzuordnen. Zum Erstellung der Regressionsgeraden werden auf Knopfdruck die eingegebenen Daten in eine andere Spalte kopiert. Diejenigen Meßwerte, welche nicht für die Berechnung der Regressionsgeraden verwendet werden sollen, müssen von Hand gelöscht werden. Die Regressionsgerade erscheint dann samt Geradengleichung im Diagramm.

Für die Berechnung der Verbrennungsenthalpie beziehungsweise des Brennwertes müssen die Massen der Kupfer-Teile, der Gummi-Stücke (Schläuche), des Bechers, des Rührers, der Glas-Anteile sowie die eingesetzten Mengen Wasser, Kohle und Kunststoff bekannt sein. Ferner ist auch der Wert für die Temperaturdifferenz des Wasserbades (vor beziehungsweise nach der erfolgten Verbrennung) notwendig, welcher sich aus dem Achsenabschnitt der Geradengleichung abzüglich der Anfangstemperatur bestimmen läßt. Alle diese Angaben sind in die entsprechenden Felder einzugeben. Die spezifischen Wärmekapazitäten von Kupfer, Glas und Wasser sowie die Molmasse von Kohlenstoff sind bereits vorgegeben.

Die vom System abgegebene Wärmemenge  $Q$  während der Verbrennung des Kunststoffes errechnet sich folgendermaßen:

$$Q = -\Delta T \times [m(\text{H}_2\text{O}) \times c_p(\text{H}_2\text{O}) + m(\text{Cu}) \times c_p(\text{Cu}) + m(\text{Glas}) \times c_p(\text{Glas})] - \frac{\Delta H(\text{Kohle}) \times m(\text{Kohle})}{M(\text{Kohle})}$$

$c_p(X)$	spezifische Wärmekapazität	Variablen (bezogen auf oben aufgeführte Beispiel):
$m(X)$	Masse	
$M(X)$	Molmasse	$\Delta T = 6,7 \text{ °C} = 6,7 \text{ K}$
$H(X)$	Verbrennungsenthalpie	$m(\text{H}_2\text{O}) = 379,10 \text{ g}$
Konstanten:		$m(\text{Kupfer}) = 83,66 \text{ g}$
$c_p(\text{H}_2\text{O}) = 4,19 \text{ J/(g*°K)}$		$m(\text{Glas}) = 41,143 \text{ g}$
$c_p(\text{Cu}) = 0,385 \text{ J/(g*°K)}$		$m(\text{Kohle}) = 0,098 \text{ g}$
$c_p(\text{Glas}) = 0,847 \text{ J/(g*°K)}$		$m(\text{Ku}) = 0,195 \text{ g}$
$\Delta H(\text{Kohle}) = -393,51 \text{ kJ/mol}$		
$M(\text{Kohle}) = 12,011 \text{ g/mol}$		

Zur Berechnung des Brennwertes wird zunächst die freigesetzte Wärmemenge  $Q$  aus  $\Delta T$  sowie den jeweiligen Wärmekapazitäten und Massen bestimmt. Davon abzuziehen ist die durch die Verbrennung der Kohle freigesetzte Wärmemenge (die Kohle diente nur zum Start der Verbrennung).

Der Brennwert (oberer Heizwert)  $H_o$  ergibt sich aus der Division der ermittelten Wärmemenge durch die zur Verbrennung eingesetzte Masse des Kunststoffes.

$$H_o = \frac{Q}{m(\text{Ku})}$$

$H_o$	Brennwert des verbrannten Kunststoffes
$Q$	abgegebene Wärmemenge während der Verbrennung
$m$	Masse des verbrannten Kunststoffes

Sofern ein Literaturwert für den Brennwert angegeben ist, wird die prozentuale Abweichung zum berechneten Wert automatisch ermittelt.

### Seite Berechnung des Brennwertes

Der obere und untere Heizwert von festen und flüssigen organischen Verbindungen kann mittels einer Näherungsformel nach BRAUN errechnet werden (Abschnitt 4.3.3.3). Grundlage sind die bekannten Heizwerte für die einzelnen Elemente der Verbindung.

$$H_U = -1 \times (34,8 \times c + 93,8 \times h + 10,46 \times s + 6,28 \times n - 10,8 \times o - 2,5 \times w)$$

$$H_O = -1 \times (34,8 \times c + 93,8 \times h + 10,46 \times s + 6,28 \times n - 10,8 \times o)$$

H<sub>u</sub> unterer Heizwert) [MJ/kg]

H<sub>o</sub> oberer Heizwert (Brennwert) [MJ/kg]

c Elementaranteil Kohlenstoff

h Elementaranteil Wasserstoff

s Elementaranteil Schwefel

n Elementaranteil Stickstoff

o Elementaranteil Sauerstoff

w stöchiometrischer Faktor für Wasser aus der Verbrennungsgleichung

### Seite Wirkungsabschätzung

Die Umweltbelastung (genauer Umweltbelastungskennzahl) ist das Produkt von Ökofaktor und Umwelteinwirkung. Die letzteren sind entsprechend den betrachteten Lebenswegabschnitte nochmals untergliedert. Somit können die Gesamt-Belastungen für eine Kategorie entweder über einen Abschnitt aufaddiert werden (zum Beispiel alle Luftemissionen bei der Materialherstellung), oder aber auch anteilmäßig untersucht werden (beispielsweise unterschiedliche Stickoxid-Emissionen in allen Lebenswegphasen).

Die Prozentangaben geben jeweils den Anteil der Kategorie an der Gesamtbelastung an, um so zu einer Aussage zu kommen, welchen Beitrag etwa der Energieverbrauch an der Gesamtbelastung ausmacht. Es werden nur Prozentzahlen angezeigt, welcher größer als Null sind. Zahlen kleiner Null werden generell in rot dargestellt. Vom Benutzer editierbare Daten sind in blau gehalten. Werden die vorgegebenen Daten verändert, so erscheinen sie automatisch in fetter Schrift.

## **Anhang 3: Gesamtliste Ökofaktoren**

## Anhang 3: Gesamtliste Ökofaktoren

	Einheit	Ökofaktor	Jahr der Veröffentlichung	Quelle
<b>Luftemissionen</b>				
NO <sub>x</sub>	UBP/g	67	1997	BUWAL 1998
SO <sub>2</sub>	UBP/g	53	1997	BUWAL 1998
NMVOC	UBP/g	32	1997	BUWAL 1998
NH <sub>3</sub>	UBP/g	63	1997	BUWAL 1998
HCl	UBP/g	47	1997	BUWAL 1998
HF	UBP/g	85	1997	BUWAL 1998
PM10	UBP/g	110	1997	BUWAL 1998
CO <sub>2</sub>	UBP/g	0,20	1997	BUWAL 1998
CH <sub>4</sub>	UBP/g	4,2	1997	BUWAL 1998
N <sub>2</sub> O	UBP/g	62	1997	BUWAL 1998
R11-Äquivalent	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
Pb	UBP/g	2.900	1997	BUWAL 1998
Cd	UBP/g	120.000	1997	BUWAL 1998
Zn	UBP/g	520	1997	BUWAL 1998
Hg	UBP/g	120.000	1997	BUWAL 1998
<b>Wasseremissionen (Oberflächengewässer)</b>				
AOX	UBP/g	330	1997	BUWAL 1998
Cd	UBP/g	11.000	1997	BUWAL 1998
Cl <sup>-</sup>	UBP/g	0,026	1990	BUWAL 1990
COD	UBP/g	5,9	1997	BUWAL 1998
Cr	UBP/g	660	1997	BUWAL 1998
Cu	UBP/g	1.200	1997	BUWAL 1998
DOC	UBP/g	18	1997	BUWAL 1998
Hg	UBP/g	240.000	1997	BUWAL 1998
N total	UBP/g	69	1997	BUWAL 1998
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	UBP/g	54	1997	BUWAL 1998
Ni	UBP/g	190	1997	BUWAL 1998
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	UBP/g	16	1997	BUWAL 1998
P	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
Pb	UBP/g	150	1997	BUWAL 1998
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	UBP/g	0,077	1990	BUWAL 1990
TOC	UBP/g	18	1997	BUWAL 1998

	Einheit	Ökofaktor	Jahr der Veröffentlichung	Quelle
Zn	UBP/g	210	1997	BUWAL 1998
<b>Emissionen in Boden und Grundwasser</b>				
Cd	UBP/g	120.000	1997	BUWAL 1998
Co	UBP/g	3.800	1997	BUWAL 1998
Cr	UBP/g	1.300	1997	BUWAL 1998
Cu	UBP/g	1.900	1997	BUWAL 1998
Hg	UBP/g	120.000	1997	BUWAL 1998
Mo	UBP/g	19.000	1997	BUWAL 1998
Ni	UBP/g	1.900	1997	BUWAL 1998
Nitrat ins Grundwasser	UBP/g	27	1997	BUWAL 1998
Pb	UBP/g	2.900	1997	BUWAL 1998
Pflanzenbehandlungsmittel	UBP/g	800	1997	BUWAL 1998
Th	UBP/g	96.000	1997	BUWAL 1998
Zn	UBP/g	520	1997	BUWAL 1998
<b>Deponieraumverbrauch</b>				
Abfall in Inertstoff-, Reaktor-, Reststoffdeponie	UBP/g	0,5	1997	BUWAL 1998
Abfall in Untertagedeponie	UBP/g	24	1997	BUWAL 1998
Schwach- bis mittelradioaktive Abfälle	UBP/cm <sup>3</sup>	3.300	1997	BUWAL 1998
Hochradioaktive Abfälle	UBP/cm <sup>3</sup>	46.000	1997	BUWAL 1998
<b>Energieverbrauch</b>				
Primärenergieträger	UBP/MJ	1,0	1997	BUWAL 1998
<b>Lärmemissionen</b>				
Straßenverkehr mit LKWs	UBP/km	1.600	1994	Braunschweig et al. 1994
Straßenverkehr mit PKWs	UBP/km	140	1994	Braunschweig et al. 1994
Straßenverkehr LKW/PKW-Mix	UBP/km	210	1994	Braunschweig et al. 1994
Bodenverbrauch (Versiegelung)	UBP/km <sup>2</sup>	550	1994	Braunschweig et al. 1994
<b>weitere Ökofaktoren für Treibhausgase und ozonzerstörende Substanzen</b>				
<b>FCKW</b>				
R 11	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 12	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 13	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998

	Einheit	Ökofaktor	Jahr der Veröffentlichung	Quelle
R 111	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 112	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 113	UBP/g	1.600	1997	BUWAL 1998
R 114	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 115	UBP/g	1.200	1997	BUWAL 1998
R 211	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 212	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 213	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 214	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 215	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 216	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
R 217	UBP/g	2.000	1997	BUWAL 1998
<b>FKW</b>				
R 23	UBP/g	2.300	1997	BUWAL 1998
R 32	UBP/g	130	1997	BUWAL 1998
R 41	UBP/g	30	1997	BUWAL 1998
R 43-10mee	UBP/g	260	1997	BUWAL 1998
R 125	UBP/g	560	1997	BUWAL 1998
R 134	UBP/g	200	1997	BUWAL 1998
R 134a	UBP/g	260	1997	BUWAL 1998
R 152a	UBP/g	28	1997	BUWAL 1998
R 143	UBP/g	60	1997	BUWAL 1998
R 143a	UBP/g	760	1997	BUWAL 1998
R 227ea	UBP/g	580	1997	BUWAL 1998
R 236fa	UBP/g	1.300	1997	BUWAL 1998
R 245ca	UBP/g	110	1997	BUWAL 1998
<b>Halone</b>				
Halon 1211	UBP/g	6.000	1997	BUWAL 1998
Halon 1301	UBP/g	20.000	1997	BUWAL 1998
Halon 2402	UBP/g	12.000	1997	BUWAL 1998
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe				
Perfluormethan	UBP/g	1.300	1997	BUWAL 1998
Perfluorethan	UBP/g	1.800	1997	BUWAL 1998
Perfluorpropan	UBP/g	1.400	1997	BUWAL 1998
Perfluorbutan	UBP/g	1.400	1997	BUWAL 1998
Perfluorcyclobutan	UBP/g	1.700	1997	BUWAL 1998

	<b>Einheit</b>	<b>Ökofaktor</b>	<b>Jahr der Veröffentlichung</b>	<b>Quelle</b>
Perfluorpentan	UBP/g	1.500	1997	BUWAL 1998
Perfluorhexan	UBP/g	1.500	1997	BUWAL 1998
<b>Teilhalogenierte FKW</b>				
R 22	UBP/g	300	1997	BUWAL 1998
R 123	UBP/g	40	1997	BUWAL 1998
R 124	UBP/g	94	1997	BUWAL 1998
R 141b	UBP/g	220	1997	BUWAL 1998
R 142b	UBP/g	360	1997	BUWAL 1998
<b>weitere Substanzen</b>				
Tetrachlorkohlenstoff	UBP/g	2.200	1997	BUWAL 1998
Methylbromid	UBP/g	1.400	1997	BUWAL 1998
Methylchloroform	UBP/g	200	1997	BUWAL 1998
Schwefelhexafluorid	UBP/g	4.800	1997	BUWAL 1998

Quellen:

BUWAL 1990:

BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL, Hrsg.): Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 133. Bern 1990

Braunschweig et al. 1994:

BRAUNSCHWEIG, A.; FÖRSTER, R.; HOFSTETTER, P.; MÜLLER-WENK, R.: Evaluation und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden für Ökobilanzen - Erste Ergebnisse, Institut für Wirtschaft und Ökologie. Hochschule St. Gallen. St. Gallen 1994

BUWAL 1998:

BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL, Hrsg.): Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997. Bern 1998



# Lebenslauf

## PERSÖNLICHE ANGABEN

---

Name: Stefan Horn  
Anschrift: Hausmannstraße 23  
63452 Hanau

E-Mail stefan@fam-horn.de

Geburtsdatum: 19.08.1966 in Hanau  
Familienstand: verheiratet mit Ingrid Horn (geb. 10.01.1969)  
Kinder: Stella Viviane (geb. 14.08.1998)  
Maja Sophia (geb. 11.04.2001)

## SCHULAUSBILDUNG

---

1973 - 1977 Grundschule (Pestalozzischule Hanau)  
1977 - 1979 Förderstufe (Schloßplatzschule Hanau)  
1979 - 1987 Gymnasium (Hohe Landesschule Hanau)  
Abschluß: Abitur  
Leistungskurse: Wirtschaftswissenschaften und Biologie

## ZIVILDIENTST

---

Aug. 1987 bis März 1989 Johanniter-Unfall-Hilfe (Hanau)  
Rettungsdienst, Haushaltshilfe für alte und behinderte Menschen, Sterbebetreuung, ehrenamtliche Mithilfe

## BERUFSAUSBILDUNG

---

Okt. 1989 bis Mai 1995 Studium der Fächer Biologie und Chemie für das Lehramt an Gymnasien an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt  
Abschluß: Erste Staatsprüfung  
Titel der Examensarbeit: "Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen"

Juli 1995 bis Sept. 1998 Beginn der Promotion am Institut für Didaktik der Chemie (Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt)

Unterbrechung der Promotion

Nov. 1998  
bis Aug. 2001 Chemiker bei der C.A.U. GmbH (Ges. für Consulting und Analytik im Umweltbereich, Dreieich), Arbeitsgruppe „Ökobilanzen und Chemikalienbewertung“

seit 16. Aug. 2001 Fortsetzung der Promotion  
Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Didaktik der Chemie (Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt) u.a. in den Bereichen Ausbildung von Studenten des Lehramts Grundschule (Sachunterricht) und Lehrerfortbildung

#### VERÖFFENTLICHUNGEN

---

- 1996
- BADER, H. J.; HORN, S.: Polymerisation von Caprolactam zu Perlon - eine verbesserte Versuchsvorschrift, CHEMKON 3 (1996) 1 S. 26
  - HORN, S.; H. J. BADER: Ökobilanzen - Ansätze zur Behandlung der Thematik im Chemieunterricht. Poster. 13. Tagung der Fachgruppe Chemieunterricht der GDCh. Stuttgart-Hohenheim (04. bis 07.09.1996)
- 1997
- Mitautor bei:  
BADER, H. J. (Hrsg.): Kunststoffe-Recycling-Alltagschemie, Köln 1997. Band 12 der Reihe: GLÖCKNER, W.; JANSEN, W.; WEIßENHORN, R. (Hrsg.): Handbuch der experimentellen Schulchemie - Sekundarbereich II. Aulis Verlag Deubner, Köln 1997

Hanau, den 22.04.2002

*Stefan Horn*