

Texte
07
05
ISSN
0722-186X

**Entlastungseffekte für die
Umwelt durch Substitution
konventioneller chemisch-
technischer Prozesse und
Produkte durch
biotechnische Verfahren**

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 202 66 326
UBA-FB 000778



**Entlastungseffekte für die
Umwelt durch Substitution
konventioneller chemisch-
technischer Prozesse und
Produkte durch biotechnische
Verfahren**

von

Dr. Klaus Hoppenheidt und Prof. Dr. Wolfgang Mücke

Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik
- BIfA GmbH
Abt. Umwelttoxikologie, -hygiene und -biotechnologie

und

**Rene' Peche, Dr. Dieter Tronecker, Udo Roth, Eduard Würdinger,
Sarah Hottenroth, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel**

Abt. Verfahrens- und Systemtechnik

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 1.1 M
Dr. Martin Mieschendahl

Berlin, April 2005

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB FuE-Vorhaben FKZ: 202 66 326	2. --	3. --
4. Titel des Berichts Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Verfahren		
5. Autoren Dr. K. Hoppenheidt, Prof. Dr. W. Mücke, R. Peche, Dr. D. Tronecker, U. Roth, E. Würdinger, S. Hotten- roth, Prof. Dr.-Ing. W. Rommel	8. Abschlussdatum 15.06.2004	
	7. Veröffentlichungsdatum --	
6. Durchführende Institution Bayerisches Institut für Angewandte Umweltfor- schung und -technik – BIfA GmbH Am Mittleren Moos 46 D-86167 Augsburg	9. UFOPLAN-Nr. 202 66 326	
	10. Seitenzahl 493	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Postfach 33 00 22 D-14191 Berlin	12. Literaturangaben 305	
	13. Tabellen 133	
	14. Abbildungen 142	
15. Zusätzliche Angaben --		
16. Zusammenfassung Mit Hilfe eines standardisierten ökobilanziellen Vergleichs wurde überprüft, ob die Nutzung biotechnischer Produktionsverfahren und biotechnisch gewonnener Produkte im Vergleich zu chemisch-technischen Alternativen Entlastungseffekte für die Umwelt bedingen kann. Ausgewertete Verfahren waren die Herstellung von Vitamin B2 sowie ein Teilschritt der Lederherstellung. Ausgewertete funktionsanaloge Produkte waren: Loose-fill-Packmittel auf Stärke- bzw. Polystyrolbasis; Vollwaschmittel mit bzw. ohne Enzymeinsatz; chemische und biotechnische Leistungsförderer bei der Tierzucht. Ergänzend wurden relevante Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen vergleichend ausgewertet, die bei der Anwendung eines bio- bzw. chemisch-technischen Produktionsverfahrens zu beachten sind.		
17. Schlagwörter Umweltentlastung; biotechnische Produktion; Bioprodukte; chemisch-technische Produktion; chemische Produkte; ökobilanzieller Vergleich; Arbeitsschutz; Umweltschutz		
18. Preis --	19. --	20. --

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB R+D-Project GI: 202 66 326	2. --	3. --
4. Report Title Reducing Environmental Load of Chemical Engineering Processes and Chemical Products by Biotechnological Substitutes		
5. Authors Dr. K. Hoppenheidt, Prof. Dr. W. Mücke, R. Peche, Dr. D. Tronecker, U. Roth, E. Würdinger, S. Hotten- roth, Prof. Dr.-Ing. W. Rommel	8. Report Date 15.06.2004	
	9. Publication Date --	
6. Performing Organisation Bayerisches Institut für Angewandte Umweltfor- schung und -technik – BIfA GmbH Am Mittleren Moos 46 D-86167 Augsburg	10. UFOPLAN-Ref. No. 202 66 326	
	11. No. of Pages 493	
7. Funding Agency Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Postfach 33 00 22 D-14191 Berlin	12. No. of Reference 305	
	13. No. of Tables 133	
	14. No. of Figures 142	
15. Supplementary Notes --		
16. Abstract With the help of a standardized ecobalance procedure the environmental loads of biopro- cesses and bioproducts have been determined and were used for a comparison with data of chemical production processes and products. Evaluated processes have been: production of vitamin B2 and a step of the leather production process: Evaluated products have been: starch and polystyrene based loose-fill packaging materials; washing powder with and without enzymes; biological and chemical feed additives. In addition it has been studied which occupational safety and environmental protection meas- ures are required for bioprocesses or chemical production processes.		
17. Keywords Environmental impact reduction; bioprocess; bioproducts; chemical process; chemical prod- ucts; life cycle assessment; occupational safety; environmental protection		
18. Price --	19. --	20. --

Inhaltsverzeichnis

Berichts-Kennblatt	I
Report Cover Sheet	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXV
1 Zusammenfassung	1
2 Ausgangslage, Zielsetzung und Aufgabenstellung	3
2.1 Umweltpolitische Zielsetzungen	3
2.2 Umweltschutzaufwendungen der Chemische Industrie	5
2.3 Beitrag der Biotechnologie zur nachhaltigen Entwicklung	9
2.4 Aufgabenstellung	19
3 Recherche biotechnischer und chemisch-technischer Verfahren und Produkte	23
3.1 Auswahl von Verfahrensalternativen	25
3.2 Auswahl von Produktalternativen	27
4 Methodische Grundlagen	29
4.1 Ökobilanzielle Betrachtung	29
4.1.1 Zieldefinition - Erkenntnisinteresse, funktionelle Einheit und Systemgrenzen	30
4.1.2 Vorgehensweise bei der Sachbilanz und Systemmodellierung	35
4.2 Wirkungsabschätzung	37

IV

4.2.1	Vorgehensweise	37
4.2.2	Auswahl der Wirkungskategorien und Zuordnung der Sachbilanzparameter.....	40
4.2.3	Beschreibung der Wirkungskategorien.....	41
4.2.3.1	<i>Ressourcenbeanspruchung</i>	41
4.2.3.2	<i>Treibhauseffekt</i>	44
4.2.3.3	<i>Versauerung</i>	46
4.2.3.4	<i>Aquatische und terrestrische Eutrophierung</i>	46
4.2.3.5	<i>Ozonbildung</i>	48
4.2.3.6	<i>Humantoxizität - Potenzielle toxische Schädigung des Menschen und von Organismen</i>	50
4.2.3.7	<i>Ökotoxizität –Potenzielle toxische Schädigung von Organismen und Ökosystemen</i>	50
4.2.4	Normierung.....	50
4.3	Erläuterungen zur Darstellung und Auswertung der Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien.....	53
4.4	Bilanzierungssoftware UMBERTO®	55
5	Auswertung der Umweltentlastungseffekte von bestehenden biotechnischen Verfahren	57
5.1	Verfahrensvergleich 1 – Biotechnische und Chemisch-technische Vitamin B2-Produktion	58
5.1.1	Basisinformationen	58
5.1.2	Aufgabenstellung.....	59
5.1.3	Vitamin B2-Produktion der DSM Nutritional Products (vormals Roche Vitamine GmbH).....	60
5.1.3.1	<i>Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien</i>	60
5.1.3.1.1	Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS.....	60
5.1.3.1.2	Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	62
5.1.3.2	<i>Funktionelle Einheit</i>	64
5.1.3.3	<i>Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze</i>	64
5.1.3.4	<i>Beschreibung der Bilanzierungsmodelle</i>	66
5.1.3.4.1	Herstellung der Ausgangsstoffe (Vorkette).....	66
5.1.3.4.2	Vitamin B2-Produktionsprozess	69
5.1.3.4.3	Biomasseverwertung (Nachkette)	73
5.1.3.4.4	Äquivalenzsysteme	74
5.1.3.5	<i>Vergleich der Bilanzierungsergebnisse</i>	76

V

5.1.3.5.1	Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien.....	76
5.1.3.5.2	KEA gesamt	79
5.1.3.5.3	Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien.....	82
5.1.3.5.4	Treibhauseffekt	85
5.1.3.5.5	Versauerung.....	89
5.1.3.5.6	Terrestrische Eutrophierung.....	92
5.1.3.5.7	Aquatische Eutrophierung	95
5.1.3.5.8	Ozonbildung	97
5.1.3.5.9	Humantoxizität	99
5.1.3.5.10	Ökotoxizität	101
5.1.3.6	<i>Zusammenfassung der Einzelergebnisse</i>	105
5.1.4	Vitamin B2-Produktion der BASF AG	108
5.1.4.1	<i>Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien</i>	108
5.1.4.2	<i>Funktionelle Einheit</i>	109
5.1.4.3	<i>Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze</i>	110
5.1.4.4	<i>Beschreibung der Bilanzierungsmodelle</i>	110
5.1.4.5	<i>Vergleich der Bilanzierungsergebnisse</i>	111
5.1.4.5.1	Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien.....	111
5.1.4.5.2	KEA gesamt	114
5.1.4.5.3	Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien.....	115
5.1.4.5.4	Treibhauseffekt	117
5.1.4.5.5	Versauerung.....	118
5.1.4.5.6	Terrestrische Eutrophierung.....	119
5.1.4.5.7	Aquatische Eutrophierung	120
5.1.4.5.8	Ozonbildung	121
5.1.4.5.9	Humantoxizität	122
5.1.4.5.10	Ökotoxizität	123
5.1.4.6	<i>Zusammenfassung der Einzelergebnisse</i>	125
5.2	Verfahrenvergleich 2 – Biotechnische und chemisch-technische Lederherstellung	127
5.2.1	Basisinformationen	127
5.2.1.1	<i>Grundlagen der Lederherstellung</i>	127
5.2.1.2	<i>Prozessschritte der industriellen Lederherstellung</i>	127
5.2.1.2.1	Weichen (Soaking).....	129
5.2.1.2.2	Äschern – Enthaaren und Hautaufschluss (Liming, Unhairing).....	130
5.2.1.3	<i>Stoffströme bei der Lederherstellung im Überblick</i>	131
5.2.1.4	<i>Bedeutung der Enzyme bei der Lederherstellung</i>	132
5.2.1.5	<i>Umweltrelevanz der Lederherstellung</i>	135
5.2.2	Aufgabenstellung.....	137
5.2.3	Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien	138
5.2.3.1	<i>Szenario enzymatisches Weichen/Äschern</i>	138
5.2.3.2	<i>Szenario chemisches Weichen/Äschern</i>	140

VI

5.2.3.3	<i>Funktionelle Einheit</i>	142
5.2.3.4	<i>Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze</i>	142
5.2.3.5	<i>Beschreibung der Bilanzierungsmodelle</i>	144
5.2.3.5.1	Chemikalienherstellung (Vorkette)	145
5.2.3.5.2	Weichen/Äschern	150
5.2.3.5.3	Entsorgung der Reststoffe (Nachkette)	159
5.2.3.5.4	Äquivalenzsysteme	163
5.2.4	Vergleich der Bilanzierungsergebnisse	163
5.2.4.1	<i>Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien</i>	163
5.2.4.2	<i>KEA gesamt</i>	166
5.2.4.3	<i>Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien</i>	168
5.2.4.4	<i>Treibhauseffekt</i>	171
5.2.4.5	<i>Versauerung</i>	174
5.2.4.6	<i>Terrestrische Eutrophierung</i>	176
5.2.4.7	<i>Aquatische Eutrophierung</i>	178
5.2.4.8	<i>Ozonbildung</i>	181
5.2.4.9	<i>Humantoxizität</i>	183
5.2.4.10	<i>Ökotoxizität</i>	185
5.2.4.10.1	Luftemissionen	185
5.2.4.10.2	Wasseremissionen	187
5.2.5	Zusammenfassung der Einzelergebnisse	188
6	Auswertung der Umweltentlastungseffekte durch Produktsubstitutionen	191
6.1	Produktvergleich 1 - Loose-fill-Packmittel aus EPS und Stärke	192
6.1.1	Auswertung der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln	192
6.1.2	Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise bei der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln	194
6.1.2.1	<i>Erkenntnisinteresse der Ökobilanz</i>	195
6.1.2.2	<i>Vorgehensweise bei der Erstellung der Ökobilanz</i>	197
6.1.2.2.1	Allgemeiner Überblick	197
6.1.2.2.2	Vorgehen bei der Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung	198
6.1.2.2.3	Untersuchungsszenarien im 1. Auswertungsschritt	199
6.1.2.2.4	Untersuchungsszenarien im 2. Auswertungsschritt	201
6.1.3	Auswertung wesentlicher allgemeiner Ergebnisse der Ökobilanz	202
6.1.3.1	<i>EPS-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Materialbereitstellung</i>	203
6.1.3.2	<i>EPS-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Entsorgungsverfahren</i>	203
6.1.3.3	<i>Stärke-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Materialbereitstellung</i>	204

VII

6.1.3.4	<i>Stärke-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Entsorgungsverfahren</i>	205
6.1.3.5	<i>Bedeutung der Nutzungsphase (Wiederverwendung und Transportentfernung)</i>	206
6.1.4	<i>Auswertung ausgewählter spezieller Ergebnisse der Ökobilanz</i>	206
6.1.4.1	<i>KEA gesamt</i>	207
6.1.4.1.1	<i>KEA gesamt berechnet aus KEA fossil und KEA nuklear</i>	209
6.1.4.1.2	<i>KEA gesamt inklusive KEA solar</i>	211
6.1.4.1.3	<i>KEA gesamt bezogen auf 1 kg Stärke bzw. Polystyrol</i>	213
6.1.4.2	<i>Treibhauspotential</i>	215
6.1.4.3	<i>Ozonbildungspotential</i>	219
6.1.4.4	<i>Naturraumbeanspruchung</i>	221
6.1.5	<i>Schlussfolgerungen und Übertragbarkeit</i>	222
6.1.5.1	<i>Vergleich der EPS- und Stärke-loose-fill-Packmittel-Szenarien</i>	223
6.1.5.2	<i>Übertragbarkeit auf andere Kunststoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen</i>	224
6.2	Produktvergleich 2 - Tierproduktion unter Einsatz von Probiotika und Seltenen Erden	227
6.2.1	<i>Basisinformationen</i>	227
6.2.1.1	<i>Wirtschaftliche Aspekte</i>	227
6.2.1.2	<i>Wirkungsweise und Leistungspotential marktrelevanter Leistungsförderer</i>	228
6.2.2	<i>Aufgabenstellung</i>	228
6.2.3	<i>Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien</i>	231
6.2.3.1	<i>Szenario Probiotika</i>	231
6.2.3.2	<i>Szenario Seltene Erden</i>	234
6.2.3.3	<i>Szenario ohne Zusatz</i>	239
6.2.4	<i>Funktionelle Einheit</i>	240
6.2.5	<i>Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze</i>	240
6.2.6	<i>Beschreibung der Bilanzierungsmodelle</i>	242
6.2.6.1	<i>Futtermittel (Vorkette)</i>	243
6.2.6.2	<i>Ausgangsstoffe für Leistungsförderer (Vorkette)</i>	244
6.2.6.3	<i>Leistungsförderer</i>	246
6.2.6.4	<i>Tierfütterung</i>	250
6.2.6.5	<i>Gülleverwertung (Nachkette)</i>	251
6.2.6.6	<i>Äquivalenzsysteme</i>	253
6.2.7	<i>Vergleich der Bilanzierungsergebnisse</i>	254

VIII

6.2.7.1	<i>Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien</i>	254
6.2.7.2	<i>KEA gesamt</i>	256
6.2.7.3	<i>Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien</i>	259
6.2.7.4	<i>Treibhauseffekt</i>	262
6.2.7.5	<i>Versauerung</i>	264
6.2.7.6	<i>Terrestrische Eutrophierung</i>	267
6.2.7.7	<i>Aquatische Eutrophierung</i>	270
6.2.7.8	<i>Ozonbildung</i>	272
6.2.7.9	<i>Humantoxizität</i>	274
6.2.7.10	<i>Ökotoxizität</i>	277
6.2.7.10.1	Luftemissionen	277
6.2.7.10.2	Wasseremissionen	279
6.2.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	282
6.3	Produktvergleich 3 – Enzymeinsatz in Vollwaschmitteln.....	285
6.3.1	Basisinformationen	285
6.3.1.1	<i>Grundlagen der Textilwäsche</i>	285
6.3.1.2	<i>Entwicklung der Zusammensetzung pulverförmiger Vollwaschmittel</i>	287
6.3.1.3	<i>Bedeutung von Waschmittelenzymen</i>	291
6.3.1.4	<i>Umweltrelevanz der Textilwäsche</i>	296
6.3.1.4.1	Stoff- und Energieeinsatz bei der Herstellung von Waschmitteltensiden	298
6.3.1.4.2	Stoff- und Energieeinsatz bei der Herstellung von Waschmittelenzymen	300
6.3.2	Aufgabenstellung.....	303
6.3.3	Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien	307
6.3.4	Funktionelle Einheit	308
6.3.5	Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze	309
6.3.6	Beschreibung der Bilanzierungsmodelle	310
6.3.6.1	<i>Waschmittelherstellung (Vorkette)</i>	311
6.3.6.2	<i>Waschprozess</i>	315
6.3.6.3	<i>Waschwasserreinigung (Nachkette)</i>	316
6.3.6.4	<i>Äquivalenzsysteme</i>	319
6.3.7	Vergleich der Bilanzierungsergebnisse	320
6.3.7.1	<i>Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien</i>	320
6.3.7.2	<i>KEA gesamt</i>	322
6.3.7.3	<i>Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien</i>	324
6.3.7.4	<i>Treibhauseffekt</i>	327
6.3.7.5	<i>Versauerung</i>	329

6.3.7.6	<i>Terrestrische Eutrophierung</i>	331
6.3.7.7	<i>Aquatische Eutrophierung</i>	334
6.3.7.8	<i>Ozonbildung</i>	336
6.3.7.9	<i>Humantoxizität</i>	338
6.3.7.10	<i>Ökotoxizität</i>	340
6.3.7.10.1	Luftemissionen.....	340
6.3.7.10.2	Wasseremissionen.....	342
6.3.8	Zusammenfassung der Einzelergebnisse.....	344
7	Konzept zur vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotentials der biotechnischen und chemisch-technischen Produktion	347
7.1	Hintergrund und Zielsetzung	347
7.2	Vorgehensweise	348
7.2.1	Zielsetzung, Struktur und Datengrundlage.....	348
7.2.2	Begriffsklärung: Gefahrenpotential – Gefahr - Gefährdung - Risiko.....	349
7.2.3	Begriffsklärung: Anlagensicherheit und Schutzgüter.....	351
7.2.4	Bewertungsrahmen: Rangfolge von Schutzmaßnahmen.....	354
7.3	Kriterien zur Bestimmung des Gefahrenpotentials	355
7.3.1	Vorbemerkung.....	355
7.3.2	Gefährdungsbeurteilung im Bereich der Arbeitsschutzes.....	356
7.3.3	Prozess- und anlagenbezogene Kriterien.....	359
7.3.3.1	<i>Vorbemerkung</i>	359
7.3.3.2	<i>Bestimmungsgemäßer und nicht-bestimmungsgemäßer Betrieb</i>	360
7.3.3.3	<i>Ansatz der Störfall-Verordnung (12. BImSchV)</i>	361
7.3.3.4	<i>Sicherheitstechnik: Die TRGS 300</i>	361
7.3.3.5	<i>Exotherme Reaktionen: Die TRAS 410</i>	365
7.3.3.6	<i>Geräte- und Produktsicherheitsgesetz / Betriebssicherheitsverordnung</i>	365
7.3.3.7	<i>Prozessbezogene Kriterien zur Beurteilung des Gefahrenpotentials</i>	365
7.3.3.8	<i>Exkurs: Ökobilanz-Wirkungskategorie „Risiko von Betriebsstörungen“</i>	366
7.3.4	Beurteilung des mit Gefahrstoffen verbundenen Gefahrenpotentials.....	368
7.3.4.1	<i>Vorbemerkung</i>	368

X

7.3.4.2	<i>Eigenschaften und Charakterisierung von Gefahrstoffen</i>	368
7.3.4.3	<i>Bewertung des stoffbedingten Gefahrenpotentials nach der Störfall-Verordnung und dem Spaltenmodell der TRGS 440</i>	373
7.3.5	Gefahrenpotential biologischer Arbeitsstoffe	380
7.3.5.1	<i>Vorbemerkung</i>	380
7.3.5.2	<i>Gefährdungsbeurteilung bei Arbeiten mit biologischen Arbeitsstoffen</i>	380
7.3.5.3	<i>Gefahrenpotential biologischer Arbeitsstoffe im Allgemeinen</i>	384
7.3.5.4	<i>Gefahrenpotential gentechnisch veränderter Mikroorganismen</i>	390
7.4	Gefahrenpotential der Riboflavin-Produktion	397
7.4.1	Untersuchungsrahmen, Systemgrenzen und Abschneidekriterien.....	397
7.4.2	Beschreibung der Produktionsverfahren	401
7.4.2.1	<i>Vorgehensweise</i>	401
7.4.2.2	<i>Beschreibung des chemisch-technischen Produktionsverfahren</i>	401
7.4.2.2.1	Überblick zu den relevanten Prozessen	401
7.4.2.2.2	Herstellung des Azo-Farbstoffes	402
7.4.2.2.3	Herstellung der Barbitursäure	403
7.4.2.2.4	Herstellung von Riboflavin aus Azo-Farbstoff und Barbitursäure	404
7.4.2.2.5	Aufkonzentration des Riboflavins auf über 98 Gew.-%	404
7.4.2.3	<i>Beschreibung des biotechnischen Produktionsverfahren</i>	405
7.4.2.3.1	<i>Vorbemerkung</i>	405
7.4.2.3.2	<i>Fermentation und Gewinnung von Riboflavin (mind. 96 Gew.-%)</i>	405
7.4.2.3.3	<i>Aufkonzentration des Riboflavins auf über 98 Gew.-%</i>	406
7.4.3	Vergleich des Gefahrenpotentials.....	407
7.4.3.1	<i>Vorbemerkung</i>	407
7.4.3.2	<i>Prozessbedingtes Gefahrenpotential</i>	407
7.4.3.3	<i>Stoffbedingtes Gefahrenpotential</i>	409
7.4.3.4	<i>Gefahrenpotential der biologischen Arbeitsstoffe</i>	424
7.4.3.5	<i>Zusammenfassende Bewertung des Gefahrenpotentials</i>	430
7.5	Fazit	431
8	Diskussion	433
8.1	Ressourcennutzung der Chemischen Industrie	433
8.2	Ressourcennutzung der Biotechnologie	436
8.3	Einsatz von Verfahrens- und Produktvergleichen	440
9	Literatur	443
10	Anhang	463

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Links: Materialkonto der 2001 in Deutschland genutzten Umweltressourcen (in Mio. Tonnen); rechts: Anteile der entnommenen Feststoffe (UGR, 2003).....	4
Abbildung 2-2: Links: Veränderter Einsatz von Umweltressourcen für wirtschaftliche Zwecke in Deutschland 2001/2 gegenüber 1991 in % (UGR, 2003); rechts: Stand des Deutschen Umweltindex (DUX) (UBA, 2004).....	5
Abbildung 2-3: Umweltschutzkosten der Chemischen Industrie in Deutschland: Links: Umweltschutzinvestitionen; rechts: Umweltschutzbetriebskosten (Daten: VCI, 2003a).....	6
Abbildung 2-4: Verlauf des Produktionsvolumens sowie des Energieeinsatzes sowie der Kohlendioxidemissionen der europäischen Chemieindustrie (Daten: CEFIC, 2004).....	7
Abbildung 2-5: Weltmarktdaten der im Jahr 2000 biotechnisch hergestellten Produkte.....	11
Abbildung 2-6: Oben: Grundsätzlicher Ablauf vieler biotechnischer Verfahren (n. Rehm, 1980); unten: Beispielkalkulation der Kostenstruktur für die Produktion eines intrazellulären Enzyms (Daten: Storhas, 2003).....	12
Abbildung 2-7: Einsparungen an Rohstoffen, Wasser, Dampf und Strom durch die Verwendung eines genetisch optimierten Enzymproduzenten.....	14
Abbildung 2-8: Weltweiter Umsatz chemischer und biotechnischer Produkte im Jahr 2001 und Prognosedaten für 2010 (Daten: Festel, 2004).....	16
Abbildung 2-9: Ziele der US-Strategie zur Nutzung einheimischer Rohstoffe für die Herstellung von Bioprodukten und Bioenergieträgern (Daten: Vorlop u. Wilke, 2003).....	17
Abbildung 2-10: Zukünftige Nutzung petrochemischer und landwirtschaftlicher Rohstoffe (Desai, 2002).....	18
Abbildung 3-1: Entscheidungsmatrix für die Auswahl projektrelevanter Informationen.....	24
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für den Verfahrensvergleich.....	25
Abbildung 3-3: Schema der Bearbeitung der Verfahrensvergleiche.....	25
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für den Produktvergleich.....	27
Abbildung 3-5: Schema der Bearbeitung der Produktvergleiche.....	27
Abbildung 4-1: Elemente einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff und deren Anwendungsfelder für das Instrumentarium nach DIN (1997).....	29
Abbildung 4-2: Beispiel eines Produktsystems (DIN, 1998).....	31
Abbildung 4-3: Berücksichtigung von Zusatznutzen der untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme über die Gegenrechnung von Äquivalenzsystemen.....	34
Abbildung 4-4: Wirkungsabschätzung nach DIN EN ISO 14042 - Umrechnung der Sachbilanzergebnisse in Wirkungsendpunkte repräsentierende Wirkungsindikatoren am Beispiel der Versauerung nach DIN (2000).....	39
Abbildung 4-5: Aufbau eines Petri-Netzes (Schmidt und Schorb, 1995).....	56

XII

Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für einen Verfahrensvergleich	57
Abbildung 5-2: Riboflavin	58
Abbildung 5-3: Schema der biotechnischen Vitamin B2-Produktion.....	60
Abbildung 5-4: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS	61
Abbildung 5-5: Schema der chemisch-technischen Vitamin B2-Synthese	62
Abbildung 5-6: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario CHEMISCH- TECHNISCHER PROZESS	63
Abbildung 5-7: Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Herstellung der Ausgangsstoffe</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	67
Abbildung 5-8: Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Herstellung der Ausgangsstoffe</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	68
Abbildung 5-9: Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Vitamin B2-Produktionsprozess</i>	70
Abbildung 5-10: Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Vitamin B2-Produktionsprozess</i> inklusive des nachgelagerten Äquivalenzmodells	71
Abbildung 5-11: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den biotechnischen Produktionsprozess von Vitamin B2 (Juni 2002).....	72
Abbildung 5-12: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den chemisch-technischen Produktionsprozess von Vitamin B2 (Oktober 2000).....	72
Abbildung 5-13: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Biomasseverwertung</i> inklusive des nachgelagerten Äquivalenzmodells	74
Abbildung 5-14: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	79
Abbildung 5-15: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	85
Abbildung 5-16: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	89
Abbildung 5-17: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	92
Abbildung 5-18: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	95
Abbildung 5-19: Photochemische Oxidantienbildung - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	97
Abbildung 5-20: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	99
Abbildung 5-21: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxiden - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	101
Abbildung 5-22: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	103

XIII

Abbildung 5-23: Schema der Systemgrenzen für die biotechnische (links) und chemisch-technische (rechts) Vitamin B2-Produktion bei der BASF AG in der konzerneigenen Ökoeffizienzanalyse.....	108
Abbildung 5-24: Bilanzierungsmodelle für die beiden untersuchten Szenarien.....	110
Abbildung 5-25: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	114
Abbildung 5-26: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	117
Abbildung 5-27: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	118
Abbildung 5-28: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	119
Abbildung 5-29: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	120
Abbildung 5-30: Photochemische Oxidantienbildung - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	121
Abbildung 5-31: Humantoxizität am Beispiel von Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	122
Abbildung 5-32: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxiden - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	123
Abbildung 5-33: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	124
Abbildung 5-34: Verfahrensbild und Überblick zu Stoffströmen einer Chromgerberei (nach IPTS, 2001).....	131
Abbildung 5-35: Rohwaren-Stoffbilanz (nach Feikes, 1990).....	132
Abbildung 5-36: Einsatzpotentiale für Enzyme bei der Lederherstellung und resultierende Chemikalieneinsparungen (IPTS, 2002).....	134
Abbildung 5-37: Prozessschema für ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.....	139
Abbildung 5-38: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.....	140
Abbildung 5-39: Prozessschema für CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.....	141
Abbildung 5-40: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.....	142
Abbildung 5-41: Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Chemikalienherstellung</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells.....	148
Abbildung 5-42: Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Chemikalienherstellung</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells.....	149
Abbildung 5-43: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>WEICHEN/ÄSCHERN</i>	150
Abbildung 5-44: In-/Outputdiagramm mit den in Versuchen (im halbtechnischen Maßstab) gewonnenen Ausgangsdaten für das enzymatische Weichen und Äschern.....	151
Abbildung 5-45: In-/Outputdiagramm mit den in Versuchen (im halbtechnischen Maßstab) gewonnenen Ausgangsdaten für das chemische Weichen und Äschern.....	151

XIV

Abbildung 5-46: Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Entsorgung</i> inklusive des Äquivalenzmodells	160
Abbildung 5-47: Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Entsorgung</i>	160
Abbildung 5-48: Ablaufschema der Abwasserbehandlung des chromfreien Abwasser-Teilstromes A	162
Abbildung 5-49: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	166
Abbildung 5-50: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	172
Abbildung 5-51: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	174
Abbildung 5-52: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	176
Abbildung 5-53: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	179
Abbildung 5-54: Ozonbildungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	181
Abbildung 5-55: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	183
Abbildung 5-56: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxiden - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	185
Abbildung 5-57: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	187
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für den Produktvergleich	191
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Loose-fill-Packmittel-Lebenswege und der Ökobilanz-Methodik	197
Abbildung 6-3: Beitrag zum KEA gesamt (Summe aus KEA fossil und KEA nuklear)- Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel	209
Abbildung 6-4: Beitrag zum KEA gesamt unter Berücksichtigung und Vernachlässigung der Feedstockenergie der stofflich genutzten Anteile an Stärke und Polystyrol - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel	212
Abbildung 6-5: Beitrag zum KEA gesamt unter Berücksichtigung und Vernachlässigung der Feedstockenergie bei den Stärke Szenarien - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf 1 kg Stärke oder Polystyrol	214
Abbildung 6-6: Beitrag zum Treibhauspotential - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m ³ Loose-fill-Packmittel	216
Abbildung 6-7: Beitrag zum Ozonbildungspotential - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m ³ Loose-fill-Packmittel	220
Abbildung 6-8: Flächenbeanspruchung (m ²) verschiedener Flächenkategorien in den Stärke- und EPS-Szenarien.....	222

Abbildung 6-9: Schema des Herstellungsprozesses für Oralin®	232
Abbildung 6-10: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario PROBIOTIKA	234
Abbildung 6-11: Schema des Herstellungsprozesses von Seltenen Erden-Citrate	237
Abbildung 6-12: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario SELTENE ERDEN.....	239
Abbildung 6-13: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario OHNE ZUSATZ.....	240
Abbildung 6-14: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Futtermittel</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	243
Abbildung 6-15: Szenario PROBIOTIKA - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Ausgangsstoffe für Leistungsförderer</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	244
Abbildung 6-16: Szenario SELTENE ERDEN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Ausgangsstoffe für Leistungsförderer</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	245
Abbildung 6-17: Szenario PROBIOTIKA - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Leistungsförderer</i>	246
Abbildung 6-18: Szenario SELTENE ERDEN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Leistungsförderer</i>	248
Abbildung 6-19: In-/Output-Diagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten zur Herstellung des Probiotikum Oralin® bezogen auf die Lebendmassezunahme von 58 kg eines Mastschweins in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche.....	249
Abbildung 6-20: In-/Output-Diagramme mit den recherchierten Ausgangsdaten zur Herstellung des Seltene Erden-Produktes Lancer® bezogen auf die Lebendmassezunahme von 58 kg eines Mastschweins in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche.....	249
Abbildung 6-21: Leistungspotential von Oralin® und Lancer® gegenüber einem Futtermittel ohne leistungssteigernde Zusätze	251
Abbildung 6-22: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Gülleverwertung</i> inklusive des nachgelagerten Äquivalenzmodells	252
Abbildung 6-23: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	256
Abbildung 6-24: Treibhauseffekt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	262
Abbildung 6-25: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	264
Abbildung 6-26: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	267
Abbildung 6-27: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	270
Abbildung 6-28: Ozonbildung - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	272
Abbildung 6-29: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit	274
Abbildung 6-30: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxide - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	277

Abbildung 6-31: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	280
Abbildung 6-32: Waschkreis nach Sinner zur Darstellung der Einflussfaktoren auf den Waschprozess bei der traditionellen Handwäsche und der heutigen Maschinenwäsche (n. Stache u. Großmann, 1985, verändert).....	285
Abbildung 6-33: Veränderung der Waschmitteleinsatzmenge pro Waschgang am Beispiel des Produktes Persil als Pulver bzw. als Megaperls (Daten: Henkel).....	290
Abbildung 6-34: Marktwert für technisch genutzte Enzyme (Daten: IPTS, 1998; Novozymes, 2003).....	291
Abbildung 6-35: Wirkungsfelder von Waschmittelenzymen (Novozymes, 2002)	293
Abbildung 6-36: Beitrag von Enzymen zur Waschleistung (Daten aus Spök, 1998).....	294
Abbildung 6-37: Anteilige Verteilung der Umweltbelastungen eines Waschganges in Deutschland mit einem Kompaktwaschmittel im Jahr 1998 (Daten: AISE, 2001b).....	297
Abbildung 6-38: Massenflüsse bei der Tensidherstellung (n. Stalmanns et al. 1995).....	298
Abbildung 6-39: Vergleich des Rohstoff- (oben) und Energieeinsatzes (unten) für die Herstellung von 1.000 kg des jeweiligen Tensids (Daten: Stalmans et al., 1995)	299
Abbildung 6-40: Ressourcennutzung und Energieeinsatz für die Herstellung von Proteasegranulaten sowie Änderung dieser Parameter während der Prozessentwicklung (1. – 4. Generation); nach Daten von Cognis; zitiert aus Spök (1998).....	301
Abbildung 6-41: Aufarbeitung für extrazelluläres Enzym (Jacobi et al., 1987)	302
Abbildung 6-42: Optimierung der Ausbeute bei der Enzymproduktion (Novozymes, 2003).....	302
Abbildung 6-43: Mengen an Waschmittelbestandteilen pro Waschgang für die Referenzwaschmittel CLC A und B	305
Abbildung 6-44: Einsatz organischer und mineralischer Waschmittelbestandteile pro Waschgang für die Referenzwaschmittel CLC A und B	306
Abbildung 6-45: Teilsysteme der Bilanzierungsmodelle für die Szenarien TRADITIONELLES WASCHMITTEL und MODERNES WASCHMITTEL.....	308
Abbildung 6-46: Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Waschmittelherstellung</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	312
Abbildung 6-47: Szenario MODERNES WASCHMITTEL - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Waschmittelherstellung</i> inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells	313
Abbildung 6-48: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Waschprozess</i>	315
Abbildung 6-49: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den Waschprozess des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL	316
Abbildung 6-50: : In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den Waschprozess des Szenarios TRADITIONELLES WASCHMITTEL	316
Abbildung 6-51: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem <i>Waschwasserreinigung</i>	319
Abbildung 6-52: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	322
Abbildung 6-53: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	327

XVII

Abbildung 6-54: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	329
Abbildung 6-55: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	331
Abbildung 6-56: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	334
Abbildung 6-57: Ozonbildungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	336
Abbildung 6-58: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	339
Abbildung 6-59: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxide - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	340
Abbildung 6-60: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit.....	342
Abbildung 7-1: Vorgehensweise bei der Gefährdungsbeurteilung (in Anlehnung an TRBA 400, 2001).....	357
Abbildung 8-1: Schema der petrochemischen Produktionslinien (MWV, 2003).....	435
Abbildung 8-2: Daten zum Kenntnisstand chemischen Stoffe in der EU (n. EEA, 1998).....	436
Abbildung 8-3: Analogie der petrochemischen und biotechnischen Produktion.....	436
Abbildung 8-4: Schema der Stoffströme bei der Fermentation.....	438

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Datensammlung zur Chemischen Industrie in Deutschland	6
Tabelle 2-2: Produktions- und Abfallaufkommen der Chemischen Industrie (weltweit) (Wubbolts, 2002)	7
Tabelle 2-3: Weltmarkt der traditionellen Biotechnologie um 1990, Schätzwerte nach Leuchtenberger, 1998	9
Tabelle 2-4: Zusammenfassung der Ergebnisse der 21 von der OECD ausgewerteten Fallstudien zum Umweltentlastungspotential innovativer Biotechnologie (OECD, 2001).....	15
Tabelle 2-5: Spezifische Vor- und Nachteile der Biotechnologie erschließen in vielen Bereichen neue Entwicklungsmöglichkeiten (n. Festel, 2004, verändert).....	17
Tabelle 2-6: Projektrelevante Studien des Umweltbundesamtes	19
Tabelle 3-1: Resultate der Recherche projektrelevanter Verfahrensalternativen	26
Tabelle 3-2: Resultate der Recherche projektrelevanter Produktalternativen	28
Tabelle 4-1: Verwendete grafische Elemente in den Abbildungen zu den Teilsystemen	36
Tabelle 4-2: Wirkungskategorien nach Vorschlag des Umweltbundesamtes (Plinke et al., 2000)	38
Tabelle 4-3: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der Sachbilanzparameter zu den Wirkungskategorien und Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse.....	40
Tabelle 4-4: Treibhauspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter (IPCC, 1995)	45
Tabelle 4-5: Versauerungspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter	46
Tabelle 4-6: Eutrophierungspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter (CML, 1992; Klöpffer und Renner, 1995).....	48
Tabelle 4-7: Ozonbildungspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter	49
Tabelle 4-8: Daten zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und –verbräuche in Deutschland und mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr.....	52
Tabelle 4-9: Datenkategorien, denen die Sachbilanzparameter zugeordnet sind	53
Tabelle 4-10: Beispiel der normierten Darstellung als Auszug aus Netto- Ergebnissen	55
Tabelle 5-1: Weltweites Handelsvolumen für wasserlösliche Vitamine sowie Marktanteile für Vitamin B2 1999 (Daten von BASF, zitiert in UK-CC, 2001)	59
Tabelle 5-2: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen	75
Tabelle 5-3: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter	77
Tabelle 5-4: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt.....	80
Tabelle 5-5: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des KEA gesamt	81

Tabelle 5-6: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter	83
Tabelle 5-7: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials	86
Tabelle 5-8: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Treibhauspotentials.....	88
Tabelle 5-9: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials	90
Tabelle 5-10: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Versauerungspotentials	91
Tabelle 5-11: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials	93
Tabelle 5-12: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des terrestrischen Eutrophierungspotentials	94
Tabelle 5-13: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des aquatischen Eutrophierungspotentials	96
Tabelle 5-14: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Ozonbildungspotentials	98
Tabelle 5-15: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	100
Tabelle 5-16: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	102
Tabelle 5-17: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	104
Tabelle 5-18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	106
Tabelle 5-19: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter	113
Tabelle 5-20: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter	116
Tabelle 5-21: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	123
Tabelle 5-22: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	124
Tabelle 5-23: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	126
Tabelle 5-24: Prozessschritte der Lederherstellung (IPTS, 2001).....	128
Tabelle 5-25: Eingesetzte Stoffe/Chemikalien beim Weichen und Äschern.....	146
Tabelle 5-26: Energieverbrauch in der Gerberei (Wittlinger, 2002).....	155
Tabelle 5-27: Praxisüblicher Energieverbrauch der Prozesse Weichen und Äschern	156
Tabelle 5-28: Abwasserbelastungen, die für die Modellierung der Abwassereinigung verwendet wurden (Schill+Seilacher, 2003b).....	158
Tabelle 5-29: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen	163
Tabelle 5-30: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter	164
Tabelle 5-31: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt.....	167

Tabelle 5-32: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter	169
Tabelle 5-33: Quantifizierung des Inputs und der Rückstände aus der Fettschmelze bezogen auf die funktionelle Einheit (Nettoergebnisse)	171
Tabelle 5-34: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials	173
Tabelle 5-35: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials	175
Tabelle 5-36: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials	177
Tabelle 5-37: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des aquatischen Eutrophierungspotentials	180
Tabelle 5-38: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	184
Tabelle 5-39: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	186
Tabelle 5-40: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	188
Tabelle 5-41: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	189
Tabelle 6-1: Bei der Auswertung berücksichtigte Wirkungskategorien, diesen zugeordnete Sachbilanzparameter und Einheiten der Wirkungsindikatorergebnisse	198
Tabelle 6-2: Szenarien zu den EPS-loose-fill-Packmitteln: Berücksichtigte Variationen in den Lebenswegabschnitten (grau hinterlegt: konstant gehaltenes Vergleichsszenario)	200
Tabelle 6-3: Szenarien zu Stärke-loose-fill-Packmitteln: Berücksichtigte Variationen in den Lebenswegabschnitten (grau hinterlegt: konstant gehaltenes Vergleichsszenario)	200
Tabelle 6-4: In der zweiten Auswertungsphase verglichene Stärke- und EPS-Szenarien	202
Tabelle 6-5: Futtermittel- und Güllemengen bezogen auf die funktionelle Einheit	250
Tabelle 6-6: Nährstoffgehalte in gelagerter Schweinegülle mit 6 % TS (nach Standardwerten)	253
Tabelle 6-7: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen	254
Tabelle 6-8: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter	255
Tabelle 6-9: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt	257
Tabelle 6-10: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des KEA gesamt	258
Tabelle 6-11: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter	260
Tabelle 6-12: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials	263
Tabelle 6-13: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Treibhauspotentials	263

Tabelle 6-14: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials.....	265
Tabelle 6-15: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Versauerungspotentials	266
Tabelle 6-16: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials	268
Tabelle 6-17: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des terrestrischen Eutrophierungspotentials	268
Tabelle 6-18: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des aquatischen Eutrophierungspotentials.....	271
Tabelle 6-19: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis der Ozonbildung	273
Tabelle 6-20: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften der Ozonbildung.....	273
Tabelle 6-21: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ.....	276
Tabelle 6-22: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN	276
Tabelle 6-23: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ	278
Tabelle 6-24: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN.....	279
Tabelle 6-25: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ	281
Tabelle 6-26: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN.....	281
Tabelle 6-27: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	283
Tabelle 6-28: Entwicklung der Rezeptur von Persil; Zusammensetzung von 1987 typisch für marktführende P-freie Waschmittel um 1990 (Wagner, 1993).....	288
Tabelle 6-29: Veränderung des Rohstoffeinsatzes am Beispiel eines Marken- Universalwaschmittels (n. Kottwitz u. Upadeck, 1997; zitiert in: Ast u. Sell, 1998).....	295
Tabelle 6-30: Näherungswerte für den Stoff- und Energieeinsatz für die Wäschereinigung in deutschen Haushalten	296
Tabelle 6-31: Waschmittelzusammensetzung für die untersuchten Szenarien [DIN EN 60456]	314
Tabelle 6-32: Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL - Berechnung des BSB und CSB.....	317
Tabelle 6-33: Szenario MODERNES WASCHMITTEL - Berechnung des BSB und CSB.....	318
Tabelle 6-34: Abwasserparameter im Einlauf der Kläranlage.....	319
Tabelle 6-35: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen	320
Tabelle 6-36: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter	321

XXIII

Tabelle 6-37: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt.....	323
Tabelle 6-38: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter	325
Tabelle 6-39: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials	328
Tabelle 6-40: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials.....	330
Tabelle 6-41: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials	332
Tabelle 6-42: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des aquatischen Eutrophierungspotentials	335
Tabelle 6-43: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Ozonbildungspotentials	337
Tabelle 6-44: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.....	340
Tabelle 6-45: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL	341
Tabelle 6-46: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios MODERNES Waschmittel gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL	343
Tabelle 6-47: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	345
Tabelle 7-1: Unterschiede zwischen biotechnischen und chemisch-technischen Produktionsverfahren (n. Festel et al., 2004; verän.).....	347
Tabelle 7-2: Übersicht zu den bei Gefährdungsbeurteilungen zu berücksichtigenden Gefahrenarten (in Anlehnung an Günther, 2001b; SUVA, 2003)	358
Tabelle 7-3: Sicherheitsgrundsätze für Anlagen und Verfahren nach TRGS 300 (1995).....	364
Tabelle 7-4: Gefahrenmerkmale von Gefahrstoffen (ChemG, 2003; GefStoffV, 2004).....	369
Tabelle 7-5: Gefahrensymbole und Gefahrenbezeichnungen für gefährliche Stoffe und Zubereitungen (RL 67/548/EWG, 2003).....	370
Tabelle 7-6: Gefährdungsstufen von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BayVAwS, 2003, § 6)	372
Tabelle 7-7: Eigenschaftsbezogene Mengenschwellen für gefährliche Stoffe in der Störfall-Verordnung (StörfallV, 2000, SFK, 2000, Anl. 2)	374
Tabelle 7-8: Beurteilung des Gefahrenpotentials der eingesetzten Stoffe nach dem Spaltenmodell (BIA, 2001; TRGS 440, 2002, Anl. 2) - Gesundheitsgefahren.....	376
Tabelle 7-9: Beurteilung des Gefahrenpotentials der eingesetzten Stoffe nach dem Spaltenmodell (BIA, 2001; TRGS 440, 2002, Anl. 2) – Umweltgefahren, Brand- und Explosionsgefahren, Gefahren durch das Freisetzungsverhalten, Gefahren durch das Verfahren.....	377
Tabelle 7-10: Gefahrenbezogene Einstufung von Arbeitsstoffen, zu denen keine bzw. unzureichende Informationen vorliegen (TRGS 440, 2002, S. 8)	378
Tabelle 7-11: Umgang mit Datenlücken bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials nach dem Spaltenmodell (BIA, 2001; TRGS 440, 2002).....	379

XXIV

Tabelle 7-12: Notwendige Informationen zur Gefährdungsbeurteilung beim Umgang mit biologischen Arbeitsstoffen (BioStoffV, 2003; LASI, 2001; TRBA 400, 2001)	382
Tabelle 7-13: In TRBA 460 (2002) und TRBA 466 (2002) für Pilze und Bakterien zusätzlich zur Risikogruppe angegebene Informationen.....	387
Tabelle 7-14: Grundlagen der Bewertung des Gefährspotentials gentechnisch veränderter Mikroorganismen (GenTG, 2004, § 7; GenTSV, 2002, §§ 4 f.; RL 98/81/EG, 1998, Art. 5(2) u. Anh. III)	392
Tabelle 7-15: Festlegung der Sicherheitsstufen für biotechnische Produktionsanlagen mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen (GenTSV, 2002, § 7(2))	394
Tabelle 7-16: Informationen zum prozessbezogenen Gefahrenpotential der chemisch-technischen bzw. biotechnischen Riboflavin-Produktion	408
Tabelle 7-17: Azo-Farbstoff-Herstellung: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Herstellung).....	411
Tabelle 7-18: Barbitursäure-Synthese: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Herstellung) – Teil 1.....	412
Tabelle 7-19: Barbitursäure-Synthese: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Herstellung) – Teil 2.....	413
Tabelle 7-20: Chemisch-technische Riboflavin-Synthese aus Azo-Farbstoff und Barbitursäure: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen.....	414
Tabelle 7-21: Riboflavin-Aufkonzentration auf 98 Gew.-%: Gefahrenbezogene Informationen zu beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Produktion).....	415
Tabelle 7-22: Biotechnischen Herstellung von Riboflavin aus Glucose: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen	416
Tabelle 7-23: Riboflavin-Aufkonzentration auf 98 Gew.-%: Gefahrenbezogene Informationen zu beteiligten Stoffen (biotechnische Riboflavin-Herstellung).....	417
Tabelle 7-24: Stoffbezogenes Gefahrenpotential für die chemisch-technische Riboflavin-Produktion - Einstufung nach dem Spaltenmodell der TRGS 440 (2002).....	418
Tabelle 7-25: Stoffbezogenes Gefahrenpotential für die biotechnische Riboflavin-Produktion - Einstufung nach dem Spaltenmodell der TRGS 440 (2002).....	420
Tabelle 7-26: Gefahrenpotential der in der biotechnische Riboflavin-Produktion eingesetzten biologischen Arbeitsstoffe ohne und mit gentechnischer Veränderung (vgl. die im Abschnitt 7.3.5 beschriebene Vorgehensweise).....	427
Tabelle 8-1: Ökologische Grundregeln einer nachhaltigen Wirtschaftsweise.....	434

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABAS	Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe
AGS	Ausschuss für Gefahrstoffe
AISE	Association Internationale de la Savonnerie, de la Détergence et des Produits d'Entretien
ANS	Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V.
AOX	Adsorbierbare organische Halogene
APG	Alkyl Poly Glucoside
ArbSchG	Arbeitsschutz-Gesetz
AWT	Arbeitsgemeinschaft für Wirkstoffe in der Tierernährung e.V.
BACAS	Royal Belgian Academy Council of Applied Sciences
BaP	Abkürzung für Benzo(a)pyren
BArbBl	Bundesarbeitsblatt
BAT	Biologischer Arbeitsplatztoleranzwert
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BfT	Bundesverband für Tiergesundheit e.V.
BG	Berufsgenossenschaft
BGBI	Bundesgesetzblatt
BGCh	Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie
BGI	Berufsgenossenschaftliche Information
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIA	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit
BImSchG	Bundesimmissionsschutz-Gesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutz-Verordnung
BMGS	Bundesministerium für Gesundheit und Soziale Sicherung
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CARMEN	Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e.V.
CAS	Chemical Abstracts Service
CEFIC	European Chemical Industry Council
ChemG	Chemikalien-Gesetz
CIP	Cleaning-in-place

XXVI

Abkürzung	Bedeutung
CML	Center of Environmental Science; TNO - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
CNO	Coconut oil
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOE	US-Department of Energy
DUX	Deutscher Umwelt Index
DVT	Deutscher Verband Tiernahrung e.V.
EC ₅₀	Konzentration, bei der bei 50 % der Organismen, der beobachtete Effekt eintritt
EEA	European Environment Agency
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	Expandiertem Polystyrol
ERP	Enterprise Ressource Planning
ERRMA	European Renewable Resources & Materials Association
EWV	Einwohnerwert
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FAS	Fettalkoholsulfat
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
GefStoffV	Gefahrstoff-Verordnung
GenTG	Gentechnik-Gesetz
GenTSV	Gentechnik-Sicherheits-Verordnung
GVM	Genetisch veränderter Mikroorganismus
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
GWP	Global Warming Potential
HAZOP	Hazard and Operability-Verfahren zur Risikoermittlung
IFAH	International Federation for Animal Health
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IfSG	Infektionsschutzgesetz
IKW	Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V.
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control Bureau des IPTS
IPTS	Institute for Prospective Technological Studies
IVSS	Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit
JArbSchG	Gesetz zum Schutz der arbeitenden Jugend

XXVII

Abkürzung	Bedeutung
K	Krebserzeugend
k.A.	Keine Angabe
KEA	Kumulierter Energieaufwand
L	Als Maßeinheit Liter; ansonsten Luft
LAB	Linear Alkyl Benzene
LAS	Linear Alkyl Benzene Sulphonates
LASI	Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik
LC ₅₀	Letale Konzentration für für 50 % der Versuchstiere
LD ₅₀	Letale Dosis für 50 % der Versuchstiere
M	Erbgutverändernd (mutagen)
Mg	Megagramm
MAK	Mittlere Arbeitsplatz-Konzentration
MuSchG	Gesetz zum Schutz der erwerbstätigen Mutter
Nges	Gesamtstickstoff
NMVOC	Non Methane Volatile Organic Compounds
NRC	National Research Council, USA
PAAG	Verfahren zur Risikoermittlung (Prognose von Störungen, Auffinden der Ursache, Abschätzung der Auswirkungen sowie Gegenmaßnahmen) (identisch mit HAZOP)
PAH	Polyzyklische Kohlenwasserstoffe
PAK	Polyzyklische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dioxine
PCDF	Polychlorierte Furane
PCP	Pentachlorphenol
PIUS	ProduktionsIntegrierter UmweltSchutz
PKO	Palm Kernel Oil
PLT	Prozessleittechnik
POCP	Ozonbildungspotential
PS	Polystyrol
PVA	Polyvinylalkohol
RE	Fruchtschädigend (entwicklungsschädigend)
RF	Beeinträchtigung der Fortpflanzungsfähigkeit (Fruchtbarkeit)
RKI	Robert-Koch-Institut

XXVIII

Abkürzung	Bedeutung
RL	Richtlinie
ROE	Rohöläquivalente
SAS	Secondary Alkane Sulphonate
SE	Seltene Erden
SFK	Störfall-Kommission
SKE	Steinkohleeinheit
SRU	Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
TAA	Ausschuss für die Anlagensicherheit
TKW	Technischer Kontrollwert
TOC	Total Organic Carbon
TPS	Tetrapropylenbenzolsulfonat
TRAS	Technische Regel für Anlagensicherheit
TRBA	Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe
TRGS	Technische Regel für Gefahrstoffe
TRK	Technische Richtkonzentration
TS	Trockensubstanz
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnung
VCI	Verband der chemischen Industrie
VOC	Volatile Organic Compounds
VwVwS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe
W	Wasser
WCED	World Commission on Environment and Development
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHO	World Health Organisation
WM	Waschmittel
ZKBS	Zentrale Kommission für biologische Sicherheit
ZP	Zwischenprodukt

1 Zusammenfassung

Mit der Studie wurde untersucht, ob die Nutzung biotechnischer Produktionsverfahren und biotechnisch gewonnener Produkte im Vergleich zu chemisch-technischen Alternativen Entlastungseffekte für die Umwelt bedingen kann.

Zunächst wurden im technischen und großtechnischen Maßstab realisierte Verfahren recherchiert. Anschließend wurden mit Hilfe eines standardisierten ökobilanziellen Vergleichs ausgewertet, welche Umweltbelastungen aus der Nutzung der biotechnischen und der chemisch-technischen Verfahrens- bzw. Produktalternativen resultieren.

Erfassung von Umweltentlastungen beim Verfahrensvergleich

Bereits in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde Vitamin B2 mit biotechnischen Verfahren gewonnen. Aus Kostengründen hatten chemisch-technische Verfahren die frühen Fermentationsverfahren zunächst vollständig verdrängt. Durch bio- und gentechnische Optimierungen der Fermentationsverfahren wurden jedoch große ökonomische und ökologische Einsparpotentiale erschlossen, so dass die biotechnischen Verfahren inzwischen die chemisch-technischen Verfahren weitgehend ersetzt haben.

Auch bei der Herstellung von Leder können durch die verstärkte Nutzung moderner Enzympräparate Umweltentlastungspotentiale erschlossen werden: Vergleichende Auswertungen eines enzymatischen und eines chemischen Aufbereitungsschrittes bei der Lederherstellung ergaben nahezu für alle der ausgewerteten umweltrelevanten Parameter Vorteile für den enzymatischen Prozess.

Erfassung von Umweltentlastungen beim Produktvergleich

Zusätzlich zu den Verfahrensalternativen, mit denen identische Produkte hergestellt werden, wurden in die Auswertungen funktionsanaloge Produkte einbezogen, die biotechnisch oder chemisch-technisch hergestellt werden. Beispiele funktionsanaloger Produkte waren: Loose-fill-Packmittel auf Stärke- bzw. Polystyrolbasis; Vollwaschmittel mit bzw. ohne Enzymeinsatz; chemische und biotechnische Leistungsförderer bei der Tierzucht. Bei diesen Betrachtungen wurde neben der Produktherstellung auch die Nutzungsphase der Produkte hinsichtlich der resultierenden Umweltbelastungen ausgewertet.

Aufgrund der Komplexität der in der Praxis möglichen realen „Produktlebenswege“ können die aus der Herstellung und Nutzung der Produkte resultierenden Umweltbelastungen über weite Bereiche streuen. Am Beispiel der Loose-fill-Packmittel zeigte sich, dass die Produkte auf Stärkebasis bei einem unter Umweltgesichtspunkten optimierten Produktlebensweg Vorteile haben können. In der Praxis kommen jedoch auch Nutzungsformen vor, bei denen die Umweltbilanz der Packmittel auf Polystyrolbasis günstiger ist. Die Rezepturen von Vollwaschmitteln haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert. Moderne enzymhaltige Vollwaschmittel ermöglichen heute bereits bei niedrigeren Temperaturen Waschleistungen, die über die von traditionellen Waschmitteln selbst bei hohen Waschttemperaturen erreichten Waschleistungen hinausgehen. Die Weiterentwicklung der Waschmittel hat die mit dem Waschen verbundenen Umweltbelastungen sehr stark reduziert. Auswertungen der Umweltbelastungen bei der Schweinezucht zeigten, dass der Einsatz eines chemisch-technisch und eines biotechnisch hergestellten Leistungsförderers gleichermaßen zur Reduktion der Umweltbelastungen beitragen kann.

Für die Auswertungen sind aktuell betriebene Verfahren bzw. hergestellte Produkte herangezogen worden. Die Ergebnisse repräsentieren damit den Entwicklungsstand zum Untersuchungszeitpunkt, ohne dass bei den Verfahrens- und Produktalternativen bereits sämtliche Umweltentlastungspotentiale erschlossen worden sind.

Gefahrenpotentiale biotechnologischer bzw. chemisch-technischer Produktion

Im Vergleich zu chemisch-technischen Produktionsverfahren gilt die Biotechnologie als vergleichsweise sanft, da meist unter milden Bedingungen wie Raumtemperatur, Normaldruck und wässrigem Milieu gearbeitet wird. Damit wird assoziiert, dass das Gefahrenpotential biotechnologischer Prozesse in der Regel wesentlich geringer ist. Ob diese Einschätzung einer weitergehenden Analyse standhält, wurde exemplarisch am Beispiel der biotechnischen bzw. chemisch-technischen Produktion von Vitamin B2 untersucht. Dabei wurden zuerst die Gefahrenpotentiale ermittelt und dann vergleichend gegenübergestellt und bewertet.

2 Ausgangslage, Zielsetzung und Aufgabenstellung

2.1 Umweltpolitische Zielsetzungen

Die internationale Staatengemeinschaft hat sich auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro zum Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung bekannt, das die Brundtland-Kommission für Umwelt und Entwicklung 1987 in ihren Bericht „Our Common Future“ vorstellte (WCED, 1987). Mit der Agenda 21 wurde ein globales Aktionsprogramm formuliert, das von den Unterzeichnerstaaten die Entwicklung von Strategien fordert, die eine wirtschaftlich leistungsfähige, sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung zum Ziel haben.

Die Bundesregierung hat 2002 eine Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland veröffentlicht und 21 Schlüsselindikatoren benannt, deren Monitoring die Annäherung Deutschlands an die benannten Nachhaltigkeitsziele aufzeigen soll (Bundesregierung Deutschland, 2002). 6 der 21 Schlüsselindikatoren betreffen Umweltbelange und es werden folgende Ziele angestrebt:

- Ressourcenschonung: Erhöhung der Ressourcenproduktivität im Vergleich zu 1990 (Materialien) bzw. 1994 (Energie) bis 2020 von 100 auf 200 %
- Erneuerbare Energien: Steigerung des Anteils am Primärenergieverbrauch bis 2010 auf 4,2 % und am Stromverbrauch auf 12,5 %
- Klimaschutz: Reduktion der Treibhausgase bis 2010 um 15 % im Vergleich zu 1990
- Luftqualität: Reduktion der Belastung mit wichtigen Luftschadstoffen gegenüber 1990 bis 2010 um rund 70 %
- Flächeninanspruchnahme: Begrenzung der Zunahme von derzeit 129 auf 30 ha pro Tag bis 2020
- Artenvielfalt: Stabilisierung der Artenvielfalt auf hohem Niveau

Die aktuellen Daten der *Umweltökonomischen Gesamtrechnung* Deutschlands verdeutlichen das hohe Ausmaß der Nutzung der Umweltressourcen (s. Abbildung 2-1): Die Bilanz wies für 2001 eine Entnahme von 43,9 Mrd. m³ Wasser, 618 Mio. Tonnen Sauerstoff und 3,66 Mrd. Tonnen Feststoffen aus. Der überwiegende Anteil der aus der

Umwelt entnommenen Feststoffe waren mineralische Stoffe. Außerdem wurden insgesamt rd. 470 Mio. Tonnen an Energieträgern sowie 292 Mio. Tonnen biotischer Stoffe (inkl. Einfuhren) für wirtschaftliche Zwecke genutzt.

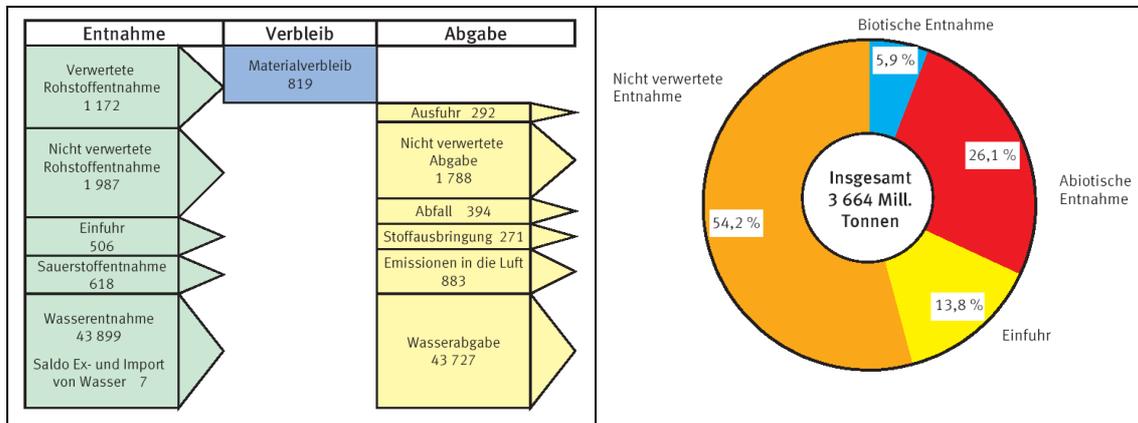


Abbildung 2-1: Links: Materialkonto der 2001 in Deutschland genutzten Umweltressourcen (in Mio. Tonnen); rechts: Anteile der entnommenen Feststoffe (UGR, 2003)

Die Bilanz wies zudem eine Abgabe von 3,63 Mrd. Tonnen Stoffen aus: 1,79 Mrd. Tonnen wurden unmittelbar nach der Entnahme weitgehend unverändert wieder abgelagert. Mehr als 1,5 Mrd. Tonnen Stoffe wurden aus dem Wirtschaftsprozess jedoch in einer Form abgegeben, die Veränderungen der stofflichen Qualität der Umwelt zur Folge hat: 883 Mio. Tonnen wurden in die Luft emittiert, 271 Mio. Tonnen diffus als Stoffe ausgebracht und 394 Mio. Tonnen als Abfall erfasst. In der Bilanz müssen zudem noch die Änderungen der Qualität der 43 Mrd. m³ Wasser berücksichtigt werden, die wirtschaftlich genutzt werden.

Geeignete Umweltschutzmaßnahmen sollen dazu beitragen, die Intensität der Nutzung der Umweltressourcen sowie die dadurch bedingten stofflichen Veränderungen der Umwelt auf ein umweltverträgliches Ausmaß zu reduzieren, ohne die durch die wirtschaftlichen Aktivitäten angestrebte Wertschöpfung maßgeblich negativ zu beeinträchtigen.

Ansätze zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums von der Nutzung der Umweltressourcen sind in Deutschland inzwischen erkennbar (s. Abbildung 2-2, links). Das Umweltbundesamt hat einen Kennwert eingeführt, der Entwicklungstrends des Umweltschutzes in Deutschland widerspiegelt - den Deutschen Umweltindex, kurz DUX.

Abbildung 2-2 (rechts) zeigt, dass derzeit erst 2.013 von angestrebten 6.000 DUX-Punkten erreicht worden sind. Die angestrebten Zielwerte entsprechen den oben genannten Zielwerten der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Beim Klimaschutz und der Luftreinhaltung ist eine weitgehende Annäherung an die Zielvorgaben bereits absehbar, doch werden erhebliche Anstrengungen erforderlich sein, um die nationalen Zielvorgaben für die Rubriken Wasser, Energie, Ressourcen und Boden realisieren zu können. Obwohl der Stand der in Deutschland realisierten Umweltschutzmaßnahmen im europäischen und im weltweiten Vergleich als fortgeschritten eingestuft werden kann (EEA, 2003; UNEP, 2002), ist der Handlungsbedarf auf nationaler wie internationaler Ebene unverändert groß, wenn das 1987 formulierte Leitbild einer Nachhaltigen Entwicklung Realität werden soll.

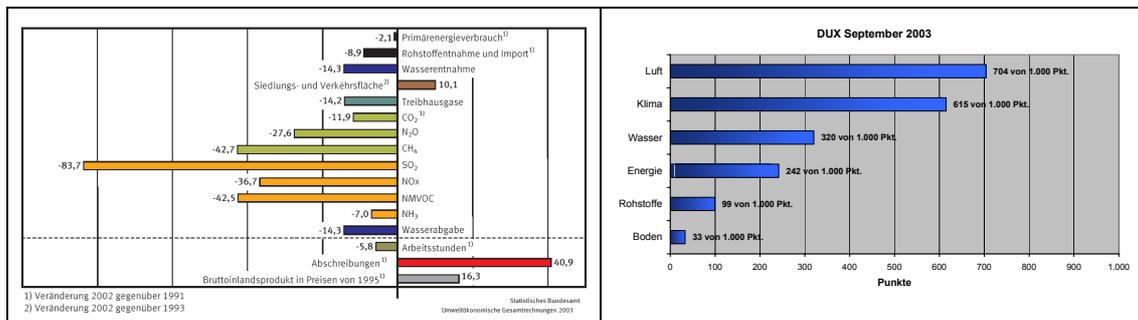


Abbildung 2-2: Links: Veränderter Einsatz von Umweltressourcen für wirtschaftliche Zwecke in Deutschland 2001/2 gegenüber 1991 in % (UGR, 2003); rechts: Stand des Deutschen Umweltindex (DUX) (UBA, 2004)

2.2 Umweltschutzaufwendungen der Chemische Industrie

Die Chemische Industrie Europas ist zu rd. 28 % am weltweiten Branchenumsatz von 1.847 Mrd. Euro beteiligt; 25 % der europäischen Chemieproduktion wird von deutschen Unternehmen erwirtschaftet (VCI, 2003a; CEFIC, 2004). Rd. 70 % der Chemieproduktion wird an industrielle Weiterverarbeiter (Automobilindustrie, Verpackungs- und Bauindustrie) abgegeben. Chemische Erzeugnisse kommen zudem in den Bereichen Gesundheit, Umwelt und Ernährung zum Einsatz.

Die Chemische Industrie ist ein ressourcen- und energieintensiver Wirtschaftsbereich (vgl. Tabelle 2-2), der mit hohen finanziellen Aufwendungen produktionsbedingte Umweltbelastungen reduziert (s. Abbildung 2-3). Die Chemische Industrie setzt allein 26 % der 9,3 Mrd. Euro ein, die vom Produzierenden Gewerbe (ohne Bau, Energie- und

Wasserversorgung) 2002 an laufenden Aufwendungen für den Umweltschutz ausgegeben wurden.

Tabelle 2-1: Datensammlung zur Chemischen Industrie in Deutschland

	Produktionsbereich insgesamt	Herstellung chemischer Erzeugnisse	Anteil	Quelle
Bruttowertschöpfung	1.801,4 Mrd. € **	29,3 Mrd. €	1,6 %	[1, 2]
Beschäftigte	8,9 Mio.**	0,476 Mio.	1,2 %	[1, 2]
Laufende Umweltschutzkosten	9,28 Mrd. € **	2,41 Mrd. €	26 %	[4]
Wassereinsatz	40,8 Mrd. m ³ **	--	7,7 %	[1]
Spez. Wassereinsatz*	22,6 m ³ /1.000 € **	93,5 m ³ /1.000 €	--	[1]
Nutzung fossiler Rohstoffe	339 Mio. Mg***	35 Mio. Mg SKE	--	[1, 3]
Spez. Einsatz foss. Rohstoffe*	0,19 Mg/1.000 €	1,2 Mg/1.000 €	--	[1]
Energieverbrauch	10.530 Petajoule**	--	9,9 %	[1]
Spez. Energieverbrauch*	5,8 MJ/€ **	40,2 MJ/€	--	[1]
CO ₂ -Emissionen	685 Mio. Mg **	--	2,4 %	[1]
Spez. CO ₂ -Emissionen*	0,37 kg/€ **	0,58 kg/€	--	[1]
Abwasser	33,03 Mrd. m ³ **	--	9,1 %	[1]

* bezogen auf die Bruttowertschöpfung; ** Daten für alle Produktionsbereiche; *** Annahme: 72 % des Gesamtverbrauchs

[1] UGR, 2003; [2] VCI, 2003a; [3] Rothermel, 2003; [4] Daten für 2002 von www.destatis.de

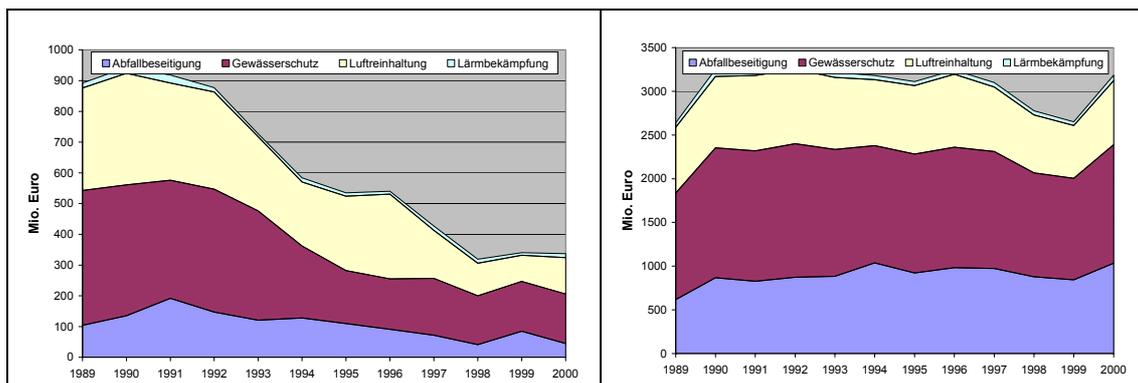


Abbildung 2-3: Umweltschutzkosten der Chemischen Industrie in Deutschland: Links: Umweltschutzinvestitionen; rechts: Umweltschutzbetriebskosten (Daten: VCI, 2003a)

Neben additiven nutzt die Chemische Industrie vor allem auch prozessintegrierte Umweltschutztechniken, um das Aufkommen von Reststoffen zu vermeiden und eine weitgehende Verwertung der genutzten Rohstoffe zu realisieren (Christ, 2000). Abbildung

2-4 zeigt am Beispiel der europäischen Chemieindustrie, dass die getroffenen Maßnahmen eine Steigerung des Produktionsvolumens bei reduziertem Energieeinsatz und verringerten Kohlendioxidemissionen ermöglichten.

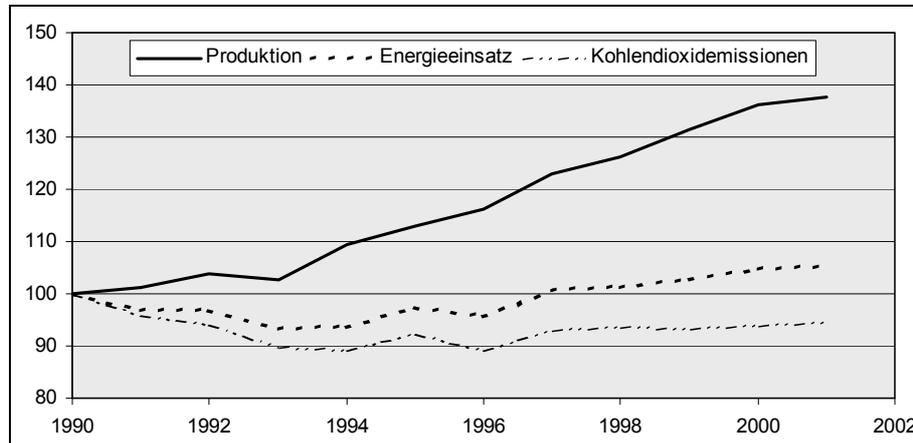


Abbildung 2-4: Verlauf des Produktionsvolumens sowie des Energieeinsatzes sowie der Kohlendioxidemissionen der europäischen Chemieindustrie (Daten: CEFIC, 2004)

Weltweit hat sich die Chemieproduktion seit 1975 mehr als verdreifacht; das Aufkommen produktionsbedingter Abfälle soll im gleichen Zeitraum jedoch auf die Hälfte des Wertes von 1975 gesunken sein (vgl. Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Produktions- und Abfallaufkommen der Chemischen Industrie (weltweit) (Wubbolts, 2002)

	Produktion	Abfälle, spez.	Trend	Abfälle
	Mio. Mg/a	Mg/Mg	Mg/Mg	Mio. Mg/a
	1975 ⇒ 1995	1975 ⇒ 1995		1975 ⇒ 1995
Petrochemikalien	100 ⇒ 300	0,1 ⇒ 0,01	⇒ 0,001	10 ⇒ 2,5
„Bulk Chemikalien“	10 ⇒ 25	1 ⇒ 0,1	⇒ 0,01	10 ⇒ 2,5
Feinchemikalien	0,5 ⇒ 3	10 ⇒ 2	⇒ 1	5 ⇒ 6
Spezialchemikalien	0,1 ⇒ 0,6	50 ⇒ 10	⇒ 5	5 ⇒ 6
Total (gerundet)	110 ⇒ 330			30 ⇒ 15
Produktion + Abfall	140			345
Produktion : Abfall	4:1			22:1

Die Chemische Industrie hat sich im Rahmen der Responsible Care Initiative verpflichtet, für eine sichere Herstellung, Verwendung und Entsorgung chemischer Produkte auf einem hohen Niveau zu sorgen (Brandt, 2002; VCI, 2003b). In den jährlichen Responsible Care-Berichten dokumentiert die Branche zudem, inwieweit sie die in der Agenda 21 der Vereinten Nationen und im Aktionsplan des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg eingeforderten Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung umgesetzt haben. Dargestellt werden u.a. Verbesserungen des Gesundheitsschutzes am Arbeitsplatz, ein hoher Sicherheitsstandard bei den Produktionsanlagen und beim Transport, die Reduzierung von Emissionen und ein sparsamer Rohstoff- und Energieverbrauch.

Zahlreiche Chemie-Unternehmen dokumentieren ihre Bemühungen zur Umsetzung des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung, indem sie sich um die Aufnahme in so genannte Nachhaltigkeitsindices an den internationalen Börsen bewerben. Im Dow Jones Sustainability Index World waren Anfang 2004 mehr als 300 international tätige Konzerne unterschiedlichster Branchen gelistet.

Den Fortschritten der Chemischen Industrie bei der Etablierung einer umweltverträglichen Herstellung ihrer Produkte steht jedoch - unter Umweltgesichtspunkten - ein großer Handlungsbedarf bei der Auswahl der Rohstoffe gegenüber: Über 95 % der eingesetzten organischen Rohstoffe sind nicht regenerierbare fossile Rohstoffe (BACAS, 2004; Rothermel, 2003). Da die Produkte und die Energie im hohen Ausmaß aus fossilen Rohstoffen gewonnen werden, ist die Chemische Industrie stärker als andere Branchen betroffen, wenn diese fossile Rohstoffe zukünftig nicht mehr verfügbar sind.

2.3 Beitrag der Biotechnologie zur nachhaltigen Entwicklung

Bis Mitte der 90er Jahre waren die Haupteinsatzbereiche der Biotechnologie der Nahrungsmittelsektor und der Umweltschutzbereich (s. Tabelle 2-3). Die 1992 formulierte Agenda 21 zur Rio-Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung wies jedoch im Abschnitt 16 auf das Entwicklungspotential der Biotechnologie hin:

„Die Biotechnologie umfaßt sowohl die im Rahmen der modernen Biotechnologie entwickelten neuen Techniken als auch die bewährten Ansätze der traditionellen Biotechnologie. Als innovativer, wissensintensiver Forschungsbereich bietet sie eine Vielzahl nützlicher Verfahrenstechniken für vom Menschen vorgenommene Veränderungen der Desoxyribonukleinsäure (DNS), oder des genetischen Materials in Pflanzen, Tieren und Mikroorganismengruppen, deren Ergebnis überaus nützliche Produkte und Technologien sind. Die Biotechnologie ist nicht in der Lage, von sich aus all die grundlegenden Umwelt- und Entwicklungsprobleme zu lösen, weshalb die Erwartungen durch eine realistischere Sicht eingeschränkt werden sollten. Dennoch verspricht die Biotechnologie, einen bedeutenden Beitrag zur Erzielung von Fortschritten beispielsweise in der Gesundheitsversorgung, in der Ernährungssicherung in Form von nachhaltigen Anbaupraktiken, einer verbesserten Versorgung mit Trinkwasser, leistungsfähigeren industriellen Erschließungsprozessen für die Umwandlung von Rohstoffen, der Förderung nachhaltiger Aufforstungs- und Wiederaufforstungsverfahren und der Entgiftung von Sonderabfällen zu leisten.“

Tabelle 2-3: Weltmarkt der traditionellen Biotechnologie um 1990, Schätzwerte nach Leuchtenberger, 1998

Applikationsgebiet	Produktbeispiele	Wert US-\$ pro Mg	Gesamt (Mrd. US-\$)
Nahrungs- und Genussmittel-Industrie	Getränke (Bier, Wein u. a.), Fleisch- und Fischprodukte, Backwarenzusätze (z. B. Hefe), Lebensmittelzusätze (Antioxidantien, Färb- und Geschmacksstoffe u. a.), Vitamine, Stärkeprodukte	500 - 7.000	280
Umweltschutz	Abwasserreinigung, Abfallverwertung, Beseitigung von Ölverschmutzungen	1 - 300	250
Pharma-Industrie	Antibiotika, Diagnostika (Antikörper u. a.) Vakzine, Steroide, Vitamine, Alkaloide	0,05 - 20 Mio.	15
Chemie-Industrie	Grundchemikalien/Massenprodukte: Ethanol, Aceton, Butanol, Glucose u. a. Feinchemikalien: Enzyme, Duftstoffe u. a.	500 - 5.000	5
Landwirtschaft	Futterzusätze, Vakzine, Biopestizide, Silage, Wachstumsstoffe, Kompost	100 - 500.000	2
Energiesektor	Ethanol, Biomasse als Ausgangsstoff	500 - 2.000	1,5

Heute zeichnet sich eine Umsetzung der in Agenda 21 benannten Entwicklungen ab. Einsatzbereiche der traditionellen Biotechnologie weiten sich aus: So werden in

Deutschland nunmehr nicht nur in rd. 10.000 kommunalen Kläranlagen biologische Reinigungsstufen betrieben, sondern inzwischen 7,6 Mio. Mg Bioabfälle in biologischen Verwertungsanlagen genutzt (BMU, 2004a). Innerhalb von einem Jahrzehnt sind zudem mehr als 1.900 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 250 MW neu in Betrieb genommen worden (Fachverband Biogas, 2004). Insgesamt ist der Beitrag der Biomassenutzung zur Stromproduktion von 222 GWh in 1990 auf nunmehr 5.140 GWh in 2003 angestiegen (BMU, 2004b).

Die Fortschritte der Molekularbiologie und vor allem der Gentechnik tragen zudem dazu bei, dass sich die Biotechnologie auch in jenen Anwendungsbereichen rasch fortentwickelt, in denen sie bislang erst ein geringes Marktpotential besaß. Die European Association for Bioindustries nennt als Anwendungsfelder der modernen Biotechnologie die Bereiche:

- Healthcare Biotechnology („Rote Biotechnologie“): Aktuell sollen Bioprodukte (Proteine, Antikörper, Enzyme) bereits einen Marktanteil von ~ 20 % haben und Neuentwicklungen sollen zu 50 % Bioprodukte sein.
- Green Biotechnology („Grüne Biotechnologie“): Die Nutzung von gentechnisch veränderten Pflanzen (und Tieren) in der Landwirtschaft begann vor 10 Jahren. In den USA werden inzwischen 46 % des Mais, 86 % des Sojas und 76 % der Baumwolle mit gentechnisch verändertem Saatgut angebaut (BIO, 2004). Aktuelle Entwicklungen haben die Nutzung von Pflanzen (und Tieren) für die kostengünstige Produktion von Pharmaprodukten und Industrierohstoffen zum Ziel (D'Aquino, 2003).
- White Biotechnology („Weiße Biotechnologie“): Nutzung der Biotechnologie als einen Baustein für eine nachhaltige zukunftsverträgliche Chemie („Green Chemistry“) (BACAS, 2004).

Im Rahmen dieser Studie sind vor allem die Entwicklungen im Bereich der White Biotechnology von Interesse. Wie die in Abbildung 2-5 dargestellten Marktdaten zeigen, ist der Umsatz mit industriell hergestellten Bioprodukten im Vergleich zum weltweiten Gesamtumsatz der Chemischen Industrie (s. oben) kleiner als 5 %.

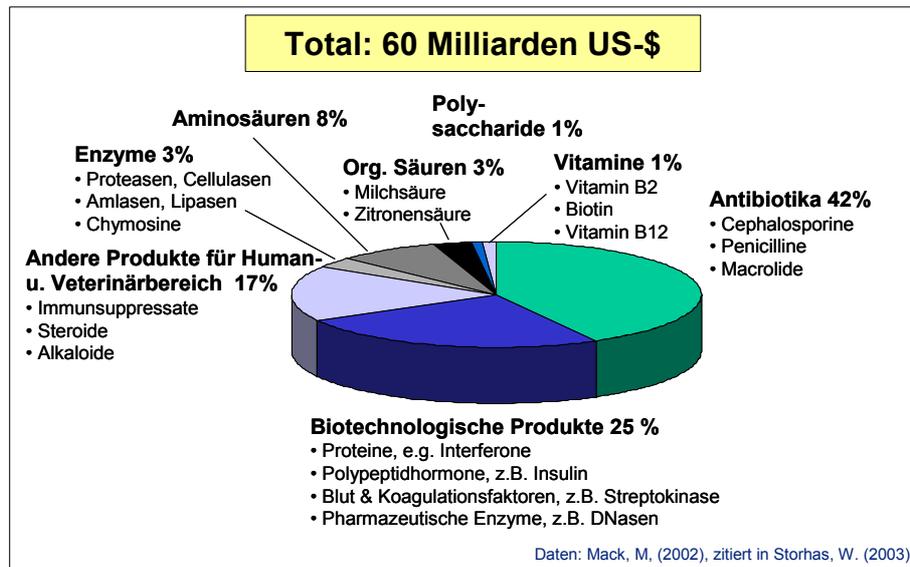


Abbildung 2-5: Weltmarktdaten der im Jahr 2000 biotechnisch hergestellten Produkte

Viele der vor rd. 100 Jahren eingeführten biotechnischen Produktionsverfahren (z.B. für Aceton, Butanol, u.a.) sind in der Folgezeit durch ökonomischere chemisch-technische Verfahren substituiert worden, die als Rohstoffe anstelle von Biomassen Petrochemikalien nutzen. Heute werden vor allem jene Produkte mit biotechnischen Verfahren hergestellt, für die bislang keine bzw. keine kostengünstige chemisch-technische Herstellungsalternativen entwickelt werden konnten.

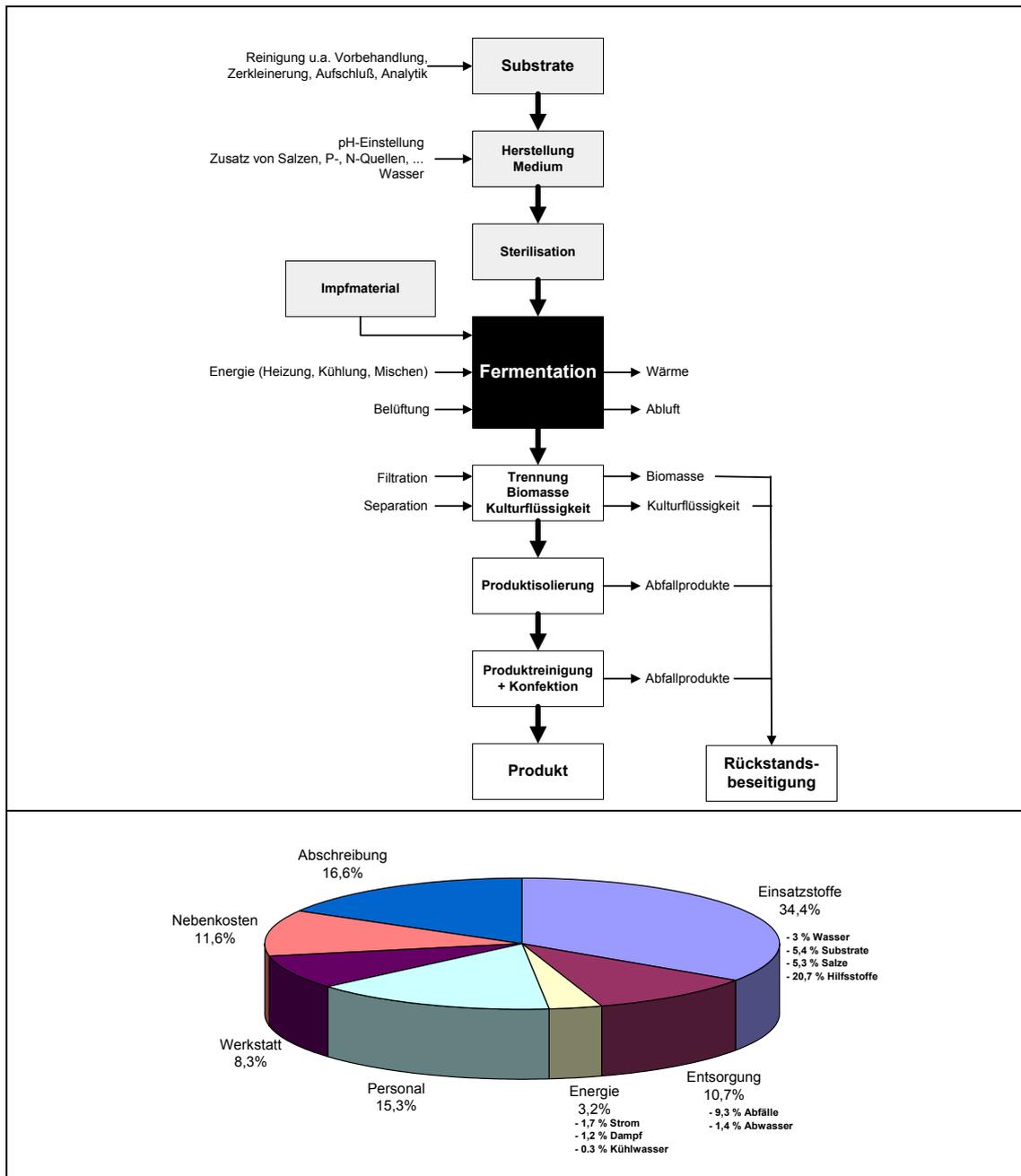


Abbildung 2-6: Oben: Grundsätzlicher Ablauf vieler biotechnischer Verfahren (n. Rehm, 1980); unten: Beispielkalkulation der Kostenstruktur für die Produktion eines intrazellulären Enzyms (Daten: Storhas, 2003)

Abbildung 2-6 verdeutlicht, dass neben dem eigentlichen Bioprozess meist umfangreiche vorbereitende und nachbereitende Verfahrensschritte für eine biotechnische Pro-

duktgewinnung notwendig sind, die 50 - 90 % der gesamten Produktionskosten ausmachen können (van Hoek et al., 2003).

Im einfachsten Fall einer Bioproduktion, der Biogasgewinnung, können biogene Mischabfälle ohne größere Aufbereitung und energieaufwendige Sterilisation in einfach konstruierten durchmischten Bioreaktoren vergoren werden. Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit des Produktes Methan ist keine gesonderte Produktabtrennung notwendig. Der flüssige Fermentationsrückstand wird meist landwirtschaftlich verwertet, so dass der Gesamtprozess abfallarm ist und bei einer energetischen Verwertung des Biogases Erlöse durch die Energieeinspeisung ermöglicht (Hoppenheidt u. Mücke, 1999).

Sehr viel höhere Aufwendungen sind dagegen notwendig, wenn z.B. ein intrazelluläres Enzym hergestellt werden soll: Für industrielle Hochleistungsproduktionsstämme sind meist definierte Kulturmedien und Kulturbedingungen erforderlich. Die Anwendung von Reinkulturen macht eine aseptische Prozessführung notwendig. Zur Produktgewinnung muss die Biomasse aufgeschlossen werden und die abgetrennten Enzyme müssen aufwendig aufgereinigt und stabilisiert werden. Abbildung 2-6 zeigt das Ergebnis einer Abschätzung der Kostenstruktur für einen derartigen Fall: Auffällig sind die hohen Kosten für die Einsatzstoffe (Substrate, Hilfsmittel für die Produktgewinnung). Zudem fallen relativ hohe Entsorgungskosten an, da der überwiegende Anteil der produzierten Biomasse als Abfall entsorgt werden muss und große Mengen an hochbelasteten Abwässern anfallen.

Hohe Rohstoffkosten sowie hohe Produktionskosten haben deshalb die Anwendung biotechnischer Produktionsverfahren in der Vergangenheit eingeschränkt. Am Beispiel der Abbildung 2-7 wird jedoch deutlich, dass die Wettbewerbsfähigkeit biotechnischer Produktionsverfahren durch gentechnische Optimierungen der Produktionsstämme inzwischen erheblich verbessert wurde: Im Vergleich zur Enzymproduktion mit einem konventionellen Produktionsstamm werden durch die Anwendung des gentechnisch optimierten Produktionsstammes Ressourcen und Energie eingespart. Gentechnische Optimierungen können die Produktausbeuten und die Produkteigenschaften verbessern, sodass sich z.B. Einsparungen bei der Fermentation, der Enzymisolierung und der Enzymanwendung erzielen lassen. Aufgrund der ökonomischen und ökologischen Vorteile kommen heute nahezu ausschließlich gentechnisch optimierte Enzymproduzenten für die Herstellung technischer Enzyme zum Einsatz.

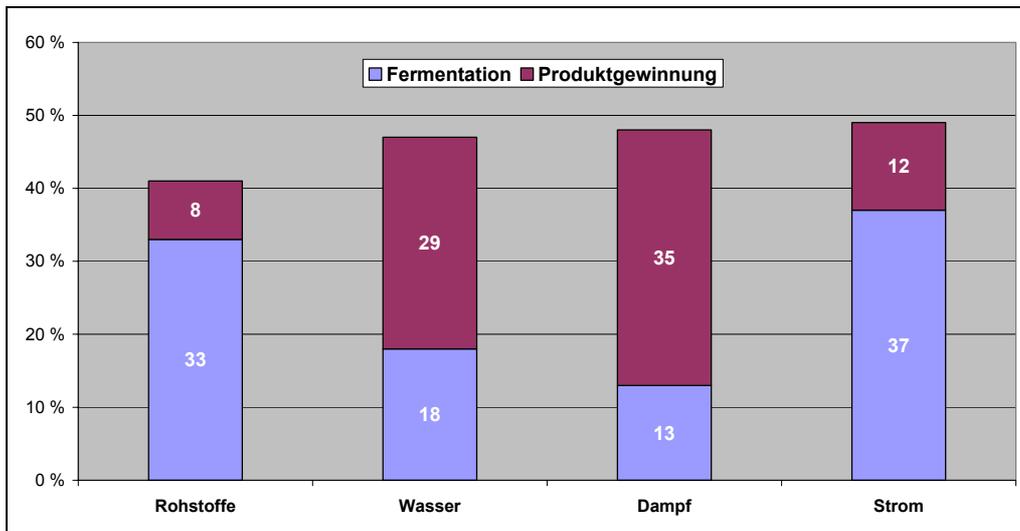


Abbildung 2-7: Einsparungen an Rohstoffen, Wasser, Dampf und Strom durch die Verwendung eines genetisch optimierten Enzymproduzenten

Daten jeweils im Vergleich zum Verfahren mit einem konventionellen Produktionsstamm (Daten von Novo Nordisk, zitiert in OECD, 1998)

Analoge Optimierungen der Produktionsprozesse wurden für unterschiedlichste Anwendungsbereiche der Biotechnologie erarbeitet und neuartige Anwendungen der Biotechnologie befinden sich in der Entwicklung (Aristidou et al., 2000; Chartrain et al., 2000; Cotassa et al., 2002; Desai, 2002; Wubbolts, 2002).

Obwohl die Prozessoptimierungen primär aus ökonomischen Gründen erfolgten, können sich dadurch auch ökologische Vorteile ergeben. Die OECD (2001) hat in 21 Fallstudien überprüft, inwieweit durch die Anwendung moderner biotechnischer Verfahren eine Reduktion der produktionsbedingten Umweltbelastungen erzielt wurden. In Tabelle 2-4 sind die bei den Auswertungen ermittelten Umweltentlastungspotentiale zusammengefasst, die bei den überprüften Anwendungsfällen (über einen weiten Bereich streuende) Umweltentlastungen dokumentieren.

Da die Nutzung der modernen biotechnischen Verfahren deutliche Reduktionen der Kosten und der Umweltbelastungen in Aussicht stellen, erwarten verschiedene Autoren zukünftig einen starken Anstieg des Marktanteils biotechnischer Produkte (s. Abbildung 2-8). Sowohl Bachmann et al. (2000) als auch Festel et al. (2004) gehen davon aus, dass sich der Umsatz biotechnischer Produkte bis 2010 verzehnfacht und auf rd. 20 % des weltweiten Chemieumsatzes ansteigen wird.

Tabelle 2-4: Zusammenfassung der Ergebnisse der 21 von der OECD ausgewerteten Fallstudien zum Umweltentlastungspotential innovativer Biotechnologie (OECD, 2001)

Fallstudie	Einsatz von		Emission in		Betriebskosten
	Energie	Rohstoffen	Luft	Wasser	
1	Gleich	-75 % fossile Rohst.	-50 %	-66 %	-50 %
2			-90 %	-33 %	-90 % (umweltbez.)
3	Strom +; Dampf -		-80 %	-80 %	Reduktion
4	Gleich				-43 %
6	-80 %		Geringer	Geringer	Geringer
7		Geringer	Geringer	Geringer	-54 % (Rohstoffe)
8	Geringer		Geringer		Geringer
10	-70 %			-80 %	-40 %
11		-50 % Grundwasser			-30 % (Grundwass.)
12	-15 %	Geringer (Wasser)		Geringer	-9 %
13	-30 – 40 %	Geringer		Geringer	
16		-35% Cl ₂ ; -65% ClO ₂		Geringer	
17		Geringer (Recycling)		Geringer	
18	Geringer		Geringer		Geringer
21				Geringer	Produktivitätsanstieg

Titel der Fallstudien: 1 Manufacture of Riboflavin (Vitamin B2); 2 Production of 7-Amino-cephalosporanic Acid; 3 Biotechnological Production of the Antibiotic Cephalixin; 4 Bioprocesses for the Manufacture of Amino Acids; 6 Enzymatic Production of Acrylamide; 7 Enzymatic Synthesis of Acrylic Acid; 8 Enzyme-Catalysed Synthesis of Polyesters; 10 A Vegetable Oil Degumming Enzyme; 11 Water Recovery in a Vegetable-processing Company; 12 Removal of Bleach Residues in Textile Finishing; 13 Enzymatic Pulp Bleaching Process; 16 On-site Production of Xylanase; 17 A Gypsum-free Zinc Refinery; 18 Copper Bioleaching Technology; 21 Use of Enzymes in Oil-well Completion

Die Prognosen gehen übereinstimmend davon aus, dass der Umsatz mit biotechnischen Feinchemikalien bis 2010 60 % des Umsatzes mit chemisch-technisch produzierten Feinchemikalien erreichen kann. Bei den anderen Chemieproduktsparten wird ein Anstieg des Umsatzes mit biotechnischen Produkten auf bis zu 15 – 20 % des Umsatzes mit chemisch-technisch produzierten Produkten erwartet.

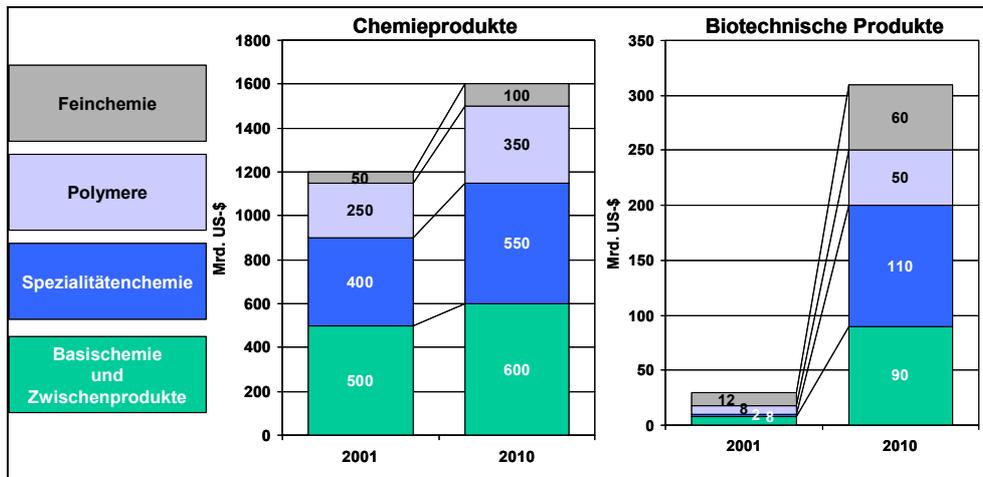


Abbildung 2-8: Weltweiter Umsatz chemischer und biotechnischer Produkte im Jahr 2001 und Prognosedaten für 2010 (Daten: Festel, 2004)

Voraussetzungen für das von McKinsey prognostizierte Wachstum der biotechnischen Produktion sind (zitiert von Sijbesma, 2003):

- die Realisierung der erwarteten technischen Entwicklungen
- die Realisierung der erwarteten Nachfrage
- die Realisierung der erwarteten Preisentwicklung für die Rohstoffe
- geeignete politische Rahmenbedingungen

Auch bei suboptimalen Rahmenbedingungen erwartet McKinsey ein starkes Wachstum der biotechnischen Produktion, dass jedoch unter optimalen Rahmenbedingungen doppelt so groß angenommen wird.

In Tabelle 2-5 sind neben den Vorteilen biotechnischer Produktionsprozesse auch wichtige Nachteile zusammengefasst, deren Überwindung jedoch die oben skizzierten Entwicklungschancen eröffnen würde. Die positive Einschätzung der wirtschaftlichen Entwicklung der biotechnischen Produktionen werden durch Strategien unterstützt, die für die Zukunft eine verstärkte Nutzung landwirtschaftlicher Rohstoffe für die Herstellung von Chemikalien und Energieträgern vorsehen. Die EU will den Anteil von erneuerbaren Energieträgern bis 2010 auf 12 % anheben und damit gegenüber 1997 verdoppeln (ERRMA, 2002).

Tabelle 2-5: Spezifische Vor- und Nachteile der Biotechnologie erschließen in vielen Bereichen neue Entwicklungsmöglichkeiten (n. Festel, 2004, verändert)

Vorteile	Nachteile	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung erneuerbarer Rohstoffe ▪ Milde und umweltfreundliche Prozessbedingungen (Wasser als Lösungsmittel, Umgebungstemperaturen und -drücke, nahezu neutraler pH-Wert) ▪ Hohe Selektivität der Biotransformation und einiger Fermentationen speziell für stereospezifische Produkte ▪ CO₂-neutrale Produktion ▪ Niedriger Energieverbrauch ▪ Leichte Abfallentsorgung ▪ Einstufige Herstellung komplexer Moleküle, für die oft kein oder nur ein mehrstufiges chemisches Verfahren verfügbar ist ▪ Zugang zu Biochemikalien die nicht durch chemische Reaktion zugänglich sind 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwierige Anpassung an integrierte chemische Produktion ▪ Große Reaktorvolumina notwendig (vor allem bei der Fermentation) ▪ Niedrige Reaktionsgeschwindigkeit ▪ Empfindlichkeit biochemischer Reaktionen bezüglich Hitze, extremer pH-Werte und aggressiven Chemikalien ▪ Gewährleistung monoseptischer Reaktionsbedingungen schwierig ▪ Hohe Kosten und begrenzte kommerzielle Verfügbarkeit einiger Enzyme ▪ Oft komplexe Reinigungsschritte 	<p>Existierende Produkte</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Niedrige Produktionskosten durch <ul style="list-style-type: none"> - Hohe Selektivität - Einfache Produktionsprozesse für komplexe Moleküle - Niedrigere Rohstoffkosten - Niedrigere Entsorgungskosten - Erneuerbare Rohstoffe ▪ Bessere Qualität mit reineren Produkten ▪ Geringere Umweltbelastung <p>Neue Produkte für bestehende und neue Anwendungen</p> <p>Verknüpfung von Landwirtschaft und Stoff-/Energieproduktion (Nutzung einheimischer Rohstoffe)</p>

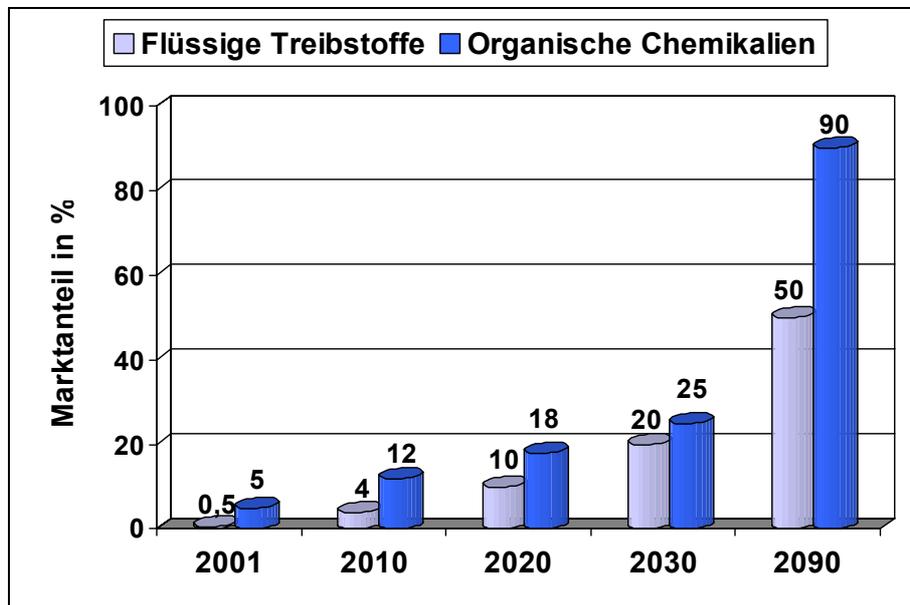


Abbildung 2-9: Ziele der US-Strategie zur Nutzung einheimischer Rohstoffe für die Herstellung von Bioprodukten und Bioenergieträgern (Daten: Vorlop u. Wilke, 2003)

Die USA haben dagegen weit reichende Strategien formuliert, die eine Verknüpfung der Landwirtschaft, der Biotechnologie und der Chemie zum Ziel haben¹ (US-DOE, 1998, 2001, 2003; US-NRC, 2000). Die US-Strategien sehen vor, mittelfristig den Anteil landwirtschaftlicher Rohstoffe für industrielle Anwendungen massiv auszubauen (Abbildung 2-9). Im Rahmen der US-Strategien wurden Hemmnisse für die verstärkte chemische Nutzung landwirtschaftlicher Rohstoffe definiert und zu deren Überwindung zielgerichtete Forschungsaktivitäten initiiert. Das US-Department of Energy (DOE) und das National Renewable Energy Laboratory (NREL) haben z.B. die Firmen Genencor, Novozyme und logen mit FuE-Projekten beauftragt, die den enzymatischen Aufschluss cellulosehaltiger Abfallbiomassen der Landwirtschaft soweit verbessern sollen, dass die Aufschlussprodukte als Substrate für die Bioethanolproduktion genutzt werden können. Bioethanol wird dem PKW-Treibstoff zugesetzt (E10- bzw. E85-Treibstoff mit einem Alkoholanteil von 10 bzw. 85 %: Marktanteil in USA: 12 %; Kanada: 5 %). Sollten diese Bemühungen erfolgreich sein, würde der Celluloseaufschluss kostengünstige Substrate auch für andere biotechnische Prozesse zur Verfügung stellen.

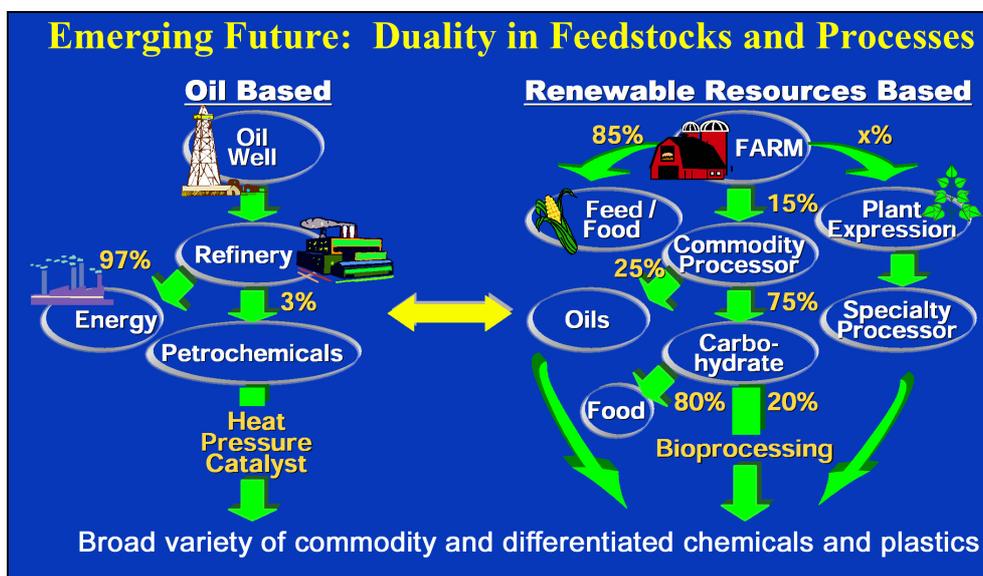


Abbildung 2-10: Zukünftige Nutzung petrochemischer und landwirtschaftlicher Rohstoffe (Desai, 2002)

¹ Vergl. auch: The World Congress on Industrial Biotechnology and Bioprocessing – Linking Biotechnology, Chemistry and Agriculture to Create New Value Chains. Orlando, Florida, 21./23.04.2004

Fernziel derartiger Entwicklungen ist die Realisierung von so genannten Bioaffinerien (Abbildung 2-10), die zukünftig einmal petrochemische Raffinerien ergänzen und Petrochemikalien als Chemierohstoffe durch biogene Rohstoffe substituieren sollen (Danner u. Braun, 1999; Desai, 2002; Kamm u. Kamm, 2001, 2003; Vorlop u. Wilke, 2003).

2.4 Aufgabenstellung

Das Umweltbundesamt hat Teilaspekte der oben skizzierten Entwicklungstendenzen in verschiedenen Studien untersuchen lassen (Tabelle 2-6).

Die Studien haben insgesamt eine Diskrepanz zwischen den oben skizzierten Erwartungen zum Beitrag der Biotechnologie für eine nachhaltige Entwicklung und dem aktuellen Realisierungsstand ergeben.

Tabelle 2-6: Projektrelevante Studien des Umweltbundesamtes

UBA-Text	Titel
68/98 04/2000	Stand der Möglichkeiten von prozeßintegrierten biotechnischen Präventivtechniken zur Vermeidung oder zur Verminderung von Umweltbelastungen und zugehöriges Arbeitsgespräch
01/99	Beitrag der Biotechnologie zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung
04/00	Innovative Lösungen zur Ressourcenschonung und Verminderung von Umweltbelastungen in ausgewählten Industriezweigen - Umweltrelevante Aspekte angewandter Biotechnologie in der chemischen Industrie
16/01	Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien
29/02 30/02	Ermittlung von Substitutionspotentialen von chemischen Verfahrenstechniken durch bio-/gentechnische Verfahren zur Risikovorsorge und zugehöriges Statusseminar
64/2003	Biotechnologische Herstellung von Wertstoffen unter besonderer Berücksichtigung von Energieträgern und Polymeren aus Reststoffen
--	Untersuchung zur Anpassung von Ökobilanzen an spezifische Erfordernisse biotechnischer Prozesse und Produkte

Die vom Umweltbundesamt für den UFOPLAN 2002 formulierte Projektausschreibung sah vor, das Potential der Biotechnologie für eine umweltverträgliche Produktion weiter zu untersuchen:

„Die Biotechnik, definiert als „Nutzung biologischer Organismen, Systeme und Verfahren zur Produktion von Waren und Dienstleistungen“, ist eine vielseitig einsetzbare Basistechnik und gilt, insbesondere auch unter Einbeziehung der Gentechnik, als eine Schlüsseltechnik für das 21. Jahrhundert. Als typische Querschnittstechnologie erfasst sie eine Vielzahl von Wirtschaftsbereichen: Biologie, Chemie, Pharmazie, Human- und Veterinärmedizin, Umweltschutz, Land- und Forstwirtschaft. In Bezug auf die chemische Industrie bietet die Biotechnik umfassende Möglichkeiten für eine umweltverträgliche industrielle Produktion und Verfahren. Solche sind bereits in einigen Industriezweigen, insbesondere der Pharma-, Wasch- und Reinigungsmittelindustrie sowie der Lebensmittelindustrie, etabliert.

Zu den umweltschonenden bzw. umweltverträglichen Potentialen der Biotechnik im Bereich der industriellen Produktion zählen insbesondere die Ressourcenschonung, die Verringerung von Emissionen, die Substitution fossiler Rohstoffe durch biologisch abbaubare Reststoffe/Biomasse, der Stoffen und Chemikalien sowie der Verzicht auf den Einsatz gefährlicher Stoffe und die Vermeidung kritischer Reaktionsbedingungen.

Die Biotechnik kann aber nicht von vornherein als umweltfreundlich eingestuft werden. Auch bei der biotechnischen Produktion werden Energie und Rohstoffe benötigt, fallen Abfälle und Abwasser an oder können toxische Zwischenprodukte gebildet werden. Daher sind die Potentiale der Biotechnik im Sinne eines produktionsintegrierten Umweltschutzes zu analysieren und kann ihr Einsatz nur da gefördert werden, wo nachweislich Entlastungseffekte für die Umwelt erkennbar sind.“

Die Projektausschreibung sah im Detail folgende Projektaufgaben vor:

1. *„Sammlung und Analyse von Daten aus biotechnischen Verfahren, die bereits in der Industrie eingesetzt werden oder sich zumindest im Technikumsmaßstab befinden. Dabei sollen Entlastungseffekte für die Umwelt im Vergleich zu chemisch-technischen Verfahren ermittelt und deutlich gemacht werden. Das Umweltentlastungspotenzial ist quantitativ unter Berücksichtigung spezifisch biotechnischer Fragestellungen zu erfassen. Als Datengrundlage können z.B. die OECD Studie „The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability“ (OECD 2001) oder die UBA-Veröffentlichung „Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien“ (UBA-Texte 16/01) herangezogen werden.“*
2. *„Neben Verfahrensumstellungen können aber auch Produktsubstitutionen Entlastungseffekte bewirken. Der Ersatz eines chemischen Produktes durch ein biotechnisches Produkt von funktionaler Gleichwertigkeit (Beispiel Biopolymere) kann sich ebenfalls positiv für die Umwelt auswirken. Produktsubstitutionen sind zu ermitteln und Entlastungseffekte an Beispielen quantitativ zu bestimmen.“*
3. *„Während chemische Produktionsverfahren oft bei hohen Temperaturen und Drücken und unter Einsatz organischer Lösungsmittel gefahren werden, gilt die Biotechnik als vergleichsweise sanfte Technologie, da hier unter milden Bedingungen gearbeitet wird: Raumtemperatur, Normaldruck, wässriges Milieu. Das sollte Auswirkungen auf die Konzeption einer Produktionsanlage haben. Sowohl in Hinblick auf die notwendige Mess- und Regeltechnik, die Materialbeschaffenheit, den Materialaufwand als auch generell auf die Frage der Anlagensicherheit sollte die Biotechnik Vorteile gegenüber chemischen Produktionsverfahren aufweisen. Diese Aspekte sollen an einer Beispielanlage ermittelt und unter Bezug auf mögliche positive Umwelteffekte dargestellt werden.“*

Die praktische Bearbeitung des Vorhabens erforderte zunächst eine Recherche der zu Projektbeginn (November 2002) verfügbaren Informationen zu auswertbaren Verfahren und Produkten. Die Durchführung der Recherche sowie die Rechercheergebnisse sind im Abschnitt 3 beschrieben.

Nach Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurden 2 Herstellungsverfahren ausgewählt, die einen ökobilanziellen Vergleich je einer biotechnischen und einer chemisch-technischen Herstellungsvariante für das gleiche Produkt ermöglichten. Die aus der Nutzung biotechnischer bzw. chemisch-technischer Herstellungsverfahren resultierenden Umweltbelastungen wurden mit Hilfe von ökobilanziellen Vergleichen ausgewertet. Die allgemeine Vorgehensweise ist im Abschnitt 4 beschrieben. Details zur Durchführung der Verfahrensvergleiche sowie die erzielten Ergebnisse enthält der Abschnitt 5.

Außerdem wurden 3 Prozesse ausgewählt, mit denen auf biotechnischem und auf chemisch-technischem Weg funktionsanaloge Produkte hergestellt werden. Die aus der Nutzung der Produktvarianten resultierenden Umweltbelastungen wurden mit Hilfe von ökobilanziellen Vergleichen ausgewertet. Die allgemeine Vorgehensweise ist im Abschnitt 4 beschrieben. Details zur Durchführung der Produktvergleiche sowie die erzielten Ergebnisse enthält Abschnitt 6.

Im Abschnitt 7 sind die Ergebnisse einer Auswertung zusammengestellt, mit der die Auswirkungen auf die Anlagensicherheit untersucht wurden, die sich durch die Umstellung eines chemisch-technischen auf einen biotechnischen Herstellungsprozess ergeben.

3 Recherche biotechnischer und chemisch-technischer Verfahren und Produkte

Wie im Abschnitt 2 erläutert wurde, werden bisher erst relativ wenige biotechnische Herstellungsverfahren und biotechnische Produkte eingesetzt, die Alternativen zu chemisch-technischen Herstellungsverfahren und Produkten sind. In verschiedenen Wirtschaftsbereichen gibt es derzeit ausschließlich chemisch-technische oder biotechnische Verfahren und Produkte. Beispielsweise werden alkoholhaltige Getränke ausschließlich mit biologischen Verfahren hergestellt; organische Grundchemikalien werden dagegen nahezu ausschließlich petrochemisch gewonnen. Zahlreiche biotechnische Verfahren und Produkte befanden sich zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung in der Entwicklung (z.B. im Förderschwerpunkt Biotechnologie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und im Förderschwerpunkt Nachhaltige Bioproduktion des BMBF).

Aus diesem Grund wurde zu Beginn des Vorhabens eine Datenbank-gestützte Auswertung von Fachveröffentlichungen der UBA-Texte-Reihe, der OECD, der BfA-eigenen Literaturdatenbank sowie Projektinformationen des BMBF, des BML und der DBU ausgewertet. Die ca. 1.200 Datenbanknachweise wurde dann mit der in Abbildung 3-1 dargestellten Entscheidungsmatrix bewertet. Dabei wurde geprüft, ob es von einem Verfahren bzw. von einem Produkt sowohl eine biotechnische als auch eine chemisch-technische Variante gab. Bereits dieser Selektionsschritt schränkte den verfügbaren Datenbestand stark ein.

Bei der Realisierung der derzeit am Markt vorhandenen Verfahren und Produkte standen jedoch weniger das umweltlastende Potential als vielmehr die ökonomischen Vorteile im Vordergrund. Deshalb wurden in einem zweiten Selektionsschritt jene Verfahren ausgewählt, bei denen ein relevantes Umweltentlastungspotential durch die Nutzung einer biotechnischen Verfahrens- oder Produktalternative anzunehmen war. Von den bei dieser Vorauswahl selektierten Verfahren und Produkte wurden anschließend jene ausgewählt, die in Deutschland zumindest im Technikummaßstab realisiert worden sind.

Anschließend wurde durch weiterführende Recherchen geklärt, ob die erforderlichen Verfahrens- und Produktkenndaten verfügbar waren. Hierzu wurde in der Regel Kontakt zu Anwendern von Verfahren bzw. Herstellern von Produkten Kontakt aufgenommen und um Unterstützung des Projektes gebeten.

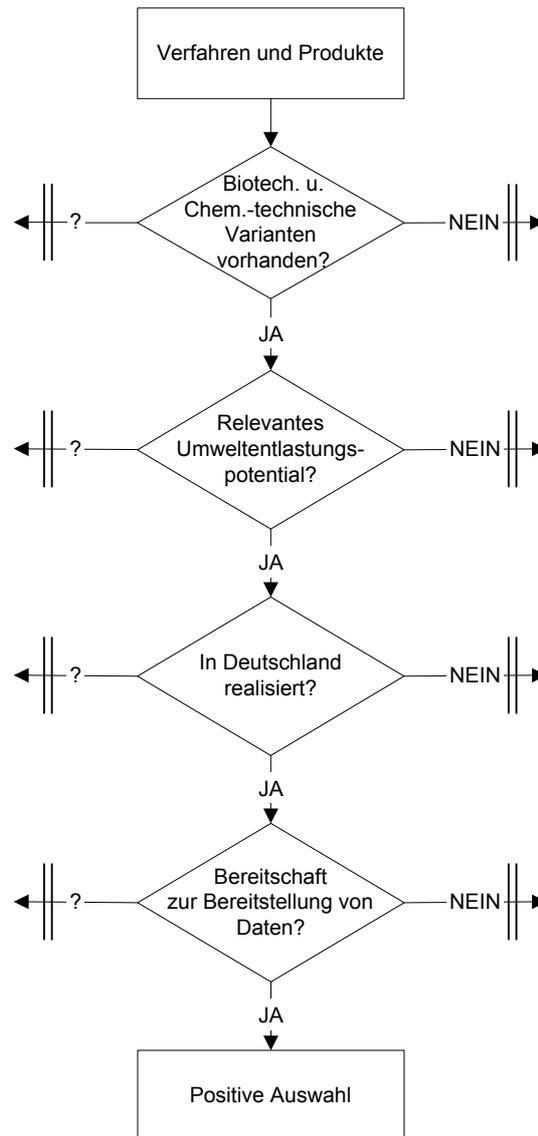


Abbildung 3-1: Entscheidungsmatrix für die Auswahl projektrelevanter Informationen

Die endgültige Auswahl der weiter zu bearbeitenden Verfahren und Produkte erfolgte in enger Abstimmung mit dem Umweltbundesamt.

3.1 Auswahl von Verfahrensalternativen

Abbildung 3-2 verdeutlicht schematisch die Aufgabenstellung dieses Projektmoduls: Je ein biotechnisches und ein chemisch-technisches Herstellungsverfahren für dasselbe Produkt (P) sollten hinsichtlich der auftretenden Umweltbelastungen vergleichend ausgewertet werden. Die Verfahrensalternativen sollten in der Industrie großtechnisch oder zumindest im Technikummaßstab genutzt werden.



Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für den Vergleich

Der Verlauf der Bearbeitung dieses Projektmoduls ist schematisch in Abbildung 3-3 dargestellt.

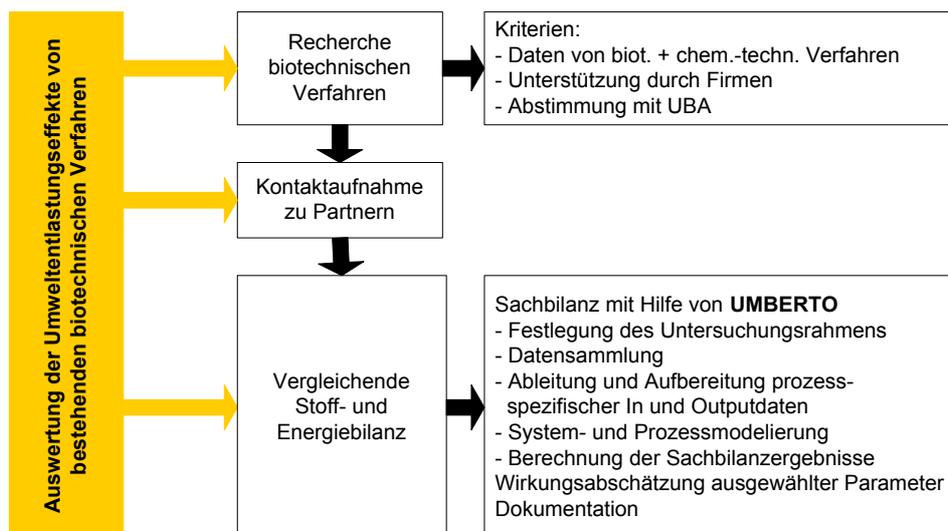


Abbildung 3-3: Schema der Bearbeitung der Verfahrensvergleiche

Das Resultat der Recherche potenziell interessanter Verfahrensvergleiche ist in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Nach Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurden die Verfahrensalternativen 1 (s. 5.1) und 12 (s. 5.2) für die weitere Bearbeitung ausgewählt.

Tabelle 3-1: Resultate der Recherche projektrelevanter Verfahrensalternativen

Nr.	Verfahrensalternativen	Unternehmen (Beispiele)
1	Produktion von Riboflavin (Vitamin B₂)	ROCHE Vitamine GmbH; BASF
2	Produktion von Aminosäuren (z.B. Cystein)	Wacker Chemie
3	Produktion von Antibiotika (7-ACA; 7-ADCA)	DSM; Biochemie; Aventis
4	Produktion von Acrylamid	Degussa
5	Produktion von 1,3-Propandiol	Dupont; Cargill-Dow; FAL
6	Produktion von Vanillin	Haarmann & Reimer GmbH
7	Produktion von Cyclodextrinen	Wacker Chemie
8	Produktion von Bioethanol bzw. Syntheseethanol	FAL; Genencor; Novozyme
9	Stärkeverzuckerung	Südstärke; Genencor; Novozyme
8	Stickstoffdüngung: Biotisch vs. chemisch	Eigene Recherchen
9	Produktion von Indigo	Genencor
10	Enzymatische Spanplattenproduktion	Pfleiderer
11	Kieselgurregeneration	BifA GmbH, Pall-Seitz-Schenk
12	Lederherstellung	Schill + Seilacher; Bader GmbH
13	Schadstoffelimination bei der Herstellung nassfester Papiere	Kymene/Hercules
14	Entfernung von Bleichmittelresten bei Textilherstellung	Windel Textil GmbH; Textilchemie Dr. Petry GmbH
15	Entfettung von Metalloberflächen	Galfa Industriegalvanik GmbH
16	Elimination von Schwermetallen aus Abwässern	straschu Leiterplatten GmbH
17	Produktion von herbizidresistentem Mais	Schering
18	Elimination von CO ₂ aus Abluftströmen	Preussag

Nach der Vorauswahl der im Vorhaben zu bearbeitenden Verfahrensalternativen wurden verschiedene Betreiber entsprechender Verfahren kontaktiert und um Unterstützung des Forschungsvorhabens gebeten. Für die Bearbeitung werden verfahrensspezifische Kenndaten (Stoffströme, Energieeinsatz) vonseiten des Verfahrensbetreibers benötigt. Der Verfahrensvergleich umfasste die Vorketten für die Bereitstellung der Ausgangsstoffe sowie deren Nutzung im biotechnischen bzw. chemisch-technischen Verfahren für die Herstellung des Produktes.

3.2 Auswahl von Produktalternativen

Abbildung 3-4 verdeutlicht schematisch die Aufgabenstellung dieses Projektmoduls: Je ein biotechnisches und ein chemisch-technisches Herstellungsverfahren für 2 analoge Produkte mit funktionaler Gleichwertigkeit (P1 und P2) sollten hinsichtlich der auftretenden Umweltbelastungen vergleichend ausgewertet werden. Die Produktvergleiche sollten die Vorketten für die Rohstoffbereitstellung, für die Herstellung des biotechnischen bzw. des chemisch-technischen Produktes sowie deren anschließende Nutzungsphase umfassen.

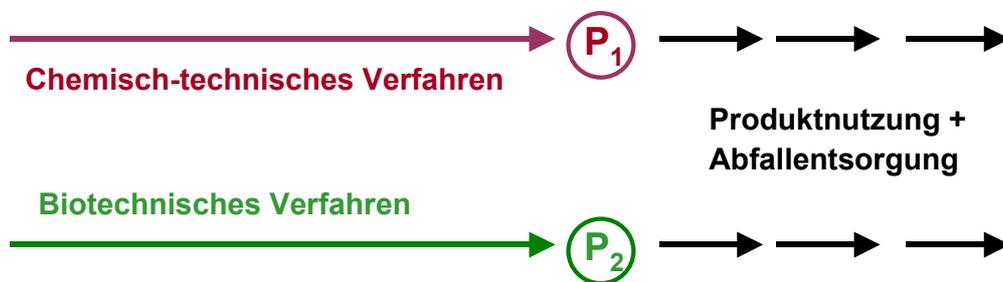


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für den Produktvergleich

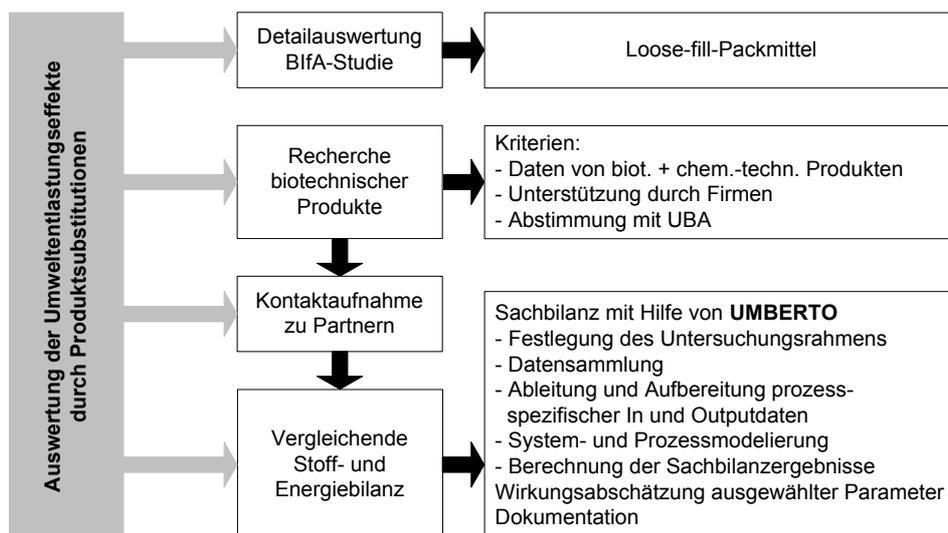


Abbildung 3-5: Schema der Bearbeitung der Produktvergleiche

Der Verlauf der Bearbeitung dieses Projektmoduls ist schematisch in Abbildung 3-5 dargestellt.

Das BIfA verfügte bereits über umfassende Daten, die einen entsprechenden Produktvergleich am Beispiel von Loose-fill-Packmitteln ermöglichten (Würdinger et al., 2002). Diese umfangreichen Daten wurden herangezogen, um spezielle Fragestellungen im Rahmen dieses Vorhabens zu bearbeiten (s. 6.1). Außerdem wurden im Rahmen einer Recherche potenziell interessante Produktvergleiche zusammengetragen (s. Tabelle 3-2). Nach Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurden die Produktalternativen 3 (s. 6.2) und 10 (s. 6.3) für die weitere Bearbeitung ausgewählt.

Tabelle 3-2: Resultate der Recherche projektrelevanter Produktalternativen

Nr.	Produktalternativen	Unternehmen (Beispiele)
1	Loose-fill-Verpackungen aus Stärke und Polystyrol	BIfA-Daten
2	Kompostsammelbeutel aus Biopolymer vs. Papier	BIfA-Daten
3	Waschmittel ohne bzw. mit Enzymeinsatz	Henkel KGaA
4	Biologische vs. chemische Saatgutbeize	Bioagri, Schweden
5	Biologisches vs. chemisches Fungizid	Prophyta, Malchow
6	Biologisches vs. chemisches Nematizid	ActinoDrug Pharmaceuticals GmbH
7	Bioschmiermittel vs. petrochemische Schmiermittel	CARMEN e.V.
8	Nutzen der Spezifität eines Biosensor zur Optimierung der Serinabtrennung	Amino GmbH
9	Dämmstoffe im Fahrzeugbau	Daimler Chrysler AG
10	Leistungsförderer für die Tierproduktion	Chevita GmbH; E. Zehentmayer AG

4 Methodische Grundlagen

4.1 Ökobilanzielle Betrachtung

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten ökobilanziellen Betrachtungen orientierten sich an den Normvorgaben zur Durchführung von Ökobilanzen DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14041, DIN EN ISO 14042 und DIN EN ISO 14043 (DIN, 1997, 1998, 2000, 2000a). Dabei wurden - ausgehend von der Zieldefinition im Rahmen der Sachbilanz - relevante Parameter erfasst und in der Wirkungsabschätzung hinsichtlich ihrer Umweltwirkung zusammengefasst. Anschließend wurden die Ergebnisse ausgewertet und interpretiert. Da im Rahmen dieses Vorhabens nicht vorgesehen war, alle in den Normen vorgeschriebenen Aspekte in vollen Umfang umzusetzen, wird im weiteren Berichtverlauf, um Missverständnisse zu vermeiden, nicht von Ökobilanzen gesprochen, sondern von ökobilanziellen Betrachtungen in Anlehnung an DIN EN ISO 14040ff.

Abbildung 4-1 gibt den schematischen Überblick zum grundsätzlichen Aufbau einer Ökobilanz und zu deren Anwendungsfeldern.

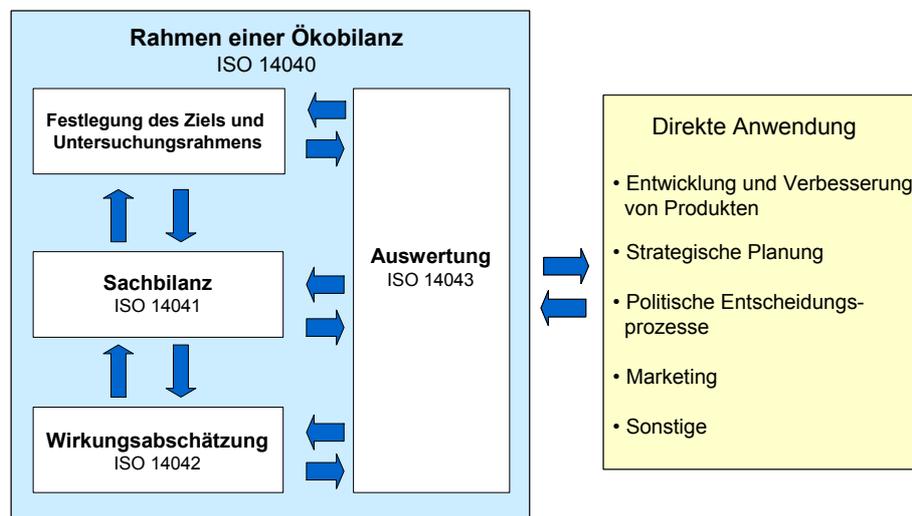


Abbildung 4-1: Elemente einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff und deren Anwendungsfelder für das Instrumentarium nach DIN (1997)

4.1.1 Zieldefinition - Erkenntnisinteresse, funktionelle Einheit und Systemgrenzen

Wichtige Aspekte, die innerhalb der Zieldefinition konkretisiert werden, sind die Formulierung des Erkenntnisinteresses sowie die Festlegung der funktionellen Einheit und der Systemgrenzen.

Erkenntnisinteresse

Entsprechend der Aufgabenstellung lag das Erkenntnisinteresse in diesem Vorhaben im Aufzeigen von Entlastungseffekten für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Alternativen. Es galt für alle untersuchten Produkt- und Verfahrensvergleiche sowie auch für die Bewertung der Sicherheit einer biotechnischen Anlage.

Funktionelle Einheit

Im Mittelpunkt eines ökobilanziellen Vergleichs steht die funktionelle Einheit, die in DIN (1998) als „Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanzstudie“ definiert wird. Sie dient als Bezugsgröße sowohl für die Gegenüberstellung der betrachteten Szenarien als auch für die Normierung der in der Sachbilanz ermittelten In- und Outputdaten. Die funktionelle Einheit wurde für jeden Produkt- und Verfahrensvergleich neu definiert und wird in den entsprechenden Abschnitten dieses Berichtes vorgestellt.

Systemgrenzen

Um die Vergleichbarkeit von Produkten und Verfahren zu gewährleisten, müssen neben der Festlegung der funktionellen Einheit auch die Grenzen der Betrachtung für die zu vergleichenden Szenarien konsistent definiert sein.

Nach DIN (1998) legt die Systemgrenze die Module fest, die in das zu modellierende System aufgenommen werden. Im Idealfall sollte das System so modelliert werden, dass Inputs und Outputs an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sind (vgl. Abbildung 4-2).

Da in vielen Fällen nicht ausreichend Zeit, Daten und Mittel zur Verfügung standen, um eine derart umfassende Studie durchzuführen, mußten Entscheidungen darüber getrof-

fen werden, welche Module in die Untersuchung einbezogen bzw. welche Emissionen in die Umwelt berücksichtigt werden und mit welcher Detailgenauigkeit die Module untersucht bzw. die Emissionen erfasst werden sollen (DIN, 1998).

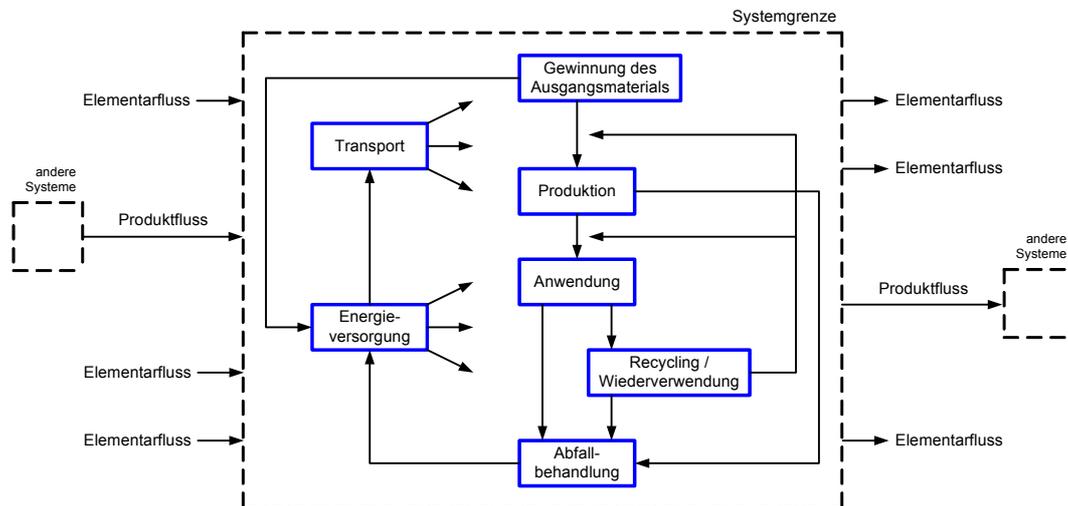


Abbildung 4-2: Beispiel eines Produktsystems (DIN, 1998)

Nachfolgend sind die in diesem Vorhaben auf alle Modelle (Produkt- und Verfahrensvergleiche) zutreffenden Annahmen und Detailgrenzen vor- und nachgelagerter Prozesse sowie die Vorgehensweise bei der Behebung von Datenlücken und der Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen beschrieben. Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze sind in den entsprechenden Abschnitten des Berichtes zusammengefasst.

Datenlücken und Annahmen

Bei der Begrenzung der Komplexität der Modelle wurde aber darauf geachtet, dass die Vergleichbarkeit der Untersuchungsszenarien beibehalten blieb. Dafür sind die nachfolgend beschriebenen Kriterien für eine einheitliche Bestimmung der Systemgrenzen festgelegt worden.

Die Vorgabe der DIN (1997), dass der Stoff- und Energieeinsatz (Inputseite) sowie die Emissionen und Produkte (Outputseite) an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sein sollen, wurde bei der Modellierung so weit wie möglich berücksichtigt. Für alle Input-Stoffe und Energieträger, die außerhalb der unten beschriebenen Detailgrenzen lagen, wurden Vorketten beginnend bei der Gewinnung aus natürlichen Lagerstätten bis zur

Bereitstellung für den jeweiligen Prozess modelliert. Waren keine belastbaren Daten verfügbar, wurden vergleichbare Prozesse herangezogen bzw. Annahmen getroffen, die im Detail in den Modulbeschreibungen zu den einzelnen Produkt- und Verfahrensvergleichen erläutert wurden.

Detailgrenzen vorgelagerter Prozesse (Vorketten)

Die Herstellung von Betriebs-, Hilfs- und Ausgangsstoffen in vorgelagerten Prozessen wurde nicht berücksichtigt, wenn die nachfolgend als Detailgrenzen definierten Abschneidekriterien zutrafen. In solchen Fällen wurde in der Sachbilanz anstelle des Elementarflusses der jeweilige Materialfluss ausgewiesen.

Die Detailgrenze für die Vernachlässigung der Modellierung der Vorketten von Inputmaterialien wurde mit 5 Gew.-% eines Referenzflusses (meist gewünschter Output) festgelegt. Die Summe aller vernachlässigten Inputmaterialien eines Moduls oder Subnetzes sollte jedoch nicht größer als jeweils 10 Gew.-% des Referenzflusses sein. Ausgenommen davon waren Materialien mit geringem Massenanteil, wenn in der Vorkette Prozesse enthalten waren, die hinsichtlich toxischer oder energetischer Aspekte für die gesamte Ökobilanz bedeutsam sein könnten.

Die Bereitstellung nicht rarer Ressourcen, wie z.B. Wasser oder Luft sowie der Unterhalt der Infrastruktur (der Bau, die Wartung und Reparatur von Gebäuden, Maschinen, Industrieanlagen, Transportmittel und Verkehrswege) wurde grundsätzlich nicht berücksichtigt.

Detailgrenzen nachgelagerter Prozesse (Nachketten)

Für nachgelagerte Prozesse galten die gleichen Abschneidekriterien wie für die vorgelagerten Prozesse. D.h., eine Behandlung von Abfällen zur Beseitigung sowie von Abwässern erfolgte dann, wenn die Abschneidekriterien nicht griffen und wenn die Beschreibung verwendeter Module oder Datensätzen aus Bibliotheken oder Datenbanken nicht schon auf eine Berücksichtigung hinwies. Ausgenommen davon sind die Parameter

- Abraum, Altöl, radioaktive Abfälle und Sonderabfälle sowie
- Prozessabwasser, Abwasser aus der Kesselabschlammung und Kühlwasser,

die grundsätzlich nicht berücksichtigt wurden.

Auch auf eine Behandlung von Abfällen zur Verwertung wurde zum größten Teil verzichtet. Die Modellierung einer entsprechenden Nachkette erfolgte nur dann, wenn der dort beschriebene Prozess als der Hauptverwertungsweg für den betrachteten Abfall angesehen werden konnte (Bsp. landwirtschaftliche Verwertung von Gülle, Biomasseverwertung in Vergärungsanlagen, Abfallbeseitigung im Beseitigungsmix Deutschland).

Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen

Neben den in der funktionellen Einheit quantifizierten Hauptnutzen stellte ein Teil der untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme zusätzliche Nutzen, wie z.B. elektrische und thermische Energie aus der Abfallbehandlung oder Nährstoffe in Gülle, die auf Felder ausgebracht wird, bereit. Als Folge müssen die entsprechenden Energiemengen oder Produkte nicht auf konventionellem Weg aus Primärrohstoffen hergestellt werden. Die Umweltauswirkungen, die mit der konventionellen Herstellung/Produktion jedes einzelnen Zusatznutzens verbunden sind, werden somit „eingespart“ bzw. „vermieden“.

Für einen vollständigen Produkt- oder Verfahrensvergleich waren deshalb zusätzlich die Umweltauswirkungen zu bilanzieren, die mit der konventionellen Erzeugung einer äquivalenten Stoff- und Energiemenge verbunden wären. Die „eingesparten“ Umweltauswirkungen waren den Umweltauswirkungen der Produkt- und Verfahrenssysteme gutzuschreiben. Das bedeutet, dass die durch die Bilanzierung der konventionellen Herstellungsprozesse erhaltenen Elementarflüsse dem jeweiligen System als Gutschrift angerechnet, d.h. von den Umweltauswirkungen der untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme abgezogen, wurden.

Der konventionelle Herstellungs- bzw. Produktionsprozess eines Zusatznutzens wird als Äquivalenzprozess oder Äquivalenzsystem bezeichnet. Für jeden quantifizierbaren Zusatznutzen wurde ein spezifisches Äquivalenzsystem erstellt, das den gleichen bzw. einen vergleichbaren Nutzen erzeugte. Die erstellten Äquivalenzsysteme sind jeweils tabellarisch im Abschnitt *Beschreibungen der Bilanzierungsmodelle* zusammengefasst, die darin enthaltenen Äquivalenzprozesse sind in den Abschnitten *Datenherkunft und -qualität* beschrieben.

Ausgangspunkt für die Verrechnung war das Bruttosystem, d.h. die Sachbilanz der jeweiligen Produkt- und Verfahrenssysteme ohne Berücksichtigung der Gutschriften der Äquivalenzsysteme. Ausgehend von der jeweils bereitgestellten Zusatznutzen-

menge berechnete sich eine Sachbilanzmenge für jedes Äquivalenzsystem. Auf diesem Weg wurden die Zusatznutzen in Sachbilanzwerte und damit in Elementarflüsse transformiert, die von den Brutto-Ergebnissen subtrahiert wurden. Die auf diese Weise bereinigten Sachbilanzen ergaben die Netto-Ergebnisse, die als Grundlage für den Vergleich der biotechnischen und chemisch-technischen Produkte und Verfahren dienen.

Die beschriebene Vorgehensweise hat den Vorteil, dass sich die Netto-Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung nur noch auf die Systeminputs und -outputs beziehen, die direkt mit der funktionellen Einheit verbunden sind. Dadurch wurde die Auswertung der Ergebnisse erleichtert und deren Aussagekraft erhöht. Abbildung 4-3 zeigt schematisch die beschriebene Allokationsmethode bei der Bereitstellung stofflicher und energetischer Zusatznutzen durch die untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme.

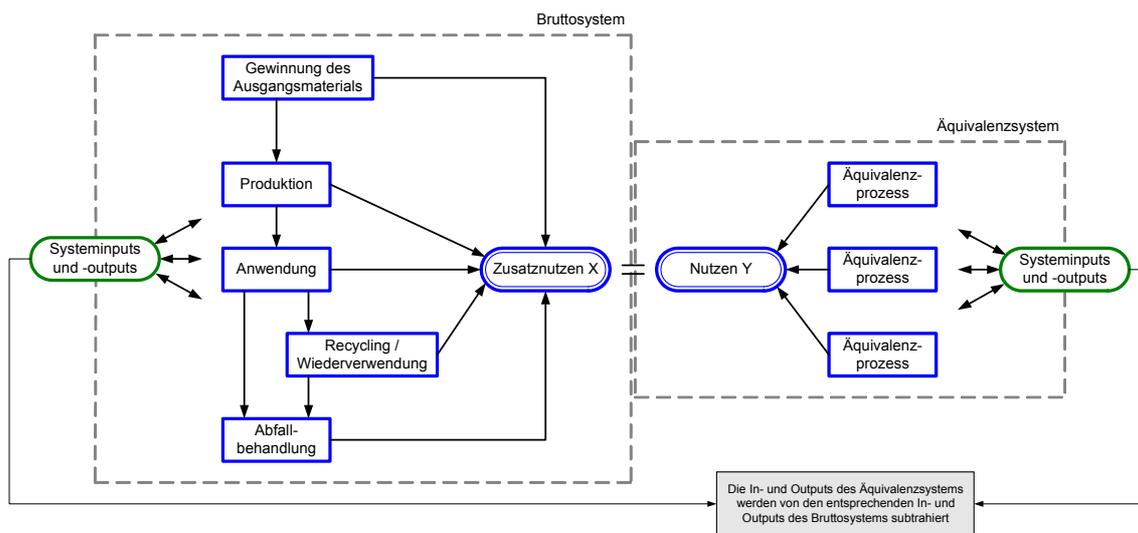


Abbildung 4-3: Berücksichtigung von Zusatznutzen der untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme über die Gegenrechnung von Äquivalenzsystemen

Die in Abbildung 4-3 allgemein dargestellte Allokationsmethode wurde auf alle quantifizierbaren Zusatznutzen angewandt. Die Systemgrenze für die Bereitstellung von Zusatznutzen ist in der Regel so gewählt worden, dass ein vom Markt nachgefragter Nutzen als Output aus dem untersuchten Produkt- oder Verfahrenssystem ausgeschleust wurde. War zwischen Sekundär- und Primärrohstoffen eine funktionelle oder techni-

sche Gleichwertigkeit nicht gegeben, sodass beide Mengen als nicht identisch angesehen werden mussten, wurde dem über einen Substitutionsfaktor Rechnung getragen.

4.1.2 Vorgehensweise bei der Sachbilanz und Systemmodellierung

Die Erstellung der Sachbilanz beinhaltet das Sammeln, die Ableitung und die Aufbereitung prozessspezifischer In- und Outputdaten, die System- und Prozessmodellierung sowie die Berechnung der Sachbilanzen. Letztere quantifizieren In- und Outputflüsse des kompletten Produktsystems oder spezifischer Teil- und Äquivalenzsysteme. Die Sachbilanzen sind Grundlage für die Wirkungsabschätzung und - in Form der Netto-Ergebnisse - für die Auswertungen.

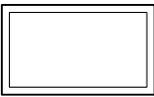
Wesentlich für die Datenerhebung und die darauf basierende Bilanzierung war die Modellierung der betrachteten Produkt- und Verfahrenssysteme. Dafür war es erforderlich, die für das jeweilige Systemmodell relevanten Prozesse zu identifizieren und die notwendigen Sachbilanzdaten zu erheben oder abzuleiten. Dabei wurden entsprechend der festgelegten Detailgrenzen auch vor- und nachgelagerte Prozesse mit einbezogen. Das Systemmodell bildete so die Basis für die Datenerhebung, die Systemkalkulation und alle anschließenden Auswertungsschritte. Die Modellierung und Bilanzierung erfolgte mit dem Softwareprogramm UMBERTO® (vgl. 0).

Die Erstellung eines der einzelnen Bilanzierungsmodelle beinhaltete folgende Schritte, die für jeden Produkt- und Verfahrenvergleich im entsprechenden Abschnitt und Anhang beschrieben wurden:

- Festlegung und Beschreibung der Szenarien, die das untersuchte Produkt oder Verfahren repräsentieren sollten.
- Konkretisierung der in den Szenarien enthaltenen Prozesse. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden diese in Teilsysteme unterteilt, die schematisch dargestellt sind. Die in den Abbildungen verwendeten grafischen Elemente sind in Tabelle 4-1 erläutert.
- Dokumentation der modellierten Prozesse hinsichtlich der Datenherkunft, der Literaturquellen, des Bezugsjahrs, der Repräsentativität sowie der berücksichtigten Vorketten und Transporte (jeweils tabellarisch im Anhang).
- Dokumentation der gewählten Annahmen und getroffenen Vereinbarungen.

- Dokumentation der für die modellierten Prozesse gewählten Sachbilanzdaten.
- Quantifizierung der Nutzen der Systeme und Festlegung der Äquivalenzsysteme, Verrechnung der Äquivalenzsysteme mit den Systemergebnissen.

Tabelle 4-1: Verwendete grafische Elemente in den Abbildungen zu den Teilsystemen

Element	Beschreibung
	Aggregiertes Prozessmodul ¹
	Subnetz, das eine Prozessmodulkette beinhaltet
	Subnetz, das aus Vertraulichkeitsgründen nicht näher spezifiziert werden kann
	Transportmodell inklusive aller vorgelagerten Prozesse
	Teilsystemgrenze
	Verknüpfung von Modulen, Modellen und Teilsystemen
	Output ²
	Input ³
	Material(Stoff)- oder Energiestrom
	Material(Stoff)- oder Energiestrom, der aus Vertraulichkeitsgründen nicht näher spezifiziert werden kann

¹ alle vorgelagerten Prozesse sind vollständig in einem Modul integriert.

² Emissionen und Produkte

³ Stoff- und Energieeinsatz

Bei der Gewinnung der Sachbilanzdaten konnte auf umfangreiche Datenbanken, Fachliteratur, Unternehmensinformationen und Veröffentlichungen zu Ökobilanzen, die inhaltliche Berührungspunkte aufwiesen, sowie auf eigene Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Sachbilanzdaten zu Basisprozessen wie z.B. Transporte und Entsorgungsverfahren wurden dabei meist unverändert übernommen.

4.2 Wirkungsabschätzung

4.2.1 Vorgehensweise

Neben der Zieldefinition und der Sachbilanz ist die Wirkungsabschätzung der dritte Baustein einer Ökobilanz. Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden die umfangreichen Ergebnisse der Sachbilanz komprimiert und für die Auswertung vorbereitet. Dazu werden die Sachbilanzergebnisse so weit wie möglich (potenziellen) Umweltwirkungen zugeordnet und innerhalb dieser Wirkungskategorien zu aggregierten Werten verrechnet. Die Wirkungsabschätzung beinhaltet nach DIN (2000) folgende Schritte:

- Auswahl der zu betrachtenden Wirkungskategorien
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungskategorien (Klassifizierung)
- Berechnung der Wirkungsindikatorergebnisse (Charakterisierung), d.h.
- Umwandlung der zugeordneten Sachbilanzparameter in gemeinsame Maßeinheiten je Wirkungskategorie
- Bestimmung des Indikatorergebnisses für jede Wirkungskategorie durch Zusammenfassung der umgewandelten Sachbilanzergebnisse
- Analyse der Datenqualität

Jede der Wirkungskategorien bezieht sich auf einen mehr oder weniger komplexen Wirkungsmechanismus, an dessen Ende unerwünschte Auswirkungen auf ein oder mehrere Umweltschutzgüter stehen. Am Anfang steht die Freisetzung bestimmter Stoffe aus dem untersuchten System oder ein durch das System bedingter Eingriff in die Umwelt. Der Name der Wirkungskategorie bezeichnet diesen Wirkungsmechanismus.

Die Auswahl der in einer spezifischen Ökobilanz betrachteten Wirkungskategorien orientiert sich an den aktuellen umweltbezogenen Kenntnissen sowie gegebenenfalls am projektspezifischen Erkenntnisinteresse. Die Entwicklung der Ökobilanzierung sowie der umweltbezogenen Diskussion in den letzten Jahren hat dazu geführt, dass heute üblicherweise rund zehn Wirkungskategorien auf Grund ihrer relativ hohen Umweltrelevanz berücksichtigt werden. In diesem Vorhaben wurde von den vom Umweltbun-

desamt als relevant betrachtete Wirkungskategorien (Plinke et al., 2000) ausgegangen (vgl. Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Wirkungskategorien nach Vorschlag des Umweltbundesamtes (Plinke et al., 2000)

Wirkungskategorie	Einheit
Ressourcenbeanspruchung	kJ KEA gesamt
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äquivalente
Versauerung	kg SO ₂ -Äquivalente
Terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äquivalente
Aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äquivalente
Photochemische Oxidantienbildung	kg Ethen-Äquivalente
Potenzielle direkte Humantoxizität	Keine Aggregierung, Angabe jeweils in kg
Potenzielle direkte Schädigung von Ökosystemen	Keine Aggregierung, Angabe jeweils in kg
Stratosphärischer Ozonabbau	kg R11-Äquivalente
Naturraumbeanspruchung	Natürlichkeitsklassen

Nach Auswahl der zu berücksichtigenden Wirkungskategorien könnten den einzelnen Wirkungskategorien die dafür jeweils relevanten Sachbilanzparameter zugeordnet werden. Um die Auswertung erschwerende Unsymmetrien zu vermeiden, sollte bei der Festlegung der Wirkungskategorien bereits der Mindestumfang der Sachbilanzparameter bestimmt werden, der für alle Prozesse zu erheben ist.

In einem weiteren Schritt sind anschließend für jede der Wirkungskategorien ein bzw. mehrere geeignete Indikatoren zu bestimmen. Der Wirkungsindikator vermittelt zwischen dem durch die Sachbilanzergebnisse charakterisierten Untersuchungssystem und den Wirkungsendpunkten in der Umwelt und sollte die Wirkungskategorie möglichst gut repräsentieren. Der Wirkungsindikator kann frei zwischen den Sachbilanzergebnissen und Wirkungsendpunkten entlang des gesamten Umweltwirkungsmechanismus gewählt werden. So werden in manchen Fällen auch direkt Emissionen der Sachbilanz als Wirkungsindikator herangezogen. Beispiele für Wirkungsindikatoren sind etwa die Freisetzung von Protonen als Indikator für die Wirkungskategorie Versauerung oder die Verstärkung der Infrarotstrahlung der Erdatmosphäre für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt (vgl. Abbildung 4-4).

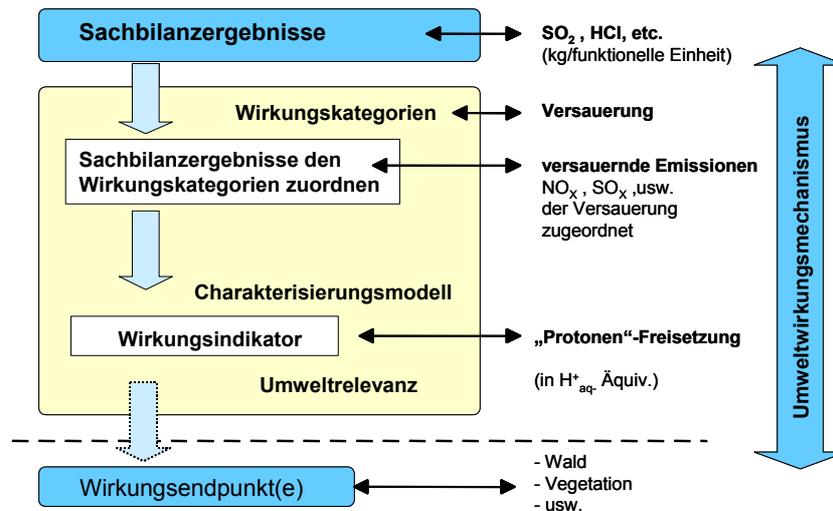


Abbildung 4-4: Wirkungsabschätzung nach DIN EN ISO 14042 - Umrechnung der Sachbilanzergebnisse in Wirkungsendpunkte repräsentierende Wirkungsindikatoren am Beispiel der Versauerung nach DIN (2000)

Die Auswertung basiert dann im Wesentlichen auf den für die einzelnen Wirkungsindikatoren berechneten Indikatorergebnissen. Werden dabei mehrere Sachbilanzparameter in einem Wirkungsindikator zusammengefasst, ist einer Vorgehensweise zur Umrechnung der Sachbilanzergebnisse in eine gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators erforderlich. Dazu werden mehr oder weniger komplexe Charakterisierungsmodelle verwendet, die die Beziehung zwischen dem Wirkungsindikator und den zugeordneten Sachbilanzparametern beschreiben. Über den aus diesen Modellen abgeleiteten Charakterisierungsfaktor, z.B. kg CO₂-Äquivalente je kg des emittierten treibhausrelevanten Gases, können die Sachbilanzergebnisse in eine gemeinsame Einheit umgerechnet und anschließend zum Wirkungsindikatorergebnis addiert werden.

4.2.2 Auswahl der Wirkungskategorien und Zuordnung der Sachbilanzparameter

Den einzelnen Wirkungskategorien sind jeweils Sachbilanzparameter zuzuordnen. Die entsprechenden Sachbilanzergebnisse werden anschließend zu einem bzw. mehreren Wirkungsindikatorergebnissen verrechnet oder direkt als Wirkungsindikatorergebnis verwendet. In Tabelle 4-3 ist die Auswahl der Wirkungskategorien, die Zuordnung der Sachbilanzparameter sowie die den Wirkungsindikator kennzeichnende Einheit für die Auswertung der Produkt- und Verfahrensvergleiche dargestellt. Bei der Erstellung der Sachbilanz ging das Bestreben dahin, für alle betrachteten Prozesse die in der Tabelle aufgeführten Sachbilanzparameter (so weit diese relevant waren) zu erfassen. Dadurch sollten Datenunsymmetrien und gegebenenfalls daraus resultierende Fehlinterpretationen der Ergebnisse vermieden werden.

Tabelle 4-3: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der Sachbilanzparameter zu den Wirkungskategorien und Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse

Wirkungskategorie	Sachbilanzparameter	Indikatorergebnisse (jeweils bezogen auf die funktionelle Einheit)
Ressourcenbeanspruchung - Kumulierter Energieaufwand	KEA fossil, KEA nuklear, KEA regenerativ, KEA sonstige, KEA Wasserkraft	kJ KEA gesamt
Treibhauseffekt	CF ₄ , CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	kg CO ₂ -Äquivalente
Versauerung	HCl, HF, H ₂ S, NO _x als NO ₂ , SO ₂ , NH ₃	kg SO ₂ -Äquivalente
Terrestrische Eutrophierung	NO _x als NO ₂ , NH ₃	kg PO ₄ -Äquivalente
Aquatische Eutrophierung	P _{ges} , CSB, N _{ges} , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	kg PO ₄ -Äquivalente
Photochemische Oxidantienbildung (POCP)	Benzol, HCOH, CH ₄ , VOC, NMVOC	kg Ethen-Äquivalente
Humantoxizität	Einzelparameter	Keine Aggregation, Angabe jeweils in kg
Ökotoxizität	Einzelparameter	Keine Aggregation, Angabe jeweils in kg

Die Wirkungskategorien stratosphärischer Ozonabbau und der Ressourcenbedarf Naturraumbeanspruchung wurden aufgrund fehlender Datensymmetrie bzw. unzureichender Datenlage nicht in der Wirkungsabschätzung berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Wirkungskategorie Photochemische Oxidantienbildung ist zu berücksichtigen, dass es für Stickoxide keinen Äquivalenzfaktor gibt, da diese bei der Bildung von Ozon unter Sonneneinstrahlung nur als Katalysator dienen. Der Sachbilanzparameter Stickoxide (NO_x als NO₂) wurde ohne Aggregation in der Wirkungskategorie Ökotoxizität betrachtet.

4.2.3 Beschreibung der Wirkungskategorien

Die nachfolgende allgemeine Beschreibung der Wirkungskategorien wurde der Studie „Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Vergleichende Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke und Polystyrol“ entnommen, die in Zusammenarbeit des BfA und des Instituts für Energie- und Umweltforschung (ifeu) GmbH erstellt wurde (Würdinger et al., 2002). Besonderheiten, die im Rahmen dieses Vorhabens zu berücksichtigen waren, wurden an entsprechenden Stellen vermerkt. Wirkungskategorien, die keine Berücksichtigung fanden, wurden nicht beschrieben.

4.2.3.1 Ressourcenbeanspruchung

Der Verbrauch von Ressourcen wird als Beeinträchtigung der Lebensgrundlagen des Menschen angesehen. In allen Überlegungen zu einer dauerhaft umweltgerechten Wirtschaftsweise spielt die Schonung der Ressourcen eine wichtige Rolle. Der Begriff Ressourcen wird dabei manchmal beschränkt auf erschöpfliche mineralische oder fossile Ressourcen angewendet oder sehr weit interpretiert, indem z.B. genetische Vielfalt, landwirtschaftliche Flächen etc. darin eingeschlossen werden.

Für eine Bewertung der Ressourcenbeanspruchung innerhalb der Wirkungsabschätzung wird üblicherweise die Knappheit der Ressource als Kriterium herangezogen. Zur Bestimmung der Knappheit einer Ressource werden, bezogen auf eine bestimmte geografische Einheit, die Faktoren Verbrauch, eventuelle Neubildung und Reserven in Beziehung gesetzt. Als Ergebnis erhält man einen Verknappungsfaktor, der dann mit den in der Sachbilanz erhobenen Ressourcendaten verrechnet und in einem Gesamtparameter für die Ressourcenbeanspruchung aggregiert werden kann.

Trotz einer vermeintlich guten methodischen Zugänglichkeit zu der Umweltbelastung Ressourcenbeanspruchung werden zukünftig noch einige grundsätzliche Aspekte zu klären sein. Dies betrifft insbesondere die sinnvolle Einteilung der Ressourcenarten

und die Definition von Knappheit. Erst dann sind nachvollziehbare und akzeptierte Messvorschriften und Bewertungsgrundlagen möglich.

Die Schwierigkeiten bei der Abgrenzung der Ressourcenarten ergeben sich beispielsweise dadurch, dass Materialien auch Energieträger sein können, biotische Ressourcen unter Umständen nicht erneuerbar sind oder Wasser ein erneuerbares Material und ein regenerativer Träger potenzieller Energie sein kann. Dazu kommen Probleme aus der Sachbilanz. Ist der Anbau einer biotischen Ressource ein Teil des Systems, so ist nicht das biologische Material ein Input in das System, sondern die Fläche, auf der es erzeugt wird. Damit ist die Fläche die Ressource, die in der Wirkungsabschätzung und Bewertung zu betrachten ist und nicht die biotische Ressource selbst.

Vor diesem Hintergrund wird von drei Ressourcenkategorien ausgegangen:

- Ressource Energie
- Materialressourcen
- Ressource Naturraum

Für die in diesem Vorhaben untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme wurde eine Bewertung der Naturraumbeanspruchung aufgrund fehlender Datensymmetrie bzw. unzureichender Datenlage nicht vorgenommen. Die zur Verfügung stehenden Daten können aber den Sachbilanzergebnissen entnommen werden.

Energieressourcen

Verschiedene Energierohstoffe, wie z.B. Erdöl oder Holz, sind sowohl stofflich als auch energetisch verwertbar. Aufgrund der vielfältigen Umwandlungsprozesse innerhalb eines Lebensweges, sind dabei die Abgrenzungen nicht leicht zu setzen. Diese Eigenschaft der Energierohstoffe haben bisher zu dem Vorschlag geführt, die Energieträger als Material darzustellen. Damit wurde es jedoch schwer, nichtmaterielle Energieträger wie Windkraft, Wasserkraft, Gezeitenkraft, Photovoltaik, etc. in ein Konzept mit einzu-beziehen. Umgekehrt stellen andere Arbeiten sowohl stofflich als auch energetisch einsetzbare Materialien durch deren Energieinhalt dar. Daraus folgt unweigerlich das Problem, dass diese Materialien mit nichtenergetischen Materialien nicht in Beziehung gesetzt werden können.

Aus diesem Gründen sollte die Energie als eigenständige Ressource angesehen werden. Dabei sollten sowohl die fossilen Energieträger als auch das erschöpfliche Uran als knappe Energieressource einbezogen werden. Für die Aggregation der energetischen Ressourcen existieren prinzipiell zwei Konzepte: Zum Einen die primärenergetische Bewertung des Energieaufwandes und zum Anderen die Bewertung der Endlichkeit der Primärenergieträger.

Als Kategoriebezeichnung für die primärenergetische Bewertung wird der Begriff KEA (Kumulierter Energieaufwand) verwendet. Er drückt die Summe der Energieinhalte aller bis an die Systemgrenzen zurückverfolgten Primärenergieträger aus. Unter der Bezeichnung KEA fossil werden alle bilanzierten fossilen Energieträger aufsummiert. Als KEA nuklear wird der Verbrauch an Uran bilanziert. Der KEA Wasserkraft beinhaltet den nichtmateriellen Energieträger Wasserkraft, während unter der Bezeichnung KEA regenerativ alle regenerativen Energieträger zusammengefasst sind. Vervollständigt wird die Betrachtung durch den KEA sonstiges, in dem alle nicht zuordenbaren Energieträger gesammelt werden. Ausgewertet wird meist der KEA gesamt, ein aus allen KEA-Werten gebildeter Summenwert. Darüber hinaus wird bei Bedarf auch ein KEA solar ausgewiesen, der in Form organischer Verbindungen in Nutzpflanzen, z.B. Ackerfrüchten, gespeicherten Sonnenenergie entspricht.

Die Einbeziehung der Endlichkeit der fossilen Energieträger erfolgt unter Berücksichtigung der statistischen Reichweiten der Ressourcen unter Verwendung der Weltreserven und des aktuellen Verbrauchs der jeweiligen Ressource. In der Wirkungsabschätzung des Umweltbundsamtes zur Ökobilanz „Getränkeverpackungen I“ (Schmitz et al., 1995) wurden die Knappheiten auf Erdöläquivalenzknappheiten bezogen und berechnet. Die Einheit des so erhaltenen Indikators wird als kg Rohöläquivalente¹ bezeichnet.

Für dieses Vorhaben wurde festgelegt, den KEA gesamt auszuwerten. Da dieser auch den KEA fossil umfasst und damit die Gefahr einer Doppelbewertung besteht, wurde auf die Auswertung der Rohöläquivalente verzichtet zumal bei der Bestimmung der Weltreserven große Unsicherheiten bestehen.

¹ Der Begriff der Rohöläquivalente (ROE) wurde in UBA (1995) als Einheit zur Abbildung der Erdöl-Äquivalenzknappheiten in Ökobilanzen eingeführt. Er ist nicht zu verwechseln mit dem gleich lautenden Begriff zur Berechnung der energetischen Äquivalenz verschiedener Energieträger.

Materialressourcen

In dieser Kategorie werden alle materialbehafteten Ressourcen ebenso eigenständig wie die Energie an ihrer materiellen Knappheit gemessen und bewertet. Dazu zählen neben Wasser z.B. auch Rohphosphat, Kalkstein, Rohkali und Erze.

Für die in diesem Vorhaben untersuchten Produkt- und Verfahrenssysteme wurde angenommen, dass die in nennenswerten Mengen eingesetzten Materialien - mit Ausnahme der als Energieträger verwendeten Materialien, die über den KEA berücksichtigt wurden - nicht als knappe Ressourcen einzustufen sind und damit keine Berücksichtigung in der Wirkungsabschätzung und Auswertung finden. Die Verbrauchsdaten können aber den Sachbilanzergebnissen entnommen werden.

4.2.3.2 Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt steht für die negative Umweltwirkung der Erwärmung der Erdatmosphäre und ist in entsprechenden Referenzen bereits eingehend beschrieben worden (IPCC, 1995; Houghton et al., 2001). Aus wissenschaftlicher Sicht sind die Ursachen für den Treibhauseffekt allgemein bekannt. Eine Diskussion besteht jedoch hinsichtlich des Einflusses des Menschen auf diese Ursachen, dem so genannten anthropogen verursachten Treibhauseffekt. Der bisher in Ökobilanzen zumeist angewandte Indikator ist das Strahlungspotential (CML, 1992; Klöpfer und Renner, 1995) und wird in CO₂-Äquivalenten angegeben. Diese Charakterisierungsmethode gilt als allgemein anerkannt.

Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für jede klimawirksame Substanz errechnet und fortschreibt. Die vom IPCC fortgeschriebenen Berichte sind als wissenschaftliche Grundlage zur Instrumentalisierung des Treibhauseffektes in ihrer jeweils neuesten Fassung heranzuziehen.

In stofflich genutzten Pflanzen ist Kohlenstoff aus der Atmosphäre gebunden, der im Laufe der Zeit durch Verrottung oder Verbrennung wieder frei gesetzt wird. Diese CO₂-Emissionen werden per Konvention des IPCC nicht dem Treibhauseffekt zugerechnet, da hierbei genau so viel CO₂ freigesetzt wird, wie zuvor der Atmosphäre beim Wachstum der Pflanze entzogen wurde. Die zeitweilige Bindung von CO₂ in der Pflanze bzw. dem daraus produzierten Stoff ist in der Regel auf maximal einige Jahrzehnte be-

schränkt und erfordert aufgrund der langen Integrationszeiträume beim Treibhauseffekt keine Berücksichtigung.

Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt. Daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. Es existieren Modellierungen für 20, 50 und 100 Jahre. Die Modellrechnungen für 20 Jahre beruhen auf der sichersten Prognosebasis.

Das Umweltbundesamt empfiehlt die Modellierung auf der 100-Jahrebasis, da diese am ehesten die langfristigen Auswirkungen des Treibhauseffektes widerspiegelt. Sie wurde auch in diesem Vorhaben verwendet. Es wurden neben den direkten Effekten auch indirekte Effekte berücksichtigt, wenn z.B. Methan in der Atmosphäre zu Kohlendioxid abgebaut wird.

In Tabelle 4-4 sind die für die Berechnungen des Treibhauspotentials herangezogenen Parameter mit ihren CO₂-Äquivalenzwerten aufgelistet.

Tabelle 4-4: Treibhauspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter (IPCC, 1995)

Parameter	Treibhauspotential (GWP ¹) - 100 Jahre [kg CO ₂ -Äquivalente/kg]
Kohlendioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	21
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	310
Halon 1301	5.600
Perfluormethan (CF ₄)	6.300
Perfluorethan (C ₂ F ₆)	8.200

Der Beitrag zum Treibhauseffekt wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Mengen der einzelnen treibhausrelevanten Gase (m_i) und dem jeweiligen GWP (GWP_i) nach folgender Formel berechnet:

$$GWP = \sum_i (m_i \times GWP_i)$$

4.2.3.3 Versauerung

Eine Versauerung kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich ist die Emission säurebildender Substanzen. Der bei CML (1992) sowie Klöpfer und Renner (1995) gewählte Wirkungsindikator säurebildungspotential wird als adäquat für diese Umweltwirkung angesehen. Damit sind insbesondere keine spezifischen Eigenschaften der belasteten Land- und Gewässersysteme vonnöten. Die Abschätzung des Säurebildungspotentials erfolgt üblicherweise in der Maßeinheit der SO₂-Äquivalente.

In Tabelle 4-5 sind die in diesem Vorhaben erfassten Parameter mit ihren Versauerungspotentialen in Form von SO₂-Äquivalenten aufgelistet.

Tabelle 4-5: Versauerungspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter

Parameter	Versauerungspotential (AP ²) [kg SO ₂ -Äquivalente/kg]
Stickoxide (NO _x)	0,7
Chlorwasserstoff (HCl)	0,88
Schwefeldioxid (SO ₂)	1
Fluorwasserstoff (HF)	1,6
Ammoniak (NH ₃)	1,88
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	1,88

Der Beitrag zum Versauerungspotential wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Parameter (m_i) und dem jeweiligen AP (AP_i) nach folgender Formel berechnet:

$$AP = \sum_i (m_i \times AP_i)$$

4.2.3.4 Aquatische und terrestrische Eutrophierung

Die Wirkungskategorie Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Da zwei unterschiedliche Umweltmedien auf

¹ engl. Global Warming Potential (GWP)

² engl. Acidification Potential (AP)

sehr unterschiedliche Weise betroffen sind, wird auch eine Unterteilung in Gewässer- und Boden-Eutrophierung vorgenommen. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle luftseitig emittierten Nährstoffe eine Überdüngung des Bodens darstellen und alle wasserseitig emittierten Nährstoffe zur Überdüngung der Gewässer beitragen. Da der Nährstoffeintrag in Gewässer über Luftemissionen im Vergleich zum Nährstoffeintrag über Abwässer gering ist, stellt diese Annahme keinen nennenswerten Fehler dar.

Die primäre Wirkung der Eutrophierung ist die stetige Steigerung der biologischen Produktion von Biomasse (z.B. Algen, Pflanzen). Durch das Absterben der Biomasse steht organisches Material zur Verfügung, das mikrobielle, zunächst aerobe, Abbauprozesse fördert. Sekundär führt die Eutrophierung eines Gewässers so zu einer Sauerstoffzehrung. Ein übermäßiges Auftreten Sauerstoff zehrender Prozesse kann zu Sauerstoffmangelsituationen im Gewässer führen. Ein Maß für die mögliche Belastung des Sauerstoffhaushalts im Gewässer stellen der Biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) und Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) dar. Da der BSB nur in Verbindung mit einer Reaktionszeit definiert ist und der CSB das gesamte zur Verfügung stehende Potential zur Sauerstoffzehrung umfasst, wird der CSB als konservative Abschätzung in die Parameterliste der Eutrophierung aufgenommen. Der Begriff der Eutrophierung umfasst hier also die Belastung des Sauerstoffhaushalts eines Umweltmediums so weit dies durch die Zufuhr von Nährstoffen einerseits bzw. durch die Zufuhr von über den CSB messbaren chemischen Verbindungen andererseits darstellbar ist.

Zur Berechnung der unerwünschten Nährstoffzufuhr wird der Indikator Eutrophierungspotential mit der Maßeinheit Phosphat-Äquivalente verwendet (CML, 1992; Klöpfer und Renner, 1995). Es ist ein relatives Maß für die Fähigkeit einer Substanz, Biomasse zu bilden.

In Tabelle 4-6 sind die für die Berechnungen der Eutrophierungspotentiale herangezogenen Parameter (Schad- bzw. Nährstoff) mit ihrem jeweiligen Charakterisierungsfaktor aufgeführt.

Für die Nährstoffzufuhr in den Boden bzw. in Gewässer wird der Beitrag zum Eutrophierungspotential durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Parameter (m_i) und dem jeweiligen NP¹ (NP_i) berechnet:

$$NP = \sum_i (m_i \times NP_i)$$

Tabelle 4-6: Eutrophierungspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter (CML, 1992; Klöpffer und Renner, 1995)

Parameter	Eutrophierungspotential (NP) [kg PO ₄ -Äquivalente/kg]
<i>Eutrophierungspotential (terrestrisch)</i>	
Stickoxide (NO _x als NO ₂)	0,13
Ammoniak (NH ₃)	0,346
<i>Eutrophierungspotential (aquatisch)</i>	
CSB	0,022
Nitrat (NO ₃ ⁻)	0,095
Nitrit (NO ₂ ⁻)	0,13
Ammonium (NH ₄ ⁺)	0,327
Gesamtstickstoff	0,42
Phosphat (PO ₄ ³⁻)	1
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)	1,338
Gesamtphosphor	3,06

4.2.3.5 Ozonbildung

Die Wirkungskategorie Photochemische Oxidantienbildung oder Ozonbildungspotential beschreibt die Bildung von bodennahem Ozon, das als schädliches Spurengas einzuordnen ist und im Verdacht steht, zu Vegetations- und Materialschäden zu führen sowie Gesundheitsbeschwerden hervorzurufen. Das Ozonbildungspotential ist in Fachkreisen umstritten, da es zum Einen auf der Änderung bestehender Ozonkonzentrationen aufbaut und zum Anderen für regional weiträumige Ausbreitungsrechnungen entwickelt wurde. Es basiert auf dem Potential der Kohlenwasserstoffe zur Photooxidantienbildung und erfasst den Beitrag der Stickoxide an den Bildungsreaktionen nicht.

¹ engl. Nitrification Potential (NP)

Aufgrund der komplexen Reaktionsvorgänge bei der Bildung von bodennahem Ozon (Photosmog oder Sommersmog) ist die Modellierung der Zusammenhänge zwischen Emissionen ungesättigter Kohlenwasserstoffe und Stickoxiden äußerst schwierig.

In Tabelle 4-7 sind die in diesem Vorhaben berücksichtigten Parameter mit ihrem jeweiligen Ozonbildungspotentialen aufgeführt. Es wurden nur die Einzelsubstanzen herangezogen, die einen definierten Äquivalenzfaktor zu Ethen aufweisen. Für die stofflich nicht präzise spezifizierten Kohlenwasserstoffe, die in Literaturdatensätzen häufig angegeben werden, wurden aus CML (1992) und Schmitz et al. (1995) entnommene mittlere Äquivalenzwerte verwendet. Für Stickoxide gibt es keinen Äquivalenzfaktor, da diese bei der Bildung von Ozon unter Sonneneinstrahlung nur als Katalysator dienen.

Tabelle 4-7: Ozonbildungspotentiale der im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Parameter

Parameter	Ozonbildungspotential (POCP ¹) [kg Ethen-Äquivalente/kg]
Methan	0,007
n-Pentan	0,408
n-Butan	0,41
Formaldehyd	0,412
Ethen	1
Benzol	1,189
Kohlenwasserstoffe	
- NMVOC (Dieselpartikel)	0,7
- NMVOC (Durchschnitt)	0,416
- VOC (Durchschnitt)	0,377

Das Ozonbildungspotential wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Parameter (m_i) und dem jeweiligen POCP ($POCP_i$) nach folgender Formel berechnet:

$$POCP = \sum_i (m_i \times POCP_i)$$

¹ engl. Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)

4.2.3.6 Humantoxizität - Potenzielle toxische Schädigung des Menschen und von Organismen

Die in der Sachbilanz erhobenen Daten zu toxischen Emissionen stellen Schadstofffrachten dar. Die Schadstofffrachten werden in einer Ökobilanz nicht in Bezug zu einer konkreten räumlichen Einheit erhoben. Die Sachbilanzdaten sind daher nicht mit einer konkreten Expositions Betrachtung verbunden. Die klassischen Instrumente zur toxikologischen Bewertung, wie z.B. die Risikoanalyse oder Umweltverträglichkeitsuntersuchungen, sind somit nicht unmittelbar innerhalb einer Ökobilanz anwendbar.

Eine methodische Vorgehensweise, die Vielfalt an toxikologischen Wirkungen, die von einzelnen toxischen Stoffen ausgeht, zu beschreiben und zusammenzufassen, ist bisher nicht allgemein akzeptiert. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob ein Ansatz mit dem Anspruch, die gesamte Breite der Toxikologie belastbar abzudecken, überhaupt realisierbar ist.

In diesem Vorhaben wurden zur Bewertung der Humantoxizität als Informationsgrößen die Parameter Benzo(a)pyren, Schwefeldioxid, Staub, Blei und Cadmium direkt aus der Sachbilanz ohne weitere Aggregation herangezogen. Dies entspricht dem Vorgehen in der Wirkungsabschätzung zur Ökobilanz „Getränkeverpackungen II“ des Umweltbundesamtes (Plinke et al., 2000).

4.2.3.7 Ökotoxizität –Potenzielle toxische Schädigung von Organismen und Ökosystemen

Im Prinzip stößt man hier auf die gleiche Problematik wie im Falle der Humantoxizität. Daher wurde ebenfalls wie in der Wirkungsabschätzung zu der Ökobilanz „Getränkeverpackungen II“ (Plinke et al., 2000) verfahren und zur Bewertung der Ökotoxizität als Informationsgrößen die wasserseitigen Parameter Kohlenwasserstoffe, Chlorid, AOX und Ammonium sowie die luftseitigen Parameter Stickoxide (NO_x als NO₂), Schwefelwasserstoff, Fluorwasserstoff, Ammoniak und Schwefeldioxid direkt aus der Sachbilanz ohne weitere Aggregation übernommen.

4.2.4 Normierung

Die Normierung ist nach DIN/EN ISO 14042 ein optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung in einer Ökobilanz. Als Normierung wird die Berechnung der Größenord-

nung der Ergebnisse im Verhältnis zu einem Referenzwert bezeichnet. Die Ergebnisse der Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter werden auf bereits existierende Umweltbelastungen bezogen. Der Referenzwert entspricht der Umweltbelastung auf dem Territorium der Bundesrepublik Deutschland. Berechnet wird beispielsweise das Treibhauspotential, das durch die Jahresemissionen an Treibhausgasen in der BRD verursacht wird. Zu diesem Wert wird das für ein spezifisches Szenario ermittelte Treibhauspotential ins Verhältnis gesetzt. Dadurch ergibt sich der spezifische Beitrag dieses Szenarios zur Gesamtbelastung. Bezieht man diese Zahl auf die Einwohnerzahl Deutschlands, so erhält man die so genannten Einwohnerwerte (EWW). Die Einwohnerwerte stellen sozusagen eine einheitliche Basis dar und ermöglichen den Vergleich von Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter untereinander.

Die im Rahmen der Normierung für jede Wirkungskategorie berechneten Einwohnerwerte erlauben einen größenordnungsbezogenen Vergleich der Ergebnisse der Wirkungskategorien und der Einzelwerte untereinander. Je größer die Anzahl der Einwohnerwerte ist, desto bedeutender ist diese Wirkungskategorie bzw. der Einzelwert für die ökologische Beurteilung hinsichtlich des relativen Beitrags zur Umweltbelastung.

Die für die Normierung verwendeten Referenzwerte in diesem Projekt (Gesamtemissionen und –verbräuche als auch auf Einwohner bezogene Werte) sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Die Werte beruhen auf eigenen Recherchen und Werte aus Vogt et al. (2002). Bei der Interpretation der Ergebnisse muss unbedingt beachtet werden, dass sich die aus den Ergebnissen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung und den Referenzwerten berechneten Einwohnerwerte ebenfalls auf die funktionelle Einheit des jeweiligen Projektmoduls beziehen.

Tabelle 4-8: Daten zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und –verbräuche in Deutschland und mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr

Parameter	Deutschland		Quelle	Belastung je Einwohner ^{a)}	
Wirkungskategorien, aggregiert					
KEA gesamt	14.354.000	TJ/a	c)	174.520.961	kJ/a
Treibhauspotential	970.912.000	t CO ₂ -Äq/a	d)	11.805	kg/a
Versauerungspotential	3.348.420	t SO ₂ -Äq/a	d)	40,7	kg/a
Eutrophierungspotential (terrestr.)	428.714	t PO ₄ -Äq/a	d)	5,21	kg/a
Eutrophierungspotential (aquat.)	457.620	t PO ₄ -Äq/a	d)	5,56	kg/a
Ozonbildungspotential (POCP)	709.713	t Eth-Äq/a	d)	8,63	kg/a
Humantoxische Stoffe					
Benzo(a)pyren (L)	13,76	t/a	e)	0,00017	kg/a
Blei (L)	632	t/a	f)	0,0077	kg/a
Cadmium (L)	11	t/a	f)	0,00013	kg/a
Schwefeldioxid (L)	795.000	t/a	g)	9,67	kg/a
Staub (L)	259.000	t/a	h)	3,15	kg/a
Ökotoxische Einzelstoffe					
Ammoniak (L)	624.000	t/a	g)	7,59	kg/a
Fluorwasserstoff (L)	124.000	t/a	i)	1,51	kg/a
Schwefeldioxid (L)	795.000	t/a	g)	9,67	kg/a
Schwefelwasserstoff (L)					
Stickoxide (L)	1.600.000	t/a	g)	19,45	kg/a
Ammonium (W)	230.000	t/a	k)	2,80	kg/a
AOX (W)	4.337	t/a	l)	0,053	kg/a
Chlorid (W)					
Kohlenwasserstoffe (W)	4.266	t/a	k)	0,052	kg/a

a) Basis: 82.248.000 Einwohner in BRD in 2000 nach b)

b) (Destatis 2002)

c) (BMWA 2003) Werte für 2000

d) (Vogt et al. 2002)

e) (ifeu 1994)

f) (UBA 2004)

g) (UBA 1996) Werte für 1995

g) (UBA 2002) Werte für 2000

h) (UBA 2002) Werte für 1999

i) (UBA 1993) Werte für 1991

k) (Vogt et al. 2002) Schätzung von ifeu

l) (Statistisches Bundesamt 1995)

4.3 Erläuterungen zur Darstellung und Auswertung der Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Zusätzlich wurden die zur Beantwortung des Erkenntnisinteresses ausgewählten Sachbilanzparameter und Wirkungsindikatoren für den entsprechenden Produkt- oder Verfahrenvergleich unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert. Alle Ergebnisse sind dabei auf die jeweilige funktionelle Einheit bezogen worden. Die Auswertung umfasste jeweils:

- In- und outputseitige Sachbilanzparameter,
- Wirkungskategorien und
- Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Tabellarische Darstellung der Sachbilanzparameter

Stellvertretend für alle in- und outputseitigen Sachbilanzparameter wurden vor der Wirkungsabschätzung tabellarisch inputseitig die Stoff- und Energieeinsätze sowie outputseitig die Luft- und Wasseremissionen zusammengefasst, die für die Auswertung der Wirkungskategorien notwendig sind. Auf der Outputseite sind darüber hinaus auch Abwasser- und Abfallmengen aufgeführt.

Die Daten in den Tabellen entsprechen Netto-Ergebnissen, d.h. über den Lebensweg aufsummierte Bruttoergebnisse abzüglich eventueller Gutschriften und wurden den in Tabelle 4-9 vorgestellten Kategorien zugeordnet.

Tabelle 4-9: Datenkategorien, denen die Sachbilanzparameter zugeordnet sind

	Input	Output
Elementarflüsse	Fossile Energieträger Mineralische Rohstoffe und Erze Wasserbedarf	Emissionen in die Luft Emissionen ins Wasser Abwassermenge
Nicht-Elementarflüsse*	-	Abfallmenge
Bilanzierungsgrößen	Kumulierter Energieaufwand Naturraum	-

* Bilanzierungsgrößen sind Informationen, die keine Massenflüsse sind, allerdings direkt mit den Massenflüssen gekoppelt sind

Die kompletten Sachbilanzen wurden dem Anhang beigelegt. Diese beinhalten dann auch alle in den Tabellen nicht aufgeführten Sachbilanzparameter.

Grafische Darstellung der normierten und zusammengefassten Einzelergebnisse

Die Normierung der Ergebnisse auf die Einwohnerwerte soll den relativen Vergleich der Wirkungskategorien und der Einzelwerte der einzelnen Szenarien mit- und untereinander ermöglichen. Je höher die Einwohnerwerte sind, desto bedeutender ist die Wirkungskategorie bzw. der Einzelwert für die Umweltbelastung. Durch den Vergleich der verschiedenen Kategorien bzw. Werte miteinander, wird die unterschiedliche Bedeutung hinsichtlich der Umweltbelastung deutlich.

Die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung beziehen sich auf die jeweilige funktionelle Einheit der Szenarien. Die normierten Werte lassen keine Rückschlüsse zu, ob die Prozesse bzw. die Unterschiede für Deutschland von Bedeutung sind, da die Werte auf die jeweilige funktionelle Einheit bezogen sind und nicht auf eine Jahresproduktion. Erst die Normierung der Jahresproduktion der einzelnen Szenarien auf Einwohnerwerte würde diese Auswertung zulassen.

Tabelle 4-10 zeigt ein Beispiel für die normierte Darstellung der Ergebnisse.

Die Bedeutung der absoluten Werte, der berechneten Einwohnerwerte und der Differenzen der Einwohnerwerte wurde durch Anwendung folgender Formatierungen von Schrift und Hintergrundfarbe hervorgehoben:

- Höherer Wert: fette schwarze Zahlenwerte in weißem Kasten
- Umweltentlastung durch biotechnisches Verfahren: Grüner Kasten mit weißer Zahl
- Umweltmehrbelastung durch biotechnisches Verfahren: Orangener Kasten mit schwarzer Zahl
- Unrelevante Differenz der Umweltbelastungen: Weißer Kasten mit Zahl ohne Fettdruck

Tabelle 4-10: Beispiel der normierten Darstellung als Auszug aus Netto-Ergebnissen

		Bio- technisch	Chemisch- technisch	Bio- technisch	Chemisch- technisch	Differenz (Bio. - Chem.)
	Einheit			Einwohner- werte	Einwohner- werte	Einwohner- werte
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	391	590	2,24	3,38	-1,14
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq.	25,0	33,5	2,12	2,84	-0,72
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	115	229	2,84	5,63	-2,79
Eutrophierungspotential (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	11,4	15,2	2,19	2,91	-0,73
Eutrophierungspotential (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	21,4	5,8	3,85	1,04	2,81
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren	g	0,0067	0,0034	0,04	0,02	0,02
Blei	g	0,28	0,16	0,04	0,02	0,02
Cadmium	g	0,095	0,034	0,71	0,26	0,45

4.4 Bilanzierungssoftware UMBERTO®

Für die Erstellung der Ökobilanzen wurde das kommerzielle Programm UMBERTO® verwendet, das auf dem Konzept der Stoffstromnetze, die nach den Prinzipien der Petri-Netztheorie aufgebaut werden, basiert (vgl. Abbildung 4-5). UMBERTO® ist eine Software, die den Anwender bei der Erstellung, Berechnung und Visualisierung der Stoff- und Energieströme eines Systems unterstützt. Das Programm hilft, die Komplexität im Zusammenhang mit der Abbildung und Modellierung von Stoffstromnetzen durch die große Flexibilität und eine mitgelieferte umfangreiche Datenbank mit Bilanzen verschiedener Prozesse (Energie, Transporte, Grundstoffe der chemischen Industrie) besser zu bewältigen. Darüber hinaus bietet die Software auch Werkzeuge zur Erstellung von Wirkungsabschätzungen nach verschiedenen Methoden. UMBERTO® wurde vom ifu – Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH (Software-Programmierung) und vom ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung (Bewertung und Prozessmodule) in Kooperation entwickelt.

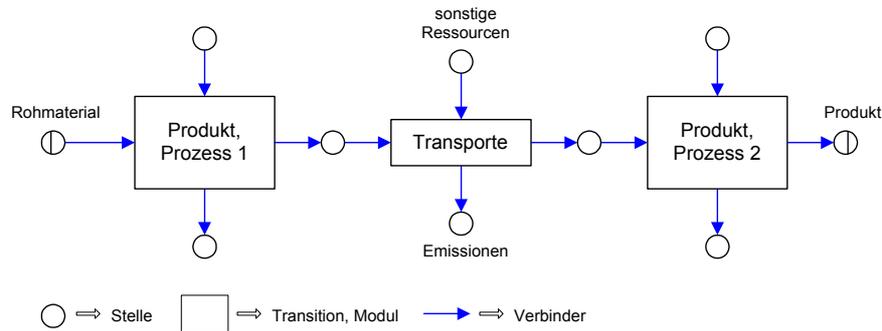


Abbildung 4-5: Aufbau eines Petri-Netzes (Schmidt und Schorb, 1995)

In UMBERTO[®] wird der Grundgedanke der Petri-Netze genutzt, der konsequent zwischen Umwandlungsprozessen (Transitionen, Modulen) sowie Stoff- und Energielagern (Stellen) unterscheidet. Die relevanten Zusammenhänge in einem untersuchten System werden als ein Netz von miteinander verbundenen Transitionen und Stellen modelliert, die Umwandlungsprozesse, Lager, Transportvorgänge, etc. darstellen. An den Verbindungen zwischen den Netzelementen fließen Energien und Stoffe unterschiedlicher Art und Menge. Durch die grafische Darstellung der Netze mithilfe einer einfachen Symbolik wird ein hohes Maß an Übersichtlichkeit erzielt (ifu und ifeu, 2002).

5 Auswertung der Umweltentlastungseffekte von bestehenden biotechnischen Verfahren

Dieses Projektmodul sah eine vergleichende Auswertung je eines biotechnischen und eines chemisch-technischen Herstellungsverfahrens für dasselbe Produkt (P) vor. Die Verfahrensalternativen sollten bereits in der Industrie eingesetzt werden oder sich zumindest im Technikummaßstab befinden. Details zur Auswahl der im Rahmen dieser Studie betrachteten Verfahren wurden im Abschnitt 3 benannt.



Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für einen Vergleich

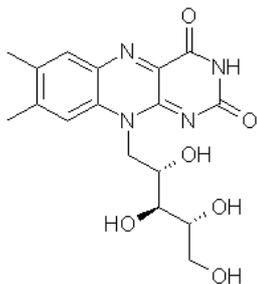
Da es eine unüberschaubare Vielfalt von Produktionsprozessen und Produktionsabläufen gibt, konnten im Rahmen dieses Vorhabens nur zwei Varianten betrachtet werden:

- Bei der Herstellung von Vitamin B2 können die zahlreichen Syntheseschritte vom Rohstoff zum Produkt vollständig biotechnisch oder chemisch-technisch durchgeführt werden (s. 5.1).
- Bei der Lederherstellung kommen ebenfalls zahlreiche Verfahrensschritte zum Einsatz, doch wurde hier nur untersucht, welche Unterschiede der Umweltauswirkungen auftreten, wenn ein Verfahrensschritt biotechnisch oder chemisch-technisch durchgeführt wird (s. 5.2).

Die betrachteten Varianten repräsentieren somit zwei Extreme möglicher Herstellungsverfahren, so dass ein Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Varianten zumindest eingeschränkte Rückschlüsse auf andere Herstellungsverfahren ermöglicht.

5.1 Verfahrensvergleich 1 – Biotechnische und Chemisch-technische Vitamin B2-Produktion

5.1.1 Basisinformationen



Für die in Abbildung 5-2 dargestellte, heute IUPAC-konform als Riboflavin bezeichnete, Verbindung sind auch die Bezeichnungen Vitamin B2 und Lactoflavin gebräuchlich. Das 1917 erstmals aus Pflanzen isolierte Riboflavin kommt in Lebewesen sowohl unverändert als auch als 5'-Phosphat, als Flavinmononucleotid, als 5'-Adenosindiphosphat und als Flavin-Adenin-Dinucleotid vor (Shimizu, 1996).

Abbildung 5-2: Riboflavin

Vitamin B2 ist in Lebewesen weit verbreitet und an diversen biochemischen Reaktionen beteiligt (Massey, 2000). Inzwischen sind allein über 100 Flavoproteine bekannt, von denen mehr als 40 im menschlichen Gewebe nachgewiesen wurden. Pflanzen und Mikroorganismen können ihren Vitamin B2-Bedarf durch Biosynthese decken, während tierische Lebewesen Vitamin B2 über die Nahrung aufnehmen müssen. Der tägliche Bedarf an Vitamin B2 wird für den Menschen mit 0,3 - 1,8 mg/Tag und für Tiere mit 1 - 4 mg/Tag angegeben (Stahmann et al., 2000).

Industriell kann Vitamin B2 sowohl in chemisch-technischen wie auch in biotechnischen Verfahren erzeugt werden. In den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde Vitamin B2 durch Fermentationen mit *Clostridium acetobutylicum*, *Eremothecium ashbyi* und *Ashbya gossypii* hergestellt. Aus Kostengründen verdrängten später chemisch-technische Verfahren die Fermentation (Stahmann et al., 2000). Wesentliche Optimierungen der biotechnischen Herstellungsverfahren führten jedoch in den letzten zwei Jahrzehnten dazu, dass Vitamin B2 heute wieder überwiegend biotechnisch hergestellt wird. Die BASF AG hat die biotechnische Produktion 1990 wieder aufgenommen und damit 1996 den chemischen Prozess ersetzt. Die ehemalige Roche Vitamine GmbH (jetzt DSM Nutritional Products) hat im Jahr 2000 den chemischen durch den biotechnischen Herstellungsprozess substituiert.

Das weltweite Handelsvolumen für wasserlösliche Vitamine ist in Tabelle 5-1 zusammengefasst. 1999 wurde die Gesamtproduktion von Vitamin B2 auf 4.515 Mg pro Jahr geschätzt, wobei die jährliche Wachstumsrate der Produktionsmenge bei 3 – 4 % liegen soll (UK-CC, 2001). Wie die Tabelle weiter zeigt, wurde rund 70 % des weltweit produzierten Vitamin B2 von den Firmen BASF/TAKEDA und Roche hergestellt.

Tabelle 5-1: Weltweites Handelsvolumen für wasserlösliche Vitamine sowie Marktanteile für Vitamin B2 1999 (Daten von BASF, zitiert in UK-CC, 2001)

Vitamin	Menge [Mg]	Produzent	Marktanteil Riboflavin insgesamt	Marktanteil Riboflavineinsatz in Nahrung/Pharma	Marktanteil Riboflavineinsatz in Futtermitteln
Vitamin C	79.420	BASF*	19 %	9 %	30 %
Niacin	24.350	Takeda*	12 %	21 %	3 %
Calpan	8.509	Roche**	38 %	42 %	39 %
Vitamin B2	4.515	China	19 %	29 %	28 %
Vitamin B1	3.790				
Vitamin B6	2.990				
Folsäure	510				
Biotin	48				
Vitamin B12	15				

* BASF hat TAKEDA übernommen
* jetzt DSM Nutritional Products

Der überwiegende Teil des Vitamins B2 wird für die Herstellung von Futtermitteln genutzt. In Europa sind dies etwa 85 % des eingesetzten Vitamins. Der größte Teil der restlichen 15 % geht in die Herstellung von Nahrungsmitteln und nur eine kleine Menge wird als Additiv für Kosmetika und Arzneimittel verwendet.

5.1.2 Aufgabenstellung

Am Beispiel der bestehenden Vitamin B2-Produktion sollte geprüft werden, ob sich durch das biotechnische Verfahren Umweltentlastungseffekte gegenüber dem chemisch-technischen Verfahren ergeben. Dafür wurden Daten unterschiedlicher Detaillierungstiefe, die bei der Firmen jetzt DSM Nutritional Products (vormals Roche Vitamine GmbH) erhoben bzw. die von der BASF AG zur Verfügung gestellt wurden, ausgewertet.

5.1.3 Vitamin B2-Produktion der DSM Nutritional Products (vormals Roche Vitamine GmbH)

5.1.3.1 Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien

5.1.3.1.1 Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS

Wie in Abbildung 5-3 dargestellt, dient als Ausgangsprodukt für die biotechnische Vitamin B2-Produktion Glukose. Für die fermentative Produktion des Vitamin B2 wird ein Stamm von *Bacillus subtilis* verwendet, dessen Produktbildung durch Mutagenese und Selektion sowie durch gentechnische Veränderung optimiert worden ist (Perkins et al., 1999).

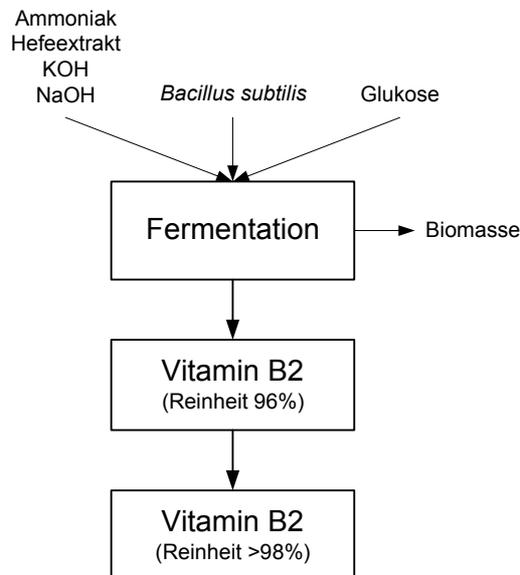


Abbildung 5-3: Schema der biotechnischen Vitamin B2-Produktion

Die Fermentation wird in zeitlich versetzt betriebenen Großfermentern durchgeführt. Aus der Fermentationsbrühe wird das Vitamin B2 anschließend von der Biomasse abgetrennt und bis auf die Rohware mit einem Gehalt von mind. 96 %, die nur noch Spuren von Biomasse, Proteinen und Wasser enthält, aufgearbeitet. Aus der Rohware werden Verkaufsprodukte für Futtermittelanwendungen (Mix aus Vitamin B2 und Maltodextrin) sowie für Food- und Pharmaapplikationen (Reinware mit einer Reinheit

> 98 %) hergestellt. Zur Herstellung der Reinware werden aus der Rohware Spuren an Biomasse und Proteinen entfernt (DSM, 2003).

Im Unterschied zum chemisch-technischen Prozess werden beim biotechnischen Prozess keine relevanten Mengen umweltgefährdender Chemikalien eingesetzt. Neben den Vitamin B2-Produkten entstehen Bakterienbiomasse, Abluft und größere Mengen gering belastete Abwässer.

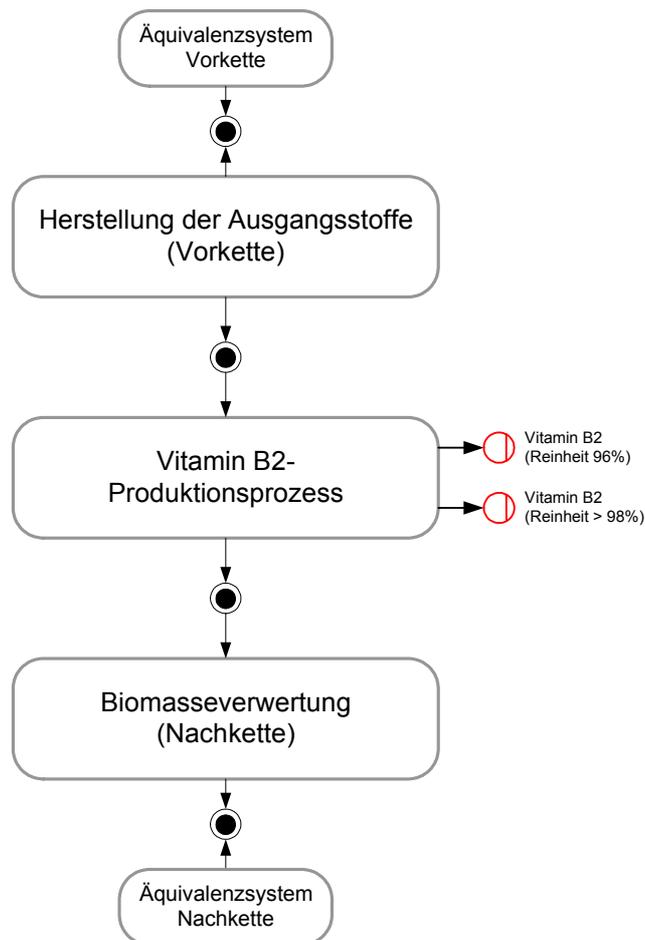


Abbildung 5-4: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS

Abbildung 5-4 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS. Äquivalent zum CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS ermöglichte der Aufbau des Umberto-Modells die Auswertung der Ergebnisse differen-

ziert nach der Herstellung der Ausgangsstoffe, dem Produktionsprozess sowie der Biomasseverwertung. Die Teilsysteme sind im Abschnitt 5.1.3.4 beschrieben.

5.1.3.1.2 Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Bis vor wenigen Jahren wurde Vitamin B2 mit einem vor rund 50 Jahren entwickelten chemisch-technischen Syntheseprozess hergestellt, bei dem das Ausgangsprodukt Glukose in sechs Syntheseschritten zu Vitamin B2 verarbeitet wurde. Wie Abbildung 5-5 verdeutlicht, wurde dabei Ribose (hergestellt durch Fermentation von Glucose) mit 3,4-Xylidin zu Ribitylxylidin umgesetzt, woraus in einem weiteren Syntheseschritt ein Azofarbstoff entstand. Dieser reagierte mit Barbitursäure zur Vitamin B2-Rohware, aus der anteilig Reinware gewonnen wurde (OECD, 2001; DSM, 2003). In DECHEMA (2000) wird die Vitamin B2-Ausbeute mit 60 % angegeben, wobei rd. 36 Massenprozent auf die Ribose und rd. 64 Massenprozent auf andere Grundchemikalien zurückgehen.

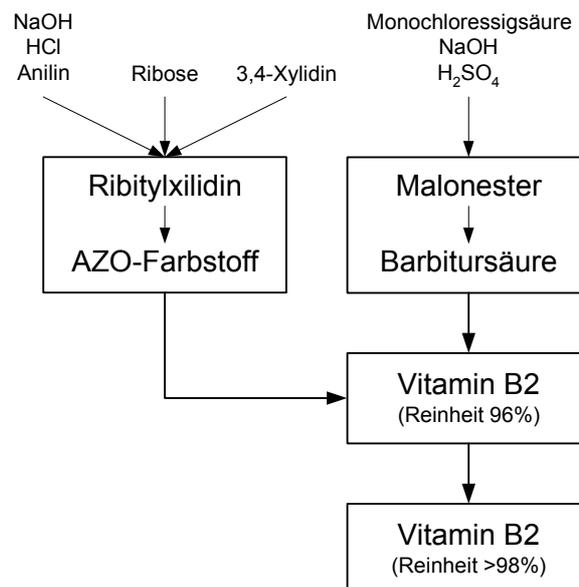


Abbildung 5-5: Schema der chemisch-technischen Vitamin B2-Synthese

Das bei der Synthese erhaltene Vitamin B2 wurde durch eine Säurebehandlung soweit aufgereinigt, dass ein Produkt mit 96 % Reinheit entstand, welches hauptsächlich für die Tierernährung verwendet wurde. Durch Rekrystallisation konnte die Produktreinheit auf > 98 % gesteigert werden, sodass ein Einsatz im Pharmabereich und der Nah-

rungsmittelproduktion möglich war. Das chemisch-technisch produzierte Vitamin B2 enthielt noch Spuren der bei der Synthese eingesetzten Anilinverbindungen, die eine Unterscheidung vom biotechnisch gewonnenen Produkt zulassen (DSM, 2003).

Abbildung 5-6 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS. Der Aufbau des Umberto-Modells wurde dem Herstellungsprozess angepasst, sodass die Auswertung der Ergebnisse differenziert nach der Herstellung der Ausgangsstoffe sowie dem Produktionsprozess erfolgen konnte. Die Teilsysteme sind im Abschnitt 5.1.3.4 beschrieben.

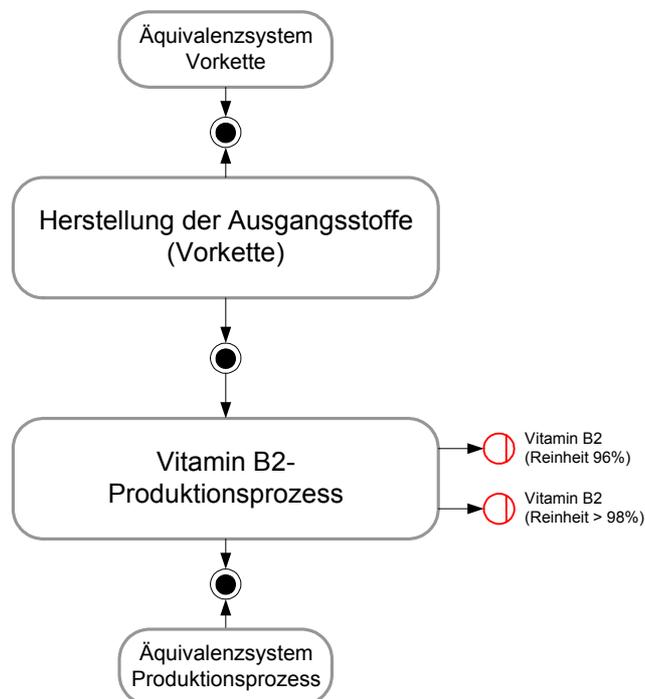


Abbildung 5-6: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

5.1.3.2 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wurde die Produktion von **1.000 kg Vitamin B2 mit einer Reinheit von 96 %** sowie der nachfolgenden Weiterverarbeitung von 19 Gew.%¹ zu **167 kg Vitamin B2 mit einer Reinheit von 98 %** gewählt.

Dafür wurde angenommen, dass die geringfügig unterschiedliche Umsetzungsrate von Vitamin B2-96% zu Vitamin B2-98% des chemisch-technischen Herstellungsprozesses gegenüber der Umsetzungsrate des biotechnischen Herstellungsprozesses vernachlässigbar ist. Zum Einen unterliegen diese Umsetzungsraten prozessbedingte Schwankungen und zum Anderen beläuft sich der Unterschied zwischen den beiden betrachteten Produktionsmonaten¹ lediglich auf ca. 4 %. Da es sich bei der Weiterverarbeitung der Rohware um einen Nebenprozess handelt, der nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse hat, wirkte sich diese Annahme auf das Bilanzierungsergebnis nur sehr geringfügig aus, gewährleistete jedoch die funktionelle Vergleichbarkeit der beiden Herstellungsprozessen und erlaubte die Festlegung einer einheitlichen funktionellen Einheit.

5.1.3.3 Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze

Im Abschnitt 4 sind die übergreifenden, auf alle Modelle zutreffenden Systemgrenzen und Annahmen, Detailgrenzen vor- und nachgelagerter Prozesse sowie die Vorgehensweise bei der Behebung von Datenlücken und Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen beschrieben. Im Folgenden werden die wichtigsten spezifischen Anmerkungen zur Systemgrenze dieses Produktvergleichs zusammengefasst.

Der durchgeführte Verfahrensvergleich umfasst die Herstellung desselben Produktes mit unterschiedlichen Verfahren; die Nutzung und Entsorgung bzw. Verwertung des Produktes blieben unberücksichtigt. Die Systemgrenze umfasst bei beiden Szenarien:

- die Herstellung der Ausgangsstoffe und
- den Vitamin B2-Produktionsprozess.

¹ Entspricht der Menge an Vitamin B2-96%, die beim biotechnischen Prozess im ausgewählten Produktionsmonat weiterverarbeitet wurde.

Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wird zusätzlich die Verwertung der anfallenden Biomasse berücksichtigt. Die Herstellung des Produktes „B2-80-SD“ (Mix aus Vitamin B2 und Maltodextrin) als Teil des biotechnischen Prozesses wurde nicht in die Modellierung mit einbezogen, da kein äquivalentes Produkt mit dem chemisch-technischen Prozess am Standort hergestellt wurde.

Datenlücken und Annahmen

Aufgrund fehlender Daten konnten die Herstellungsprozesse einiger Ausgangsstoffe nicht modelliert werden. Diese Datenlücken umfassen:

- im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS: Entschäumer
- im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS: Hefeextrakt

Die beiden Materialien sind in den Vorketten als leere Module enthalten und tragen nur mit ihren Transporten zu den Ergebnissen bei.

Alle anderen bei der Modellierung aufgetretenen Datenlücken und Unsicherheiten konnten durch Annahmen geschlossen werden, die im Anhang (Datenherkunft und -qualität) beschrieben sind.

Geografischer und zeitlicher Bezug

Der betrachtete geografische Bezugsraum wurde mit den politischen Grenzen der Bundesrepublik Deutschland gleichgesetzt. Allerdings finden die Bereitstellung einzelner (Roh-)Stoffe oder verschiedene Produktionsprozesse nicht immer bzw. nicht ausschließlich in Deutschland statt. Es wurde versucht, den Bezugsraum dann an die jeweiligen Länder anzupassen. War dies nicht möglich, wurde auch der Bezugsraum Deutschland gewählt.

Beim zeitlichen Bezug wurde die jeweils aktuellsten, im Bearbeitungszeitraum verfügbaren Daten verwendet, die über eigene Recherchen bzw. Datenbankauswertungen ermittelt wurden. Details zur Datenherkunft sind im Anhang dokumentiert.

¹ Produktionsmonate: *Juni 2002* für den biotechnischen Prozess; *Oktober 2000* für den chemisch-technischen Prozess

5.1.3.4 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle

Die Bilanzierungsmodelle wurden in Teilsysteme unterteilt (vgl. Abbildung 5-6 und Abbildung 5-4), was eine differenziertere Auswertung der Ergebnisse möglich machte. In diesem Abschnitt werden die Teilsysteme grafisch vorgestellt sowie bei Bedarf näher beschrieben.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Abbildungen wurden:

- Basismodule für die Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie, Bereitstellung von Energieträgern, Bereitstellung von Hilfsstoffen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung sowie
- In- und Outputströme an Roh- und Betriebsstoffen, Ausgangsstoffen unterhalb der Abschneidekriterien, Energieströme, Emissionen, Abfälle und Abwasser

nur dann dargestellt, wenn sie für das Verständnis erforderlich waren. Vollständige Bilanzierungsmodelle mit allen Teilsystemen und Basismodulen sind im Anhang dargestellt.

Die in den Abbildungen verwendeten grafischen Elemente sind in Tabelle 4-1 erläutert, die Module bzgl. Datenherkunft, Literaturquellen, Bezugsjahr, Repräsentativität, Kurzbeschreibungen, Annahmen und Vorketten sowie die Transporte bzgl. Entfernung, Auslastung, Nutzlast und Fahrbahnanteile sind im Anhang (*Datenherkunft und -qualität* sowie *Überblick Transporte*) dokumentiert.

5.1.3.4.1 Herstellung der Ausgangsstoffe (Vorkette)

In Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 sind die Module und Transporte im Teilsystem *Herstellung der Ausgangsstoffe* sowie die Verknüpfungen untereinander dargestellt.

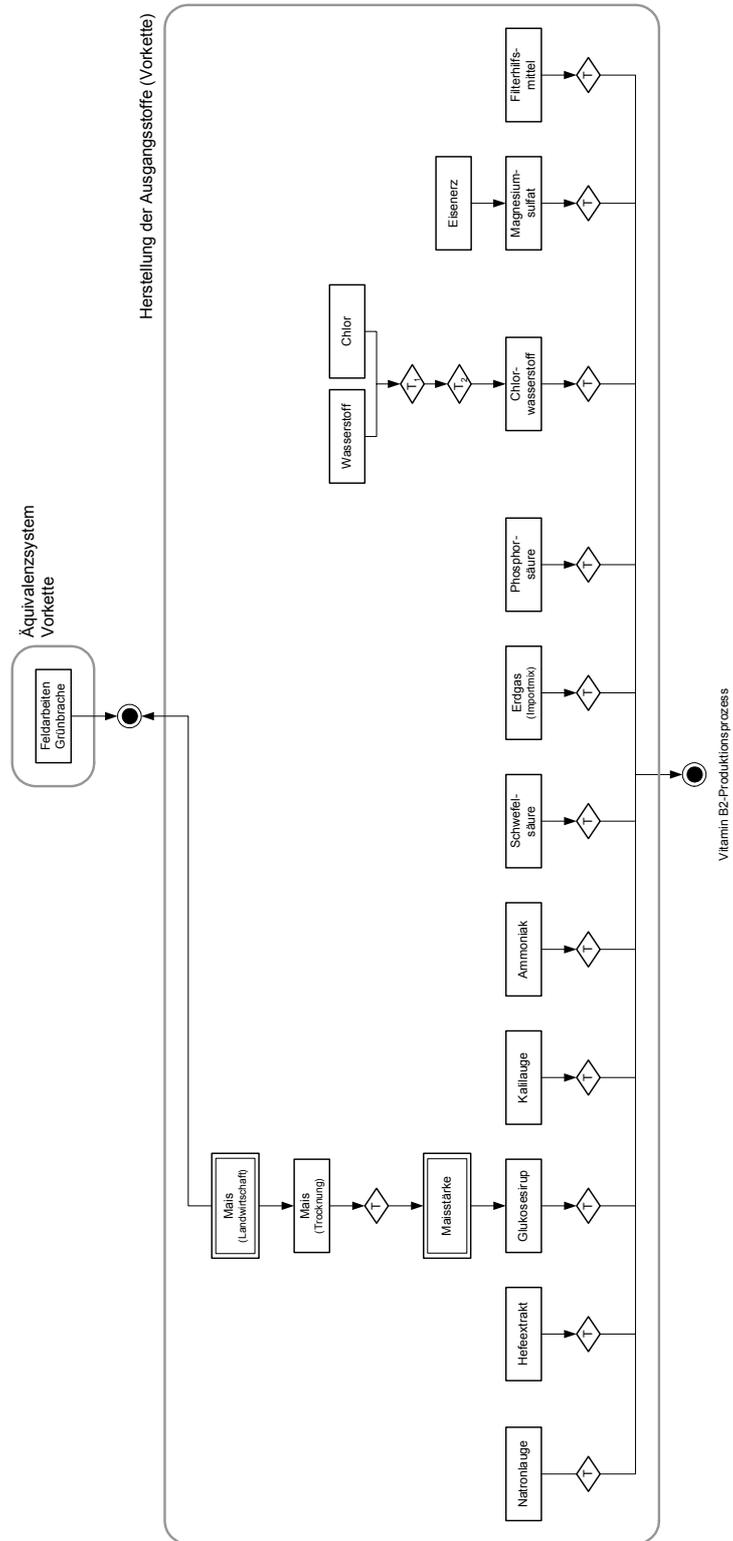


Abbildung 5-7: Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Herstellung der Ausgangsstoffe* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

5.1.3.4.2 Vitamin B2-Produktionsprozess

Für die Herstellung der Vitamin B2-Produkte sowie deren Vorstufen stand ein ERP-System zur Verfügung, aus dem

- die Menge der Ausgangsstoffe
- der Energiebedarf sowie
- der Bedarf an Wasser, Druckluft, Kälteenergie, etc.

entnommen werden konnten. Eine Vor-Ort-Erhebung erweiterte die so geschaffene Datenbasis um notwendige, dort nicht aufgeführte Daten.

In den stofflichen und energetischen Daten des ERP-Systems sind folgende Aufwendungen bereits verrechnet:

- die Bereitstellung der Hilfs- und Betriebsmittel, wie Kondensate, Luft, Kühlwasser, Sohlen, etc.
- die Abluftreinigung,
- die Wasserbereitstellung,
- das Eindampfen der Biomasse sowie
- die Lagerung und Bereitstellung von Ausgangsstoffen

Die in die Bilanzierungsmodelle aufgenommenen Nebenprozesse Abluftreinigung, Lösemittelregenerierung, Biomasseeindampfung, Reinigung des CIP-Wassers und Tanklager enthalten nur Abfallmengen und Emissionen in die Luft bzw. ins Wasser, soweit solche ermittelt werden konnten.

Die beiden Umberto-Modelle für den Szenarien CHEMISCH-TECHNISCHER bzw. BIOTECHNISCHER PROZESS haben folgende Gemeinsamkeiten:

- Für den Energiebedarf ist das bestehende Energiekonzept umgesetzt worden, d.h., die elektrische und thermische Energie stammten aus dem standort eigenen Heizkraftwerk (jeweils zu 50 % aus Erdgas und Schweröl). Abhängig von der Menge thermischer Energie wurde im Verhältnis 7:1¹ elektrische Energie erzeugt. Konnte der Bedarf an elektrischer Energie auf

¹ bei 7 kJ thermischer Energie werden 1 kJ elektrische Energie erzeugt

diese Weise nicht gedeckt werden, wurde die Differenz aus dem Stromnetz Deutschland angefordert.

- Für die Bereitstellung von Kälteenergie und Druckluft sind Standard-Module aus der Umberto-Bibliothek integriert worden (siehe Anhang)
- Zur Behandlung des anfallenden Abwassers wurde das Standard-Modul einer kommunalen Kläranlage (siehe Anhang) mit den Verfahrenskennndaten der Kläranlage des Standortes modifiziert, um den realen Bedingungen der Abwasserbehandlung näher zu kommen.
- Die von der DSM zur Verfügung gestellten Abwasserberichte zur Vitamin B2-Produktion enthielten keine Angaben bezüglich der für das Umberto-Modul der Kläranlage notwendigen Abwasserparameter Ammonium, AOX, BSB₅, CSB und Phosphor. Die Parameter Ammonium, CSB und Phosphor wurden deshalb basierend auf den Abwasserberichten abgeschätzt. Die Parameter BSB₅ und AOX mussten unberücksichtigt bleiben.

Abbildung 5-9 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzierungsmodells des in Abbildung 5-3 dargestellten biotechnischen Vitamin B2-Produktionsprozesses. Eine Verfahrensbeschreibung enthält Abschnitt 5.1.3.1. Eine nähere Beschreibung der Prozessmodule ist aus Gründen der Vertraulichkeit nicht möglich.

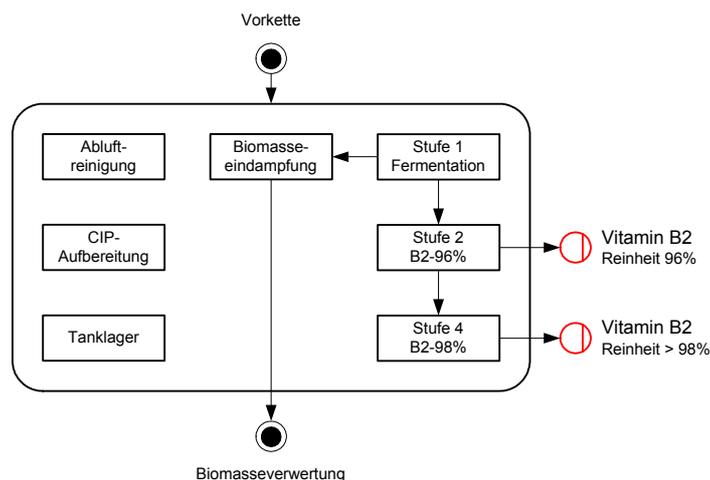


Abbildung 5-9: Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Vitamin B2-Produktionsprozess*

Abbildung 5-10 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzierungsmodells des in Abbildung 5-5 dargestellten chemisch-technischen Vitamin B2-Produktionsprozesses.

Eine Verfahrensbeschreibung enthält Abschnitt 5.1.3.1. Eine nähere Beschreibung der Prozessmodule, Verfahrenskenndaten, Modell- und Abwasserparameter ist aus Gründen der Vertraulichkeit nicht möglich.

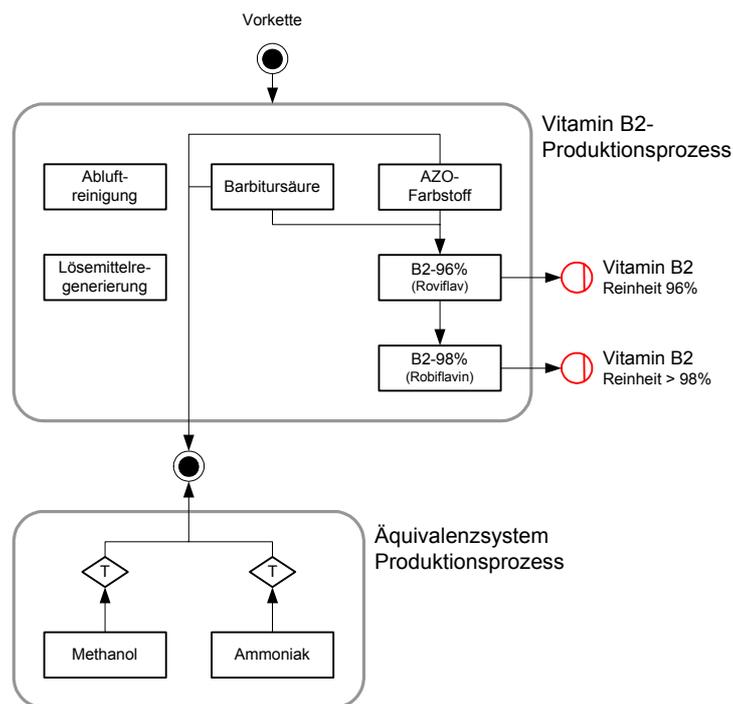


Abbildung 5-10: Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Vitamin B2-Produktionsprozess* inklusive des nachgelagerten Äquivalenzmodells

In Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 sind die wichtigsten der von DSM zur Verfügung gestellten Ausgangsdaten (Stoff- und Energieflüsse) für die beiden Produktionsprozesse von Vitamin B2 dargestellt. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind einige Ausgangsdaten anonym gehalten bzw. in Materialgruppen zusammengefasst.

Wie der Vergleich der Daten zeigt, wurde inputseitig beim CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS mehr als die doppelte Menge an Chemikalien benötigt als beim BIOTECHNISCHEN PROZESS, dafür wurden aber keine Ausgangsstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen benötigt (nur bei der Herstellung des Ausgangsstoffs Ribose wurde Glukose eingesetzt).

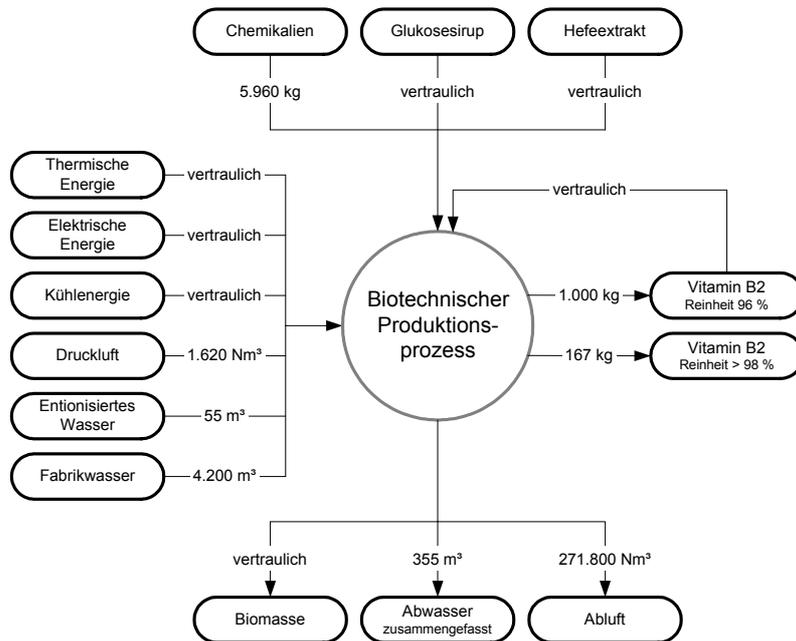


Abbildung 5-11: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den biotechnischen Produktionsprozess von Vitamin B2 (Juni 2002)

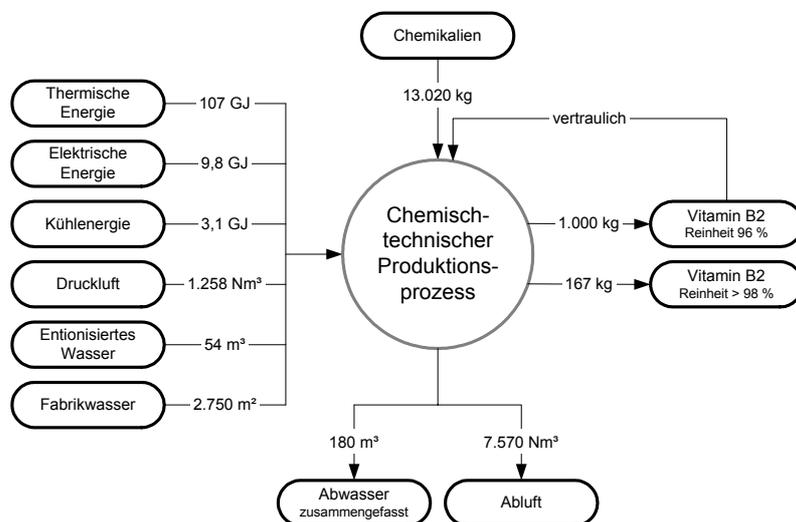


Abbildung 5-12: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den chemisch-technischen Produktionsprozess von Vitamin B2 (Oktober 2000)

Der Wasserverbrauch war für den BIOTECHNISCHEN PROZESS deutlich höher als für den CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS. Das Verhältnis des elektrischen und thermischen

Energiebedarfs verhielt sich erwartungsgemäß: Während der CHEMISCH-TECHNISCHE PROZESS weniger elektrische aber dafür mehr thermische Energie benötigte, war es beim BIOTECHNISCHEN PROZESS umgekehrt. Outputseitig fiel nur beim BIOTECHNISCHEN PROZESS eine relevante Reststoffmenge in Form von Biomasse an. Darüber hinaus war die Abwassermenge fast doppelt so hoch, als die des CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESSES. Dazu ist aber anzumerken, dass der betriebsinterne Parameter „Abwasser ausgedrückt in CSB-Äquivalenten“ für den früheren chemisch-technischen Prozess fast doppelt so hoch war, wie der für den biotechnischen Prozess.

5.1.3.4.3 Biomasseverwertung (Nachkette)

Für die beim BIOTECHNISCHEN PROZESS anfallende und anschließend auf ca. 30 % TS eingedampfte Biomasse wurde als Verwertungsverfahren eine Trockenvergärung angenommen. Die Trockenvergärung unterscheidet sich von der Nassvergärung durch den höheren Anteil an Trockensubstanz (10-15 % TS bei Nass- und 30-40 % TS bei Trockenvergärung) und dem damit einhergehenden reduzierten Bedarf an Reaktorvolumen.

Für das Modell der Biomassevergärung wurde eine einstufige Vergärung angesetzt, die in Würdinger et al. (2002) ausführlich beschrieben ist. Es wurde davon ausgegangen, dass 2/3 der Trockensubstanz der Biomasse in Biogas umgewandelt werden und der verbleibende Gärrest kompostiert und auf ein Feld ausgebracht wird. Abbildung 5-13 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzierungsmodells.

Einstufige Vergärungsanlagen sind dadurch gekennzeichnet, dass Hydrolyse und Methanisierung zusammen in einem Gärreaktor ablaufen. Die Nutzung des Biogases erfolgte im Modell in einem nachgeschalteten Blockheizkraftwerk mit einem Otto-Gas-Motor. Ohne Berücksichtigung des Eigenenergiebedarfs der Anlage liegt der Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks für die Auskopplung von elektrischer Energie bei 33 % und von thermischer Energie bei 56 % bezogen auf den Heizwert des Biogasinputs (ANS, 1995; Bidlingmair und Müsken, 1994; Wiemer et al., 1996). Die nach Abzug des Eigenbedarfs verbliebene elektrische Energie wurde dem Strommix Deutschland sowie die thermische Energie dem thermischen Energieträgermix gutgeschrieben und entsprechend verrechnet (vgl. 5.1.3.4.4).

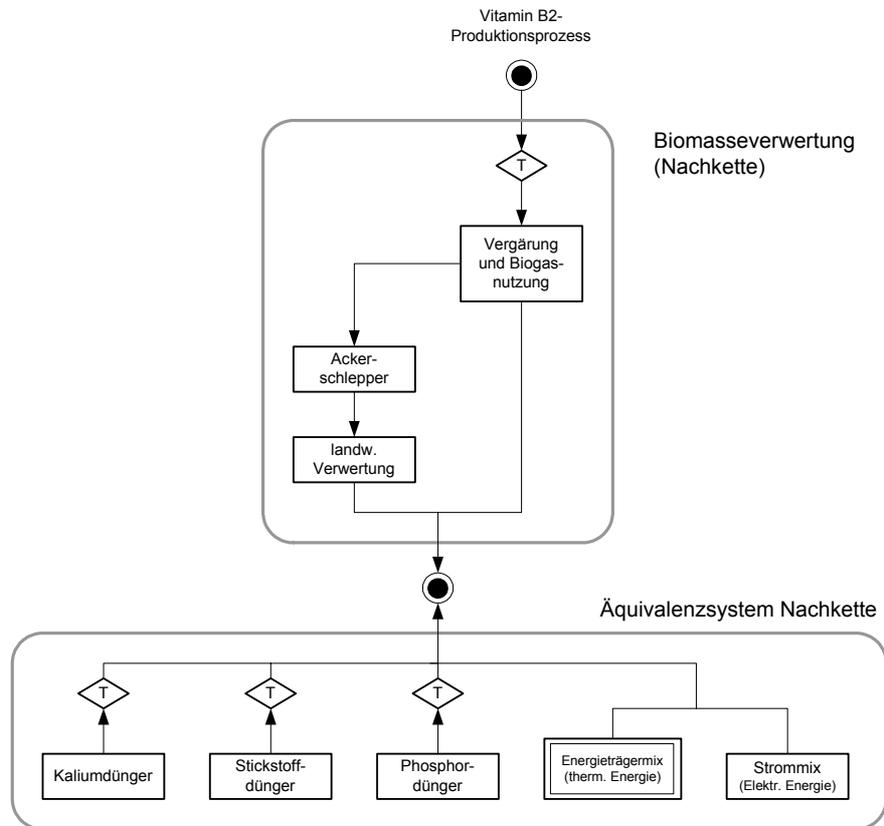


Abbildung 5-13: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Biomasseverwertung* inklusive des nachgelagerten Äquivalenzmodells

Die durch die landwirtschaftliche Verwertung des kompostierten Gärrestes in den Boden gelangenden Nährstoffe wurden ebenfalls als Systemnutzen betrachtet und in einem Äquivalenzsystem verrechnet, in dem synthetisch hergestellte Düngemittel (Handelsdünger) substituiert werden.

5.1.3.4.4 Äquivalenzsysteme

In Tabelle 5-2 sind die Zusatznutzen aus den beiden Szenarien sowie die dadurch substituierten Materialien und Endenergien aus Primärrohstoffen zusammengefasst. Die konventionellen Herstellungs- bzw. Produktionsprozesse zu den aufgeführten Zusatznutzen sind im Anhang (Datenherkunft und -qualität) dokumentiert.

Tabelle 5-2: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen

Zusatznutzen aus dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Energiegutschrift aus der Methanolherstellung ¹⁾	Thermische Energie aus einem Heizwerk Erdgas	1,0
CaO-Dünger aus der Kartoffelstärkeherstellung ¹⁾	Kalkdünger	1,0
K-Dünger aus der Kartoffelstärkeherstellung ¹⁾	Kalium-Dünger	1,0
P ₂ O ₅ -Dünger aus der Kartoffelstärkeherstellung ¹⁾	Phosphor-Dünger	1,0
N-Dünger aus der Kartoffelstärkeherstellung ¹⁾	Stickstoff-Dünger	1,0
Landwirtschaftliche Fläche aus der Landwirtschaft Mais und Kartoffel ¹⁾	Feldarbeiten Grünbrache	1 Einheit pro 10000 m ² Fläche
Ammoniak aus der Barbitursäureherstellung ²⁾	Ammoniak	1,0
Methanol aus der Barbitursäureherstellung ²⁾	Methanol	1,0
Nickelkatalysator aus der AZO-Farbstoff-Herstellung ²⁾	Aufgrund der zu geringen Menge nicht berücksichtigt	-
<hr/>		
Zusatznutzen aus dem Szenario BIO-TECHNISCHER PROZESS	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Landwirtschaftliche Fläche aus der Landwirtschaft Mais ¹⁾	Feldarbeiten Grünbrache	1 Einheit pro 10000 m ² Fläche
K-Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gärreststoffe ³⁾	Kalium-Dünger	1,0
P ₂ O ₅ -Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gärreststoffe ³⁾	Phosphor-Dünger	1,0
N-Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gärreststoffe ³⁾	Stickstoff-Dünger	1,0
Elektrische und thermische Energie aus der Biogasnutzung ³⁾	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschland, thermische Energie aus dem Energieträgermix Deutschland	1,0

¹⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe)

²⁾ Äquivalenzsystem Produktionsprozess (Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess)

³⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Biomasseverwertung)

5.1.3.5 Vergleich der Bilanzierungsergebnisse

5.1.3.5.1 Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle inputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 5-3 neben dem Wasserbedarf die Stoff- und Energieeinsätze zusammengefasst, die für die Auswertung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten inputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Die Werte der Tabelle zeigen, dass der Aufwand an KEA fossil (Energie aus fossilen Energieträgern) beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um fast die Hälfte niedriger ist als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS. Zurückzuführen ist das auf den höheren Bedarf an thermischer Energie des CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESSES, der zum größten Teil aus fossilen Rohstoffen erzeugt wurde. Dagegen wurde für den BIOTECHNISCHEN PROZESS ein größerer KEA Kernkraft (Kernenergie) bilanziert, der aus dem höheren Bedarf an elektrischer Energie, die zu über 30 % in Kernkraftwerken erzeugt wurde, resultiert.

Die Beanspruchung fossiler Rohstoffe unterstreicht das Ergebnis für den Energiebedarf. Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS wird mehr als doppelt so viel Erdgas und Erdöl als beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS benötigt. Dasselbe gilt auch für den Bedarf an Steinkohle, wenn auch mit einem geringeren Unterschied zwischen den beiden Prozessen. Für Braunkohle ist der Bedarf im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS dagegen im Vergleich zum Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS fast doppelt so groß.

Tabelle 5-3: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	BIOTECHNISCHER PROZESS	CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS
<i>Kumulierter Energieaufwand</i>			
KEA fossil	GJ	298	513
KEA regenerativ	GJ	2	1
KEA Kernkraft	GJ	88	69
KEA Wasserkraft	GJ	2	5
KEA sonstige	GJ	0,6	2
KEA solar	GJ	0,14	0,01
<i>Fossile Energieträger</i>			
Erdöl	kg	1.475	3.756
Erdgas	kg	3.167	7.902
Steinkohle	kg	2.107	2.612
Braunkohle	kg	5.707	2.904
<i>Mineralische Rohstoffe</i>			
Bauxit	kg	-	0,33
Kalkstein	kg	396	280
Kaliumchlorid	kg	127	-
Natriumchlorid	kg	2.338	5.501
Rohkali	kg	277	149
Rohphosphat	kg	767	17
Schwefel	kg	256	487
<i>Wasserbedarf</i>			
Kühlwasser	m ³	3.960	1.520
Wasser (Kesselspeise)	m ³	1.000	360
Wasser (Prozess)	m ³	2	95
Wasser, aufbereitet*	m ³	56	59
Wasser, unspezifisch	m ³	4.260	2.990
Grundwasser	m ³	< 1	< 1
<i>Naturraum</i>			
Fläche K5	m ²	- 1.412	- 88
Fläche K6	m ²	14.102	877
Fläche K7	m ²	-	0,002

* entionisiert, entkarbonisiert, entkalkt

Die Beanspruchung mineralischer Ressourcen zeigt, dass im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS zum Teil deutlich mehr Kalkstein, Rohkali, Rohphosphat und Kaliumchlorid benötigt wird, während im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS der Bedarf an Bauxit, Schwefel und Natriumchlorid überwiegt. Dabei ist aber zu beachten, dass bei beiden Prozessen der Bedarf an Natriumchlorid den der anderen Rohstoffe deutlich übertrifft. Er macht beim BIOTECHNISCHEN PROZESS ca. 56 % und beim CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS ca. 86 % der gesamten Beanspruchung mineralischer Ressourcen aus.

Aus der Zusammenfassung des Wasserbedarfs ist zu sehen, dass das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS zum Teil deutlich mehr Kühlwasser und unspezifiziertes Wasser verlangt, wogegen für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS mehr Prozesswasser und aufbereitetes Wasser benötigt wird.

Im folgenden Abschnitt wurde näher auf den Energiebedarf (KEA gesamt) eingegangen. Es sind die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend wurden die signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnisse wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

5.1.3.5.2 KEA gesamt

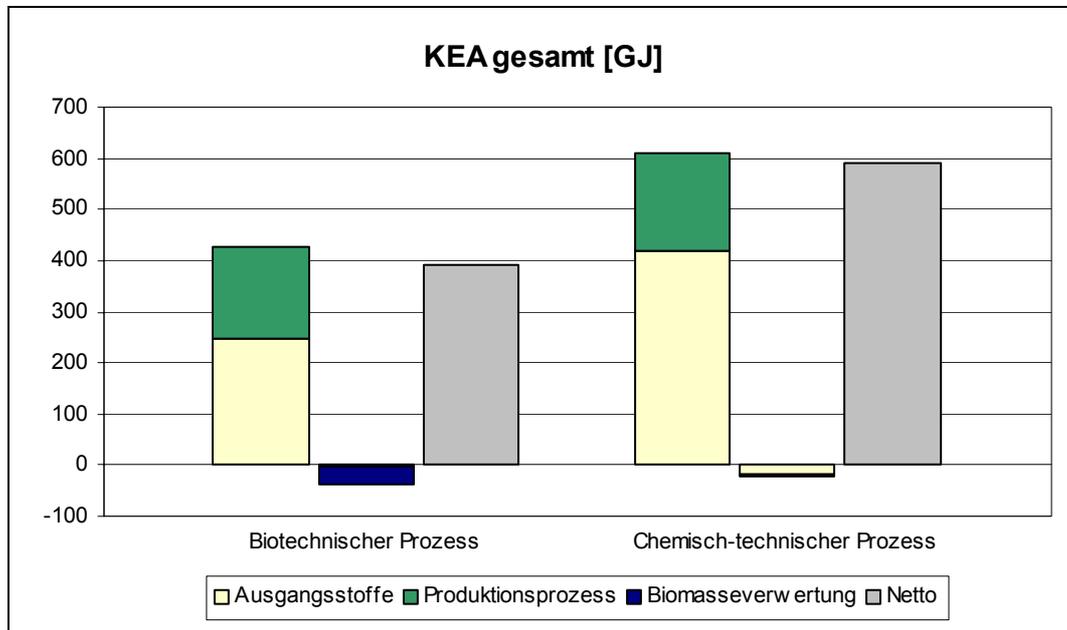


Abbildung 5-14: KEA gesamt¹ - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-14 zeigt, dass der Energieverbrauch im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS etwa 1/3 niedriger ist, als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnis

Bei beiden Szenarien wird das Brutto-Ergebnis überwiegend durch den Energiebedarf für die Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt.

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS sind 58 % des KEA gesamt diesem Teilsystem zuzuschreiben. Einen großen Anteil daran haben die Bereitstellung von Prozessdampf, thermischer und elektrischer Energie sowie die Herstellung von Natronlauge und Chlor. Da der Energiebedarf für das Teilsystem Biomasseverwertung sehr gering ist (der größte Teil wird über das erzeugte Biogas abgedeckt), ist der restliche KEA gesamt fast vollständig dem Vitamin B2-Produktionsprozess zuzuordnen. Dort wird die Energie zum größten Teil für die Bereitstellung elektrischer Energie benötigt.

Tabelle 5-4: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	173 GJ	40 %
Heizwerk Erdgas - thermische Energie ²⁾	47 GJ	11 %
Prozessdampf ²⁾	31 GJ	7 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	29 GJ	7 %
Natronlauge ²⁾	28 GJ	7 %
Chlor ¹⁾	26 GJ	6 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ²⁾	24 GJ	6 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Heizkraftwerk Erdgas/Erdöl - thermische und elektrische Energie ¹⁾	175 GJ	29 %
Natronlauge ²⁾	78 GJ	13 %
Kohlenmonoxid ²⁾	63 GJ	10 %
Chlor ²⁾	53 GJ	9 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	51 GJ	8 %
Energieträgermix - thermische Energie ²⁾	41 GJ	7 %
Methanol ²⁾	41 GJ	7 %

¹⁾ Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess

²⁾ Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sind 69 % des KEA gesamt der Herstellung der Ausgangsstoffe zuzuschreiben. Auch hier haben die Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie sowie die Herstellung von Natronlauge und Chlor einen großen Anteil daran. Daneben trägt hauptsächlich die Herstellung von Kohlenmonoxid und Methanol zum Energiebedarf bei. Der restliche KEA gesamt ist für den Vitamin B2-Produktionsprozess, und dort zum größten Teil für die Bereitstellung von thermischer Energie im standorteigenen Heizwerk, aufzubringen.

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fallen Gutschriften zum größten Teil durch Äquivalenzprozesse an, die sich aus der Biomasseverwertung ergeben. Zum Einen wird durch die Vergärung der Biomasse Biogas und damit Energie erzeugt, wodurch der Bedarf an Primärenergieträgern zur Erzeugung von elektrischer und thermischer

¹ ohne Berücksichtigung von KEA solar

Energie reduziert wird. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Kompostverwertung synthetische Düngemittel substituiert, was sich hauptsächlich in verminderten Aufwendungen für die Herstellung von Stickstoffdünger widerspiegelt. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Herstellung der Ausgangsstoffe, da infolge des Anbaus von Mais keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig sind.

Tabelle 5-5: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des KEA gesamt

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	19 GJ	51 %
Energieträgermix - thermische Energie ¹⁾	15 GJ	39 %
Düngemittel ¹⁾	2 GJ	5 %
Feldarbeiten Grünbrache ²⁾	2 GJ	5 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Heizwerk Erdgas - thermische Energie ²⁾	17 GJ	80 %
Methanol ³⁾	2 GJ	13 %
Ammoniak ³⁾	2 GJ	13 %
Thermische Energie bei der Methanolherstellung ³⁾	0,6 GJ	5 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Biomasseverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe)

³⁾ Äquivalenzsystem Produktionsprozess (Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess)

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS fallen deutlich geringere Gutschriften an. Diese sind zum größten Teil auf Äquivalenzprozesse zurückzuführen, die sich aus der Herstellung der Ausgangsstoffe ergeben. Hauptsächlich Anteil hat daran die Substitution von thermischer Energie infolge einer Energiegutschrift bei der Methanolherstellung. Dort entsteht als Nebenprodukt Purgegas, das zur Bereitstellung von Prozesswärme verbrannt wird, wodurch Aufwendungen für ein Erdgas-Heizwerk eingespart werden. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zum Vitamin B2-Produktionsprozess. Durch die Weiterverwendung von Methanol und Ammoniak aus dem Produktionsprozess werden Aufwendungen vermieden, die bei der konventionellen Herstellung der beiden Stoffe anfallen.

Gutschriften

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 9 % auf einen KEA gesamt von 391 GJ für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 3 % auf einen KEA gesamt von 590 GJ für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Wie Tabelle 5-3 zeigt, wird das Netto-Ergebnis beider Szenarien zum größten Teil durch den KEA fossil sowie zu einem geringeren Anteil durch den KEA Kernkraft bestimmt.

Fazit: Der Energiebedarf für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2-96% und 167 kg Vitamin B2-98% (DSM) ist beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS ca. 34 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.3.5.3 Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle outputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 5-6 neben dem Abfall- und Abwasseraufkommen die Luft- und Wasseremissionen zusammengefasst, die für die Auswertung der UBA-Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Ozonbildung sowie Humantoxikologie und Ökotoxikologie notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten outputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Tabelle 5-6: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	BIOTECHNISCHER PROZESS	CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS
<i>Emissionen in die Luft</i>			
Ammoniak	kg	8,42	1,15
Benzo(a)pyren	mg	6,75	3,42
Benzol	kg	0,051	0,52
Blei	mg	277	161
Cadmium	mg	94,8	34,2
Chlorwasserstoff	kg	0,69	1,83
Dieselpartikel	kg	0,76	0,82
Distickstoffmonoxid	kg	5,96	2,87
Fluorwasserstoff	kg	0,05	0,05
Formaldehyd	kg	0,17	0,12
Kohlendioxid, fossil und unspezifisch	kg	22.423	31.310
Kohlenmonoxid	kg	15,4	41,7
Methan	kg	33,7	63,9
NMVOC	kg	3,32	7,28
NOx	kg	65,3	114
PAH	mg	383	47,2
Perfluormethan	mg	- 0,088	4,8
Schwefeldioxid	kg	53,2	146
Schwefelwasserstoff	mg	60,8	362
Staub	kg	11,7	37,8
VOC	kg	18,1	44,2
<i>Emissionen ins Wasser</i>			
Ammonium	kg	8,16	1,48
AOX	mg	2,36	7.749
Blei	kg	0,0051	0,0026
Chlorid	kg	100	239
Chrom	mg	207	74,6
CSB	kg	70,8	110
Fluorid	mg	2.244	809
Kohlenwasserstoffe, halog.	µg	1,67	0,60
Kohlenwasserstoffe, sonst.	kg	0,001	2,04
Nitrat	kg	20	7,08
P als P2O5	mg	-	436
PAH	µg	0,19	0,070

	Einheit	BIOTECHNISCHER PROZESS	CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS
Phosphorverb. als P	kg	4,99	0,68
Stickstoffverb. als N	kg	0,0005	0,34
Stickstoffverb., unspezifisch	mg	0,00012	14.518
Sulfid	mg	15,1	13,7
Zink	mg	295	109
Zinn	mg	0,73	0,26
<i>Abfallaufkommen</i>			
Abfälle zur Beseitigung	kg	75	439
Abfälle zur Verwertung	kg	294	841
Abfälle ohne Zuordnung	kg	- 3	9
Abraum	kg	52.870	85.350
Kompost auf ein Feld gebracht	kg	3.150	-
<i>Abwasseraufkommen</i>			
Abwasser (Kesselschlammung)	m ³	1000	360
Abwasser (Kühlwasser)	m ³	1.430	607
Abwasser (Prozess)	m ³	0,2	2,5
Abwasser geklärt	m ³	373	238
Abwasser sonstige	m ³	0,04	0,6
Wasserdampf	m ³	2.540	979

Negative Werte: „Einsparung“ durch die Verrechnung von Gutschriften

Die Werte der Tabelle zeigen, dass das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS für fast 2/3 der aufgeführten Luftparameter geringere Emissionen aufweist. Für gut 1/3 der Luftparameter verursacht der BIOTECHNISCHE PROZESS höhere Emissionen, wobei aber die Mehremission für Fluorwasserstoff mit + 10 % gering ausfällt.

Bezogen auf den Stoffeintrag ins Wasser bringt der Vergleich der Emissionswerte ein umgekehrtes Ergebnis. Hier weist das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS für fast 2/3 der aufgeführten Wasserparameter höhere Emissionen auf, wobei aber die Mehremission für Sulfid mit + 10 % gering ausfällt. Für gut 1/3 der Wasserparameter sind die Emissionswerte des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS geringer.

Das Abfallaufkommen ist beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS insgesamt geringer als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS mit der Ausnahme des Kompostes, da dieser beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS nicht anfällt. Für das Abwasseraufkommen bringt der Vergleich ein umgekehrtes Ergebnis. Hier sind die Abwassermengen beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS insgesamt geringer als beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS.

In den folgenden Abschnitten wurde näher auf die oben genannten Wirkungskategorien eingegangen. Es wurden die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend hinsichtlich signifikanter Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

5.1.3.5.4 Treibhauseffekt

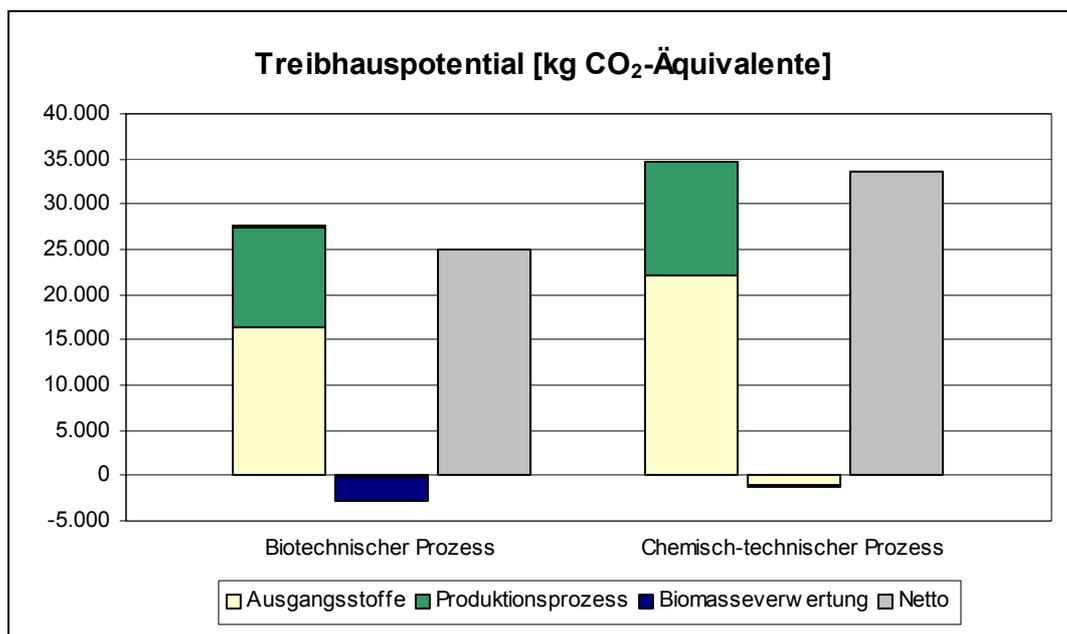


Abbildung 5-15: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-15 zeigt, dass im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS fast 1/3 mehr treibhausrelevante Emissionen entstehen, als im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnis

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien überwiegend durch Emissionen aus der Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt.

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS sind 59 % der CO₂-Äquivalente diesem Teilsystem zuzuordnen. Ein Großteil davon stammt aus dem Maisanbau, der Bereitstellung von Prozessdampf, thermischer und elektrischer Energie sowie der Herstellung von Natronlauge. Auf den Vitamin B2-Produktionsprozess entfallen fast die gesamten restlichen CO₂-Äquivalente. Die Emissionen entstehen dort zum größten Teil bei der Bereitstellung elektrischer Energie. CO₂-Äquivalente aus der Biomasseverwertung haben so gut wie keinen Einfluss auf das Brutto-Ergebnis.

Tabelle 5-7: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	10.646 kg CO ₂ -Äqu.	38 %
Landwirtschaft – Mais ²⁾	2.789 kg CO ₂ -Äqu.	10 %
Heizwerk Erdgas - thermische Energie ²⁾	1.975 kg CO ₂ -Äqu.	7 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	1.815 kg CO ₂ -Äqu.	7 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ²⁾	1.766 kg CO ₂ -Äqu.	6 %
Prozessdampf ²⁾	1.693 kg CO ₂ -Äqu.	6 %
Natronlauge ²⁾	1.577 kg CO ₂ -Äqu.	6 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Heizkraftwerk Erdgas/Erdöl - thermische und elektrische Energie ¹⁾	11.554 kg CO ₂ -Äqu.	33 %
Natronlauge ²⁾	4.380 kg CO ₂ -Äqu.	13 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	3.176 kg CO ₂ -Äqu.	9 %
Energieträgermix - thermische Energie ²⁾	3.112 kg CO ₂ -Äqu.	9 %
Chlor ²⁾	3.107 kg CO ₂ -Äqu.	9 %
Kohlenmonoxid ²⁾	2.463 kg CO ₂ -Äqu.	7 %

¹⁾ Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess

²⁾ Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sind 64 % der CO₂-Äquivalente der Herstellung der Ausgangsstoffe zuzuordnen. Auch hier stammt ein großer Teil aus der Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie sowie der Herstellung von Natronlauge. Daneben trägt hauptsächlich die Herstellung von Chlor und Kohlenmonoxid

zum Treibhauspotential bei. Die restlichen CO₂-Äquivalente kommen aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess, und dort hauptsächlich aus der Bereitstellung thermischer Energie im standorteigenen Heizwerk.

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fallen Gutschriften zum größten Teil durch Äquivalenzprozesse an, die sich aus der die Biomasseverwertung ergeben. Zum Einen wird durch die Vergärung der Biomasse Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Kompostverwertung synthetische Düngemittel substituiert, was sich hauptsächlich in verminderten Emissionen aus der Herstellung von Stickstoffdünger widerspiegelt. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Herstellung der Ausgangsstoffe. Infolge des Anbaus von Mais sind keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig, wodurch Emissionen vermieden werden.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS fallen deutlich geringere Gutschriften an. Diese sind zum größten Teil auf Äquivalenzprozesse zurückzuführen, die sich aus der Herstellung der Ausgangsstoffe ergeben. Hauptsächlich Anteil hat daran die Substitution von thermischer Energie infolge einer Energiegutschrift bei der Methanolherstellung. Dort entsteht als Nebenprodukt Purgegas, das zur Bereitstellung von Prozesswärme verbrannt wird, wodurch Emissionen aus einem Erdgas-Heizwerk eingespart werden. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zum Vitamin B2-Produktionsprozess. Durch die Weiterverwendung Ammoniak aus dem Produktionsprozess werden Emissionen vermieden, die bei der konventionellen Herstellung des Stoffes anfallen.

Tabelle 5-8: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Treibhauspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	1.184 kg CO ₂ -Äqu.	44 %
Energieträgermix - thermische Energie ¹⁾	1,123 kg CO ₂ -Äqu.	42 %
Düngemittel ¹⁾	237 kg CO ₂ -Äqu.	9 %
Feldarbeiten Grünbrache ³⁾	158 kg CO ₂ -Äqu.	6 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Heizwerk Erdgas - thermische Energie ³⁾	969 kg CO ₂ -Äqu.	84 %
Ammoniak ²⁾	94 kg CO ₂ -Äqu.	8 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Biomasseverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Produktionsprozess (Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess)

³⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 10 % auf ein Treibhauspotential von 25.034 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 3 % auf ein Treibhauspotential von 33.543 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Das Netto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien im Wesentlichen durch Kohlendioxidemissionen gebildet. Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS ist der Anteil 90 % und beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS 93 %. Die restlichen CO₂-Äquivalente verteilen sich auf Methan- und Distickstoffmonoxidemissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2-96% und 167 kg Vitamin B2-98% (DSM) ist die Emission an CO₂-Äquivalenten beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 25 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.3.5.5 Versauerung

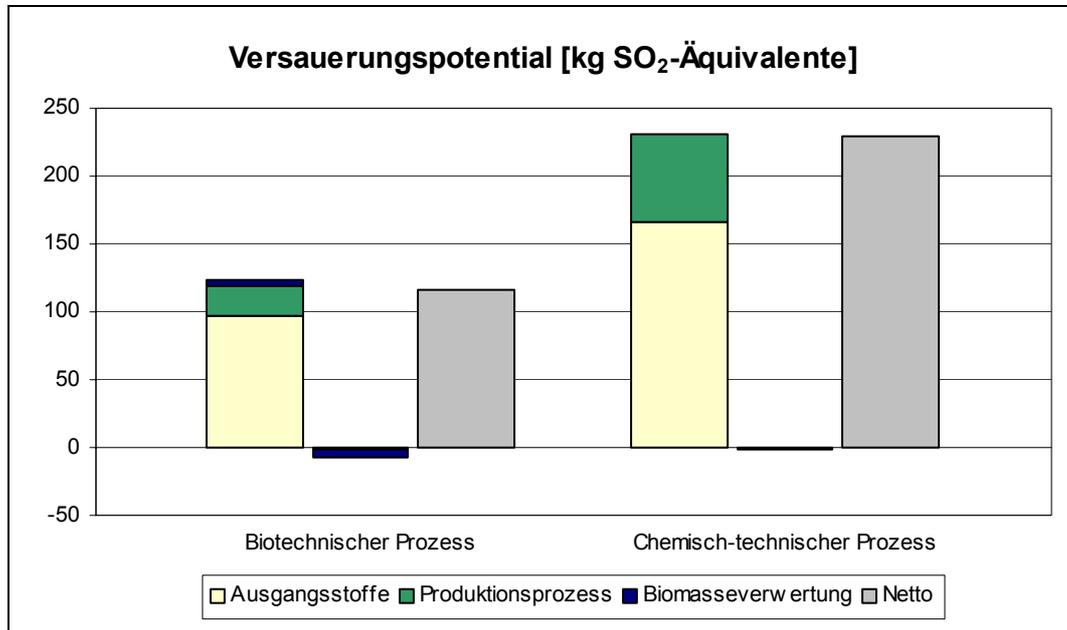


Abbildung 5-16: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-16 zeigt, dass das Versauerungspotential beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS mehr als doppelt so groß ist, als beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnis

Bei beiden Szenarien wird das Brutto-Ergebnis hauptsächlich durch Emissionen aus der Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt.

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS stammen 79 % der SO₂-Äquivalente aus diesem Teilsystem. Großen Anteil haben daran der Maisanbau sowie die Herstellung von Natronlauge und Chlor. 4 % der SO₂-Äquivalente kommen aus der Biomasseverwertung sowie der Rest aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess. Dort resultiert der größte Teil der Emissionen aus der Bereitstellung elektrischer Energie.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS stammen 72 % der SO₂-Äquivalente aus der Herstellung der Ausgangsstoffe. Auch hier haben die Herstellung von Natronlauge und Chlor einen großen Anteil daran. Die restlichen SO₂-Äquivalente entfallen

auf dem Vitamin B2-Produktionsprozess, und kommen dort fast ausschließlich aus der Bereitstellung thermischer Energie im standorteigenen Heizwerk.

Tabelle 5-9: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Landwirtschaft - Mais ¹⁾	21,6 kg SO ₂ -Äqu.	18 %
Natronlauge ¹⁾	21,4 kg SO ₂ -Äqu.	17 %
Chlor ¹⁾	21,2 kg SO ₂ -Äqu.	17 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	18,6 kg SO ₂ -Äqu.	15 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Heizkraftwerk Erdgas/Erdöl - thermische und elektrische Energie ²⁾	62,2 kg SO ₂ -Äqu.	27 %
Natronlauge ¹⁾	59,3 kg SO ₂ -Äqu.	26 %
Chlor ¹⁾	43,8 kg SO ₂ -Äqu.	19 %

¹⁾ Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe

²⁾ Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fallen Gutschriften zum größten Teil durch Äquivalenzprozesse an, die sich aus der Biomasseverwertung ergeben. Zum Einen wird durch die Vergärung der Biomasse Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Kompostverwertung synthetische Düngemittel substituiert, was sich hauptsächlich in verminderten Emissionen aus der Herstellung von Stickstoffdünger widerspiegelt. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Herstellung der Ausgangsstoffe. Infolge des Anbaus von Mais sind keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig, wodurch Emissionen vermieden werden.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS unterscheiden sich die Brutto- und Netto-Ergebnisse nur unwesentlich voneinander, da nur geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-16).

Tabelle 5-10: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Versauerungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Energieträgermix - thermische Energie ¹⁾	3,3 kg CO ₂ -Äqu.	43 %
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	2,1 kg CO ₂ -Äqu.	27 %
Feldarbeiten Grünbrache ²⁾	1,2 kg CO ₂ -Äqu.	16 %
Düngemittel ¹⁾	1,1 kg CO ₂ -Äqu.	14 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Biomasseverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 6 % auf ein Versauerungspotential von 115 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- weniger als 1 % auf ein Versauerungspotential von 229 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Die SO₂-Äquivalente des Netto-Ergebnisses werden beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS zu 98 % durch Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen verursacht. Auch beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS resultiert der größte Teil des Netto-Ergebnisses aus Emissionen dieser beiden Parameter (86 %). Daneben tragen aber auch Ammoniakemissionen, aus denen fast die gesamten restlichen SO₂-Äquivalente gebildet werden, wesentlich zum Netto-Ergebnis bei (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2-96% und 167 kg Vitamin B2-98% (DSM) ist die Emission an SO₂-Äquivalenten beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 50 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.3.5.6 Terrestrische Eutrophierung

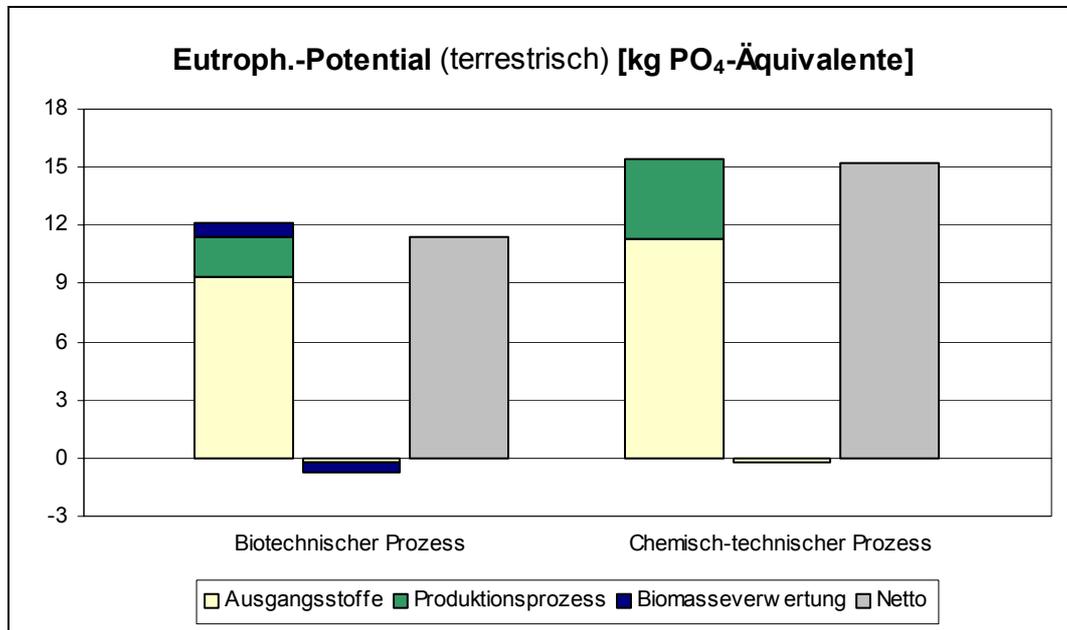


Abbildung 5-17: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-17 zeigt, dass das terrestrische Eutrophierungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fast 1/3 niedriger ist, als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnis

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien hauptsächlich durch Emissionen aus der Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt.

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS sind 77 % der PO₄-Äquivalente diesem Teilsystem zuzuordnen. Ein Großteil davon stammt aus dem Maisanbau, der Herstellung von Natronlauge und Chlor sowie dem Transport von Glukosesirup vom Hersteller zum Produktionsstandort. 6 % der PO₄-Äquivalente entstehen bei der Biomasseverwertung und die restlichen 17 % entfallen auf den Vitamin B2-Produktionsprozess. Dort resultiert die Emissionen fast ausschließlich aus der Bereitstellung elektrischer Energie.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sind 74 % der PO₄-Äquivalente der Herstellung der Ausgangsstoffe zuzuordnen. Auch hier stammt ein großer Teil aus der Herstellung von Natronlauge und Chlor. Die restlichen PO₄-Äquivalente entfallen auf dem Vitamin B2-Produktionsprozess, und kommen dort zum größten Teil aus der Bereitstellung thermischer Energie im standorteigenen Heizwerk.

Tabelle 5-11: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Landwirtschaft - Mais ¹⁾	3,6 kg PO ₄ -Äqu.	29 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	1,9 kg PO ₄ -Äqu.	16 %
Natronlauge ¹⁾	1,3 kg PO ₄ -Äqu.	11 %
Chlor ¹⁾	1,1 kg PO ₄ -Äqu.	9 %
Transport Glukosesirup ¹⁾	0,8 kg PO ₄ -Äqu.	7 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Heizkraftwerk Erdgas/Erdöl - thermische und elektrische Energie ²⁾	3,9 kg PO ₄ -Äqu.	25 %
Natronlauge ¹⁾	3,7 kg PO ₄ -Äqu.	24 %
Chlor ¹⁾	2,3 kg PO ₄ -Äqu.	15 %

¹⁾ Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe

²⁾ Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fallen Gutschriften zum größten Teil durch Äquivalenzprozesse an, die sich aus der die Biomasseverwertung ergeben. Zum Einen wird durch die Vergärung der Biomasse Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Kompostverwertung synthetische Düngemittel substituiert, was sich hauptsächlich in verminderten Emissionen aus der Herstellung von Stickstoffdünger widerspiegelt. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Herstellung der Ausgangsstoffe. Infolge des Anbaus von Mais sind keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig, wodurch Emissionen vermieden werden.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS unterscheiden sich die Brutto- und Netto-Ergebnisse nur unwesentlich voneinander, da nur geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-17).

Tabelle 5-12: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des terrestrischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Energieträgermix - thermische Energie ¹⁾	0,23 kg PO ₄ -Äqu.	43 %
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	0,21 kg PO ₄ -Äqu.	27 %
Feldarbeiten Grünbrache ²⁾	0,20 kg PO ₄ -Äqu.	16 %
Düngemittel ¹⁾	0,14 kg PO ₄ -Äqu.	14 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Biomasseverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 6 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von 11 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 2 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von 15 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Das Netto-Ergebnis resultiert bei beiden Szenarien überwiegend aus Stickoxidemissionen. Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS ist der Anteil 74 % und beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS 97 %. Die restlichen PO₄-Äquivalente sind auf Ammoniakemissionen zurückzuführen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2-96% und 167 kg Vitamin B2-98% (DSM) ist das terrestrische Eutrophierungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 25 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.3.5.7 Aquatische Eutrophierung

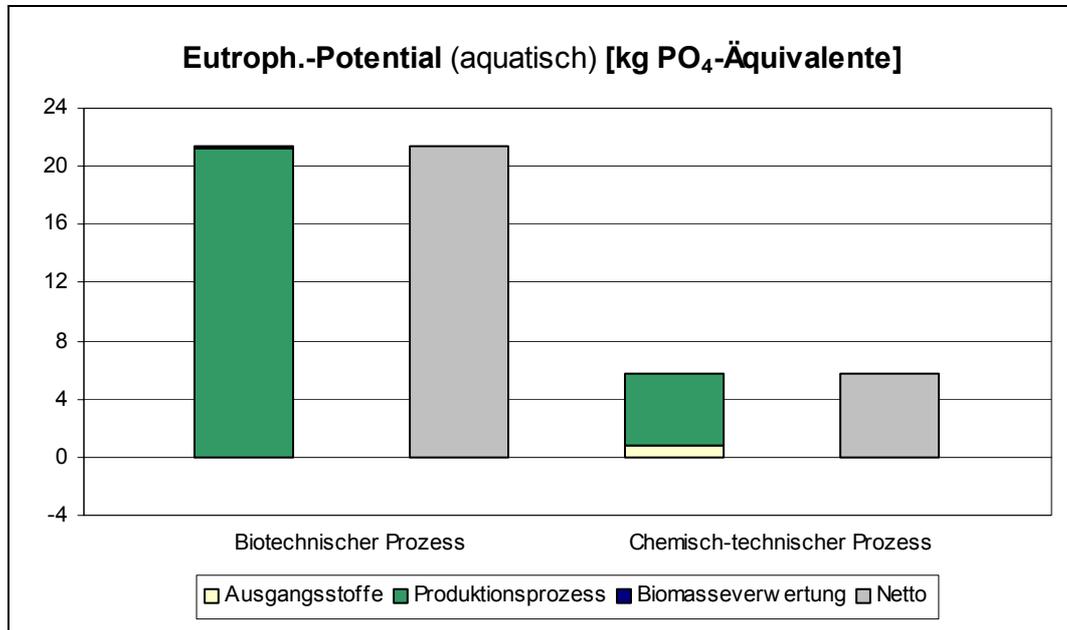


Abbildung 5-18: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-18 zeigt, dass das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS mehr als dreimal so groß ist, als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnis

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien im Wesentlichen durch Emissionen aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess bestimmt.

Beim BIOTECHNISCHEN PROZESS kommen 99 % der PO₄-Äquivalente aus diesem Teilsystem. Sie sind dort fast ausschließlich auf die Abwasserbehandlung in der standort-eigenen Kläranlage zurückzuführen. Die restlichen 1 % der PO₄-Äquivalente entfallen auf die Biomasseverwertung.

Beim CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS stammen 85 % der PO₄-Äquivalente aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess und auch dort fast ausschließlich aus der Abwasserbehandlung in der standort-eigenen Kläranlage. Die restlichen PO₄-Äquivalente entfal-

len auf die Herstellung der Ausgangsstoffe, wozu am meisten die Herstellung von Maniocastärke beiträgt.

Tabelle 5-13: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des aquatischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Abwasserbehandlung – Kläranlage ¹⁾	21,2 kg PO ₄ -Äqu.	99 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Abwasserbehandlung – Kläranlage ¹⁾	4,9 kg PO ₄ -Äqu.	85 %
Maniocastärke ²⁾	0,5 kg PO ₄ -Äqu.	7 %

¹⁾ Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess

²⁾ Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-18).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf ein aquatisches Eutrophierungspotential von

- 21 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 6 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Das Netto-Ergebnis des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS resultiert zum größten Teil (71 %) aus Emissionen an Phosphorverbindungen. Zu den restlichen PO₄-Äquivalente tragen überwiegend der CSB sowie Nitrat- und Ammoniumemissionen bei. Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS basieren die PO₄-Äquivalente neben Emissionen an Phosphorverbindungen (36 %) hauptsächlich auch auf dem CSB (42 %). Die restlichen PO₄-Äquivalente teilen sich auf Nitrat- und Ammoniumemissionen auf (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2-96% und 167 kg Vitamin B2-98% (DSM) ist das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 269 % größer als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

An dieser Stelle muss aber noch einmal darauf hingewiesen werden, dass bei beiden Szenarien die Ergebnisse für den Produktionsprozess, der für diese Wirkungskategorie entscheidend ist, ausschließlich auf Modellannahmen für Abwasserparameter beruhen, die aus Abwasserberichten abgeschätzt worden sind.

5.1.3.5.8 Ozonbildung

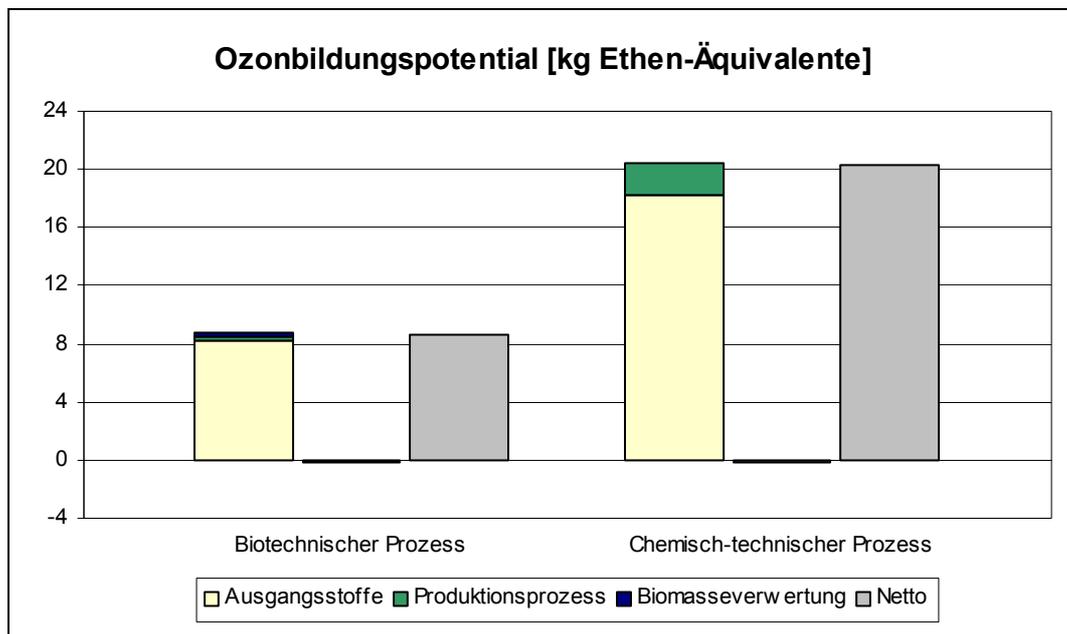


Abbildung 5-19: Photochemische Oxidantienbildung - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-19 zeigt, dass das Ozonbildungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fast dreimal niedriger ist, als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnisse

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien zum größten Teil durch Emissionen aus der Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt.

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS stammen 93 % der Ethen-Äquivalente aus diesem Teilsystem. Der überwiegende Teil kann davon der Herstellung von Natronlau-

ge, Chlor und Kalilauge zugeordnet werden. 4 % der Ethen-Äquivalente entstehen beim Vitamin B2-Produktionsprozess und die restlichen entfallen auf die Biomasseverwertung.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS entstehen 89 % der Ethen-Äquivalente bei der Herstellung der Ausgangsstoffe. Auch hier stammt der größte Teil davon aus der Herstellung von Natronlauge und Chlor. Die restlichen Ethen-Äquivalente entfallen auf dem Vitamin B2-Produktionsprozess, und kommen dort fast ausschließlich aus der Bereitstellung thermischer Energie im standorteigenen Heizwerk.

Tabelle 5-14: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Ozonbildungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS</i>		
Natronlauge ¹⁾	3,5 kg Ethen-Äqu.	39 %
Chlor ¹⁾	2,8 kg Ethen-Äqu.	32 %
Kalilauge ¹⁾	0,5 kg Ethen-Äqu.	6 %
<i>Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS</i>		
Natronlauge ¹⁾	9,6 kg Ethen-Äqu.	47 %
Chlor ¹⁾	5,8 kg Ethen-Äqu.	28 %
Heizkraftwerk Erdgas/Erdöl - thermische und elektrische Energie ²⁾	2,2 kg Ethen-Äqu.	11 %

¹⁾ Teilsystem Herstellung der Ausgangsstoffe

²⁾ Teilsystem Vitamin B2-Produktionsprozess

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander, da nur geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-19).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 2 % auf ein Ozonbildungspotential von 9 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- weniger als 1 % auf ein Ozonbildungspotential von 20 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Das Netto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien hauptsächlich durch VOC-Emissionen gebildet. Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS ist der Anteil 80 % und beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS 82 %. Die restlichen Ethen-Äquivalente resultieren größtenteils aus NMVOC-Emissionen sowie zu einem geringeren Anteil aus Methanemissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2-96% und 167 kg Vitamin B2-98% (DSM) ist die Emission an Ethen-Äquivalenten beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 58 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.3.5.9 Humantoxizität

Stellvertretend für die ausgewählten humantoxisch eingestuft Parameter sind in Abbildung 5-20 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Cadmium und Schwefeldioxid dargestellt.

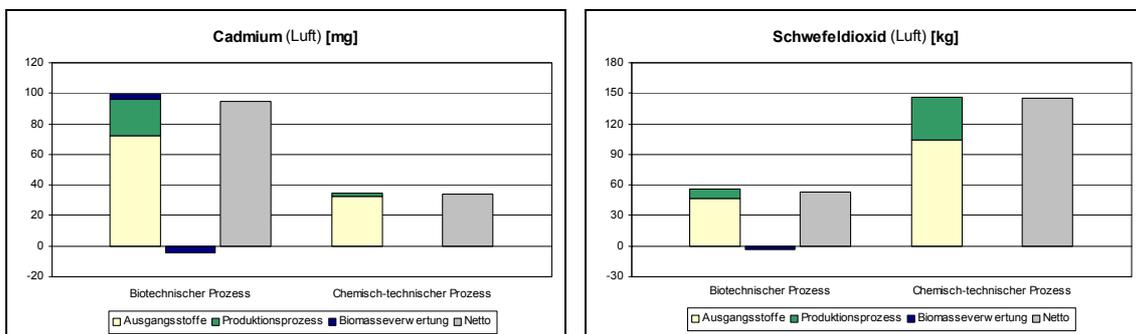


Abbildung 5-20: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Die Abbildung zeigt, dass das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS zum Einen für Cadmium etwa dreimal höhere und zum Anderen für Schwefeldioxid etwa dreimal niedrigere Emissionen verursacht, als das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnisse

Mit einer Ausnahme werden für die fünf untersuchten Parameter Benzo(a)pyren, Blei, Cadmium, Schwefeldioxid und Staub die Brutto-Ergebnisse im Wesentlichen durch

Emissionen aus der Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt (zwischen 71 % und 99 %). Während beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS die gesamten restlichen Emissionen auf dem Vitamin B2-Produktionsprozess entfallen, kommen beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS bis zu 5 % auch aus der Biomasseverwertung. Die Ausnahme bildet Blei beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS. Für diesen Parameter stammen 85 % der Emissionen aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess und der Rest aus der Herstellung der Ausgangsstoffe.

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS reduziert die Verrechnung von Gutschriften die Brutto-Ergebnisse zwischen 3 % für Staub und 10 % für Blei. Bis auf Benzo(a)pyren fällt der größte Teil der Gutschriften durch Äquivalenzprozesse an, die sich aus der die Biomasseverwertung ergeben. Bei Benzo(a)pyren ist dagegen hauptsächlich das Äquivalenzsystem zur Herstellung der Ausgangsstoffe verantwortlich.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS fällt für Benzo(a)pyren eine Gutschrift in Höhe von 7 % des Brutto-Ergebnisses an, die aus dem Äquivalenzsystem zum Vitamin B2-Produktionsprozess resultiert. Für alle anderen Parameter sind die Gutschriften aufgrund ihrer geringen Höhe vernachlässigbar.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-6 dargestellt. In Tabelle 5-15 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-15: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Benzo(a)pyren	Belastung	+ 3,3 mg	+ 97 %
Blei	Belastung	+ 116 mg	+ 72 %
Cadmium	Belastung	+ 61 mg	+ 177 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 92 kg	- 63 %
Staub	Entlastung	- 26 kg	- 69 %

Fazit: Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wurden für die humantoxisch eingestufte Parameter Benzo(a)pyren, Blei und Cadmium höhere bzw. für Schwefeldioxid und Staub niedrigere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS berechnet.

5.1.3.5.10 Ökotoxizität

5.1.3.5.10.1 Luftemissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestufte Parameter (Luftemissionen) sind in Abbildung 5-21 die Bruttobeiträge der Teilsysteme und Gutschriften sowie das Netto-Ergebnis für Ammoniak und Stickoxide dargestellt.

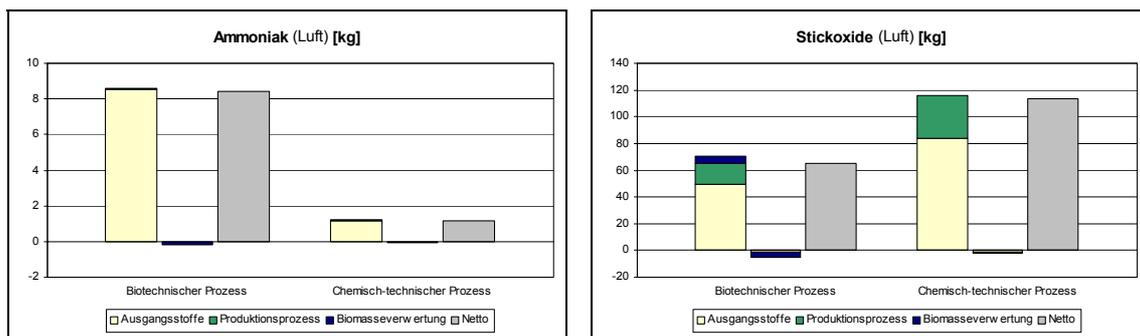


Abbildung 5-21: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxiden - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Die Abbildung zeigt, dass das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS zum Einen für Ammoniak mehr als siebenmal höhere und zum Anderen für Stickoxide etwa die Hälfte niedrigere Emissionen verursacht, als das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnisse

Mit einer Ausnahme werden für die fünf untersuchten Parameter Ammoniak, Fluorwasserstoff, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Stickoxide die Brutto-Ergebnisse im Wesentlichen durch Emissionen aus der Herstellung der Ausgangsstoffe bestimmt (zwischen 70 % und 99 %). Während beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS die gesamten restlichen Emissionen auf dem Vitamin B2-Produktionsprozess entfallen,

kommen beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS bis zu 17 % auch aus der Biomasseverwertung. Die Ausnahme bildet Fluorwasserstoff beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS. Für diesen Parameter stammen 70 % der Emissionen aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess. Der Rest verteilt sich zu fast gleichen Anteilen auf die beiden anderen Teilsysteme.

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS reduziert die Verrechnung von Gutschriften die Brutto-Ergebnisse zwischen 2 % für Ammoniak und 21 % für Fluorwasserstoff. Der größte Teil der Gutschriften fällt dabei durch Äquivalenzprozesse an, die sich aus der Biomasseverwertung ergeben.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS fallen für Ammoniak und Schwefelwasserstoff Gutschriften in Höhe von 4 % und 9 % der Brutto-Ergebnisse an. Während bei Ammoniak die Gutschrift überwiegend aus dem Äquivalenzsystem zum Vitamin B2-Produktionsprozess resultiert, stammt sie bei Schwefelwasserstoff zum größten Teil aus dem Äquivalenzsystem zur Herstellung der Ausgangsstoffe. Für alle anderen Parameter sind die Gutschriften aufgrund ihrer geringen Höhe vernachlässigbar.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-6 dargestellt. In Tabelle 5-16 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-16: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammoniak	Belastung	+ 7,3 kg	+ 631 %
Fluorwasserstoff	Belastung	+ 4,6 mg	+ 10 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 92 kg	- 63 %
Schwefelwasserstoff	Entlastung	- 301 mg	- 83 %
Stickoxide	Entlastung	- 48 kg	- 43 %

Fazit: Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wurden für die als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Luftemissionen) Ammoniak und Fluorwasser höhere bzw. für Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Stickoxide niedrigere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS berechnet, wobei für Fluorwasserstoff die Mehremission mit + 10 % gering ausfällt.

5.1.3.5.10.2 Wasseremissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Wasseremissionen) sind in Abbildung 5-21 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Ammonium und Chlorid dargestellt.

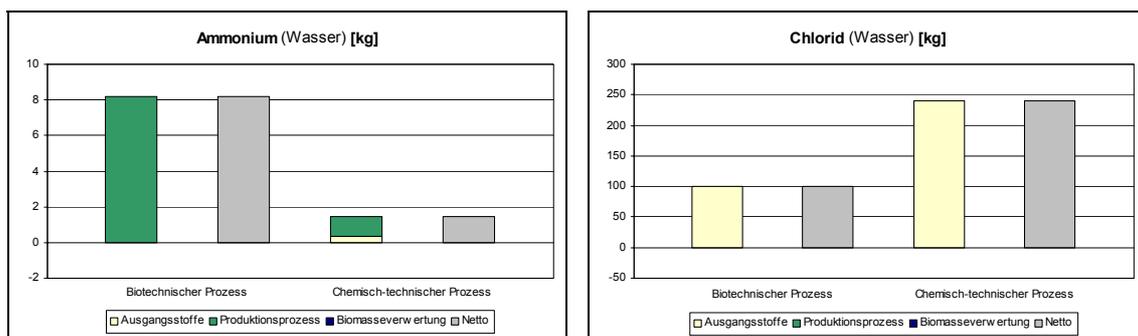


Abbildung 5-22: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Die Abbildung zeigt, dass das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS zum Einen für Ammonium mehr als fünfmal höhere und zum Anderen für Chlorid fast dreimal niedrigere Emissionen verursacht, als das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Brutto-Ergebnisse

Beim BIOTECHNISCHEN PROZESS werden die Brutto-Ergebnisse der vier untersuchten Parameter durch unterschiedliche Teilsysteme bestimmt. Während für AOX und die Kohlenwasserstoffe die Emissionen mit 85 % und 99 % hauptsächlich aus dem Vitamin B2-Produktionsprozess stammen, kommen fast alle Emissionen (jeweils 99 %) für Ammonium aus der Biomasseverwertung und für Chlorid aus der Herstellung der Ausgangsstoffe.

Beim CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS ist der größte Teil der Emissionen für Ammonium und AOX mit 79 % und 99 % dem Vitamin B2-Produktionsprozess zuzuschreiben. Für Chlorid und die Kohlenwasserstoffe entstehen die Emissionen fast ausschließlich (jeweils 99 %) bei der Herstellung der Ausgangsstoffe.

Gutschriften

Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fällt für AOX eine Gutschrift in Höhe von 10 % des Brutto-Ergebnisses, die aus dem Äquivalenzsystem zur Biomasseverwertung resultiert, an. Für alle anderen Parameter sind die Gutschriften aufgrund ihrer geringen Höhe vernachlässigbar.

Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sind die Brutto- und Netto-Ergebnisse fast identisch, da so gut wie keine Gutschriften anfallen.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-6 dargestellt. In Tabelle 5-17 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-17: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammonium	Belastung	+ 6,7 kg	+ 451 %
AOX	Entlastung	- 7,7 g	- 99,9 %
Chlorid	Entlastung	- 139 kg	- 58 %
Kohlenwasserstoffe	Entlastung	- 2,0 kg	- 99,9 %

Fazit: Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wurden für den als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter (Wasseremissionen) Ammonium höhere bzw. für AOX, Chlorid und Kohlenwasserstoffe niedrigere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS berechnet.

5.1.3.6 Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Die Ergebnisse der vergleichenden Auswertung der Vitamin B2-Produktion bei der DSM Nutritional Products (vormals Roche Vitamine GmbH) durch die Szenarien BIOTECHNISCHER PROZESS und CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sind in Tabelle 5-18 noch einmal zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte für die hier betrachtete funktionelle Einheit (**Produktion von 1.000 kg Vitamin B2**) berechnet und bei der nachfolgenden Diskussion berücksichtigt.

Die Tabelle zeigt, dass beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCHER PROZESS für die aggregierten Wirkungskategorien kumulierter Energieaufwand (KEA-Ressourcenbeanspruchung), Treibhaus-, Versauerungs-, terrestrisches Eutrophierungs- und Ozonbildungspotential deutliche Umweltentlastungen ermittelt wurden. Das aquatische Eutrophierungspotential war beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS allerdings um 2,8 Einwohnerwerte höher als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Bei den als humantoxisch eingestuft und ausgewerteten 5 Einzelstoffen ergab der Vergleich für die Parameter Benzo(a)pyren und Blei nur geringfügige Unterschiede bei einem geringen Belastungsniveau. Die relativ geringen Cadmiumemissionen waren beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um 0,45 Einwohnerwerte höher als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS. Bei den in relevanten Mengen emittierten Schwefeldioxid und Staub ergab der Vergleich für die Anwendung des biotechnischen Verfahrens eine ausgeprägte Umweltentlastung.

Bei den als ökotoxisch eingestuft und ausgewerteten 9 Einzelstoffen dokumentieren die Daten des biotechnischen Verfahrens bei 6 Parametern (Schwefeldioxid (L); Schwefelwasserstoff (L); Stickoxide (L); AOX (W); Chlorid (W); Kohlenwasserstoffe (W)) z.T. deutliche Umweltentlastungen im Vergleich zum chemisch-technischen Verfahren. Bei 2 Parametern (Ammoniak (L); Ammonium (W)) ergaben sich für den biotechnischen Prozess höhere Emissionswerte und bei einem Parameter (Fluorwasserstoff (L)) lagen die Emissionen bei beiden Verfahren auf einem niedrigen Niveau.

Tabelle 5-18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

	Einheit	Biotechnischer Prozess	Chemisch-technischer Prozess	Biotechnischer Prozess	Chemisch-technischer Prozess	Differenz (Bio. - Chem.)
		Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	391	590	2,24	3,38	-1,14
Treibhauspotential	Mg CO ₂ -Äq.	25,0	33,5	2,12	2,84	-0,72
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	115	229	2,84	5,63	-2,79
Eutrophierungspotential (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	11,4	15,2	2,19	2,91	-0,73
Eutrophierungspotential (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	21,4	5,8	3,85	1,04	2,81
Ozonbildungspotential (POCP)	kg Eth-Äq.	8,6	20,3	0,99	2,35	-1,36
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren (L)	g	0,0067	0,0034	0,04	0,02	0,02
Blei (L)	g	0,28	0,16	0,04	0,02	0,02
Cadmium (L)	g	0,095	0,034	0,71	0,26	0,45
Schwefeldioxid (L)	kg	53,2	145,56	5,51	15,1	-9,55
Staub (L)	kg	11,7	37,7	3,73	12,0	-8,25
Ökotoxische Einzelstoffe						
Ammoniak (L)	kg	8,42	1,15	1,11	0,15	0,96
Fluorwasserstoff (L)	kg	0,05	0,05	0,03	0,03	0,00
Schwefeldioxid (L)	kg	53,2	146	5,51	15,1	-9,55
Schwefelwasserstoff (L)	g	0,061	0,36	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	65,3	114	3,36	5,85	-2,49
Ammonium (W)	kg	8,16	1,48	2,92	0,53	2,39
AOX (W)	g	0,0024	7,75	0,000045	0,15	-0,15
Chlorid (W)	kg	100	239	--	--	--
Kohlenwasserstoffe (W)	kg	0,001	2,04	0,01	39,3	-39,25

An dieser Stelle muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse zu den Stoffeinträgen in das aquatische System zum größten Teil auf Modellannahmen für Abwasserparameter des Vitamin B2-Produktionsprozesses beruhen, die aus Abwasserberichten abgeschätzt wurden.

Außerdem weisen wir ausdrücklich darauf hin, dass die Einzelergebnisse nur einen Vergleich der hier ausgewerteten Verfahren erlauben. Aufgrund anderer Rahmenbedingungen bei der Bilanzierung ist insbesondere der Vergleich der Einzeldaten mit den Einzeldaten des Verfahrensvergleichs der BASF AG unzulässig.

5.1.4 Vitamin B2-Produktion der BASF AG

5.1.4.1 Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien

Seit 1990 stellt die BASF AG Vitamin B2 in einem biotechnischen Prozess her. Im Unterschied zum Verfahren der DSM Nutritional Products nutzt die BASF AG eine Mutante des Pilzes *Ashbya gossypii*, dessen Stoffwechsel hinsichtlich der Überproduktion von Vitamin B2 optimiert worden ist. Da hohe Ausbeuten von > 15 g/L bevorzugt beim Einsatz von Pflanzenölen als Substrat erhalten werden, werden für die Vitamin B2-Produktion Pflanzenöle auf Sojabasis genutzt (Özbas u. Kutsal, 1986; Monschau et al., 1999; Maeting et al., 2001). Auch bei der BASF hat das biotechnische Verfahren das chemisch-technische Verfahren verdrängt, das weitgehend analog zum oben beschriebenen Prozess der DSM Nutritional Products betrieben worden war, weshalb an dieser Stelle nicht noch einmal näher darauf eingegangen werden muss.

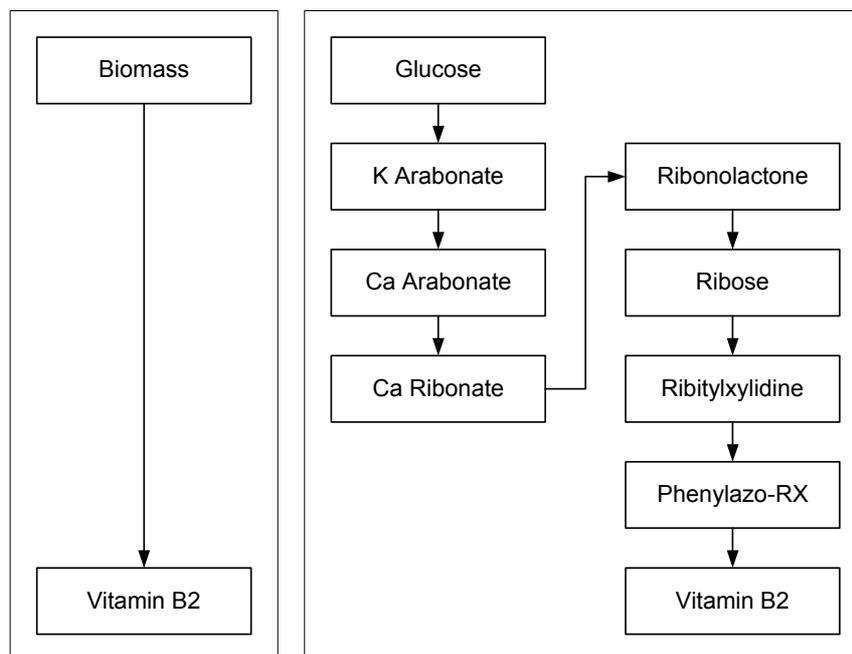


Abbildung 5-23: Schema der Systemgrenzen für die biotechnische (links) und chemisch-technische (rechts) Vitamin B2-Produktion bei der BASF AG in der konzerneigenen Ökoeffizienzanalyse

BASF hat die chemische und die biotechnische Vitamin B2-Produktion bereits im Rahmen einer konzerneigenen Ökoeffizienzanalyse nach BASF-Methode aus- und bewertet (Bollschweiler, 2002; Saling, 2002). Die dafür ermittelten Daten wurden für dieses Vorhaben, aggregiert für verschiedene Prozessschritte, zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund musste die Systemgrenze der Ökoeffizienzanalyse (vgl. Abbildung 5-23) auch den Bilanzierungsmodellen der beiden Szenarien BIOTECHNISCHER PROZESS und CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS entsprechen. Das Bilanzierungsmodell ist in Abbildung 5-23 dargestellt. Die Prozessschritte sind in Abbildung 5-24 enthalten.

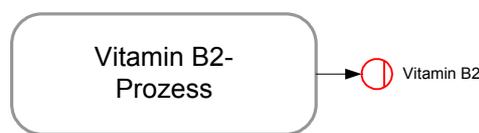


Abbildung 5-25: Bilanzierungsmodell für die Szenarien BIOTECHNISCHER PROZESS und CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Die BASF verbessert laufend ihre Verfahren. Daher ist auch die entsprechende Ökobilanzierung einem steten Wandel unterworfen und an verschiedenen Stellen veröffentlichte Zahlen können Schwankungen unterliegen. Das Verfahren zum Vitamin B2 wurde ebenfalls verschiedenen Optimierungsprozessen unterzogen. Im Rahmen einer Veröffentlichung "White Biotechnology: Gateway to a More Sustainable Future" wurden im April 2003 neue Daten zu diesem Prozess veröffentlicht. Die Veröffentlichung entstand unter der Leitung von EuropaBio in Brüssel (Saling, 2004; mündl. Mitteilung).

Leider war die Bearbeitung dieses Vorhabens schon so weit fortgeschritten, dass es nicht möglich war, die neuen Daten zum Vitamin B2-Prozess der BASF AG zu berücksichtigen.

5.1.4.2 Funktionelle Einheit

Bezugnehmend auf Saling (2002) wurde davon ausgegangen, dass der Datensatz, der von der BASF AG zur Verfügung gestellt wurde, die Produktion von 100 kg Vitamin B2 beinhaltet. Mit einer linearen Umrechnung der Daten konnte als funktionelle Einheit die Produktion von **1.000 kg Vitamin B2** gewählt werden.

5.1.4.3 Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze

Da für diesen Verfahrensvergleich lediglich aggregierte Daten der BASF AG verwendet wurden, die vor- und nachgelagerten Prozesse oder eine Verrechnung von Gutschriften nicht notwendig machten, griffen die im Abschnitt 4 beschriebenen Systemgrenzen und Annahmen nicht.

Alle von BASF zur Verfügung gestellten Daten flossen in das Modell ohne Berücksichtigung von Abschneidegrenzen ein. Informationen zu eventuellen Datenlücken sowie zum geografischen und zeitlichen Bezug lagen nicht vor.

5.1.4.4 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle

Eine schematische Darstellung der Umberto-Modelle zeigt Abbildung 5-24. Die verwendeten grafischen Elemente sind in Tabelle 4-1 erläutert. Auf eine Dokumentation der Module im Anhang wurde verzichtet, da diese ausschließlich auf dem Datensatz der BASF AG basieren und keine Module oder Datensätze darüber hinaus verwendet wurden.

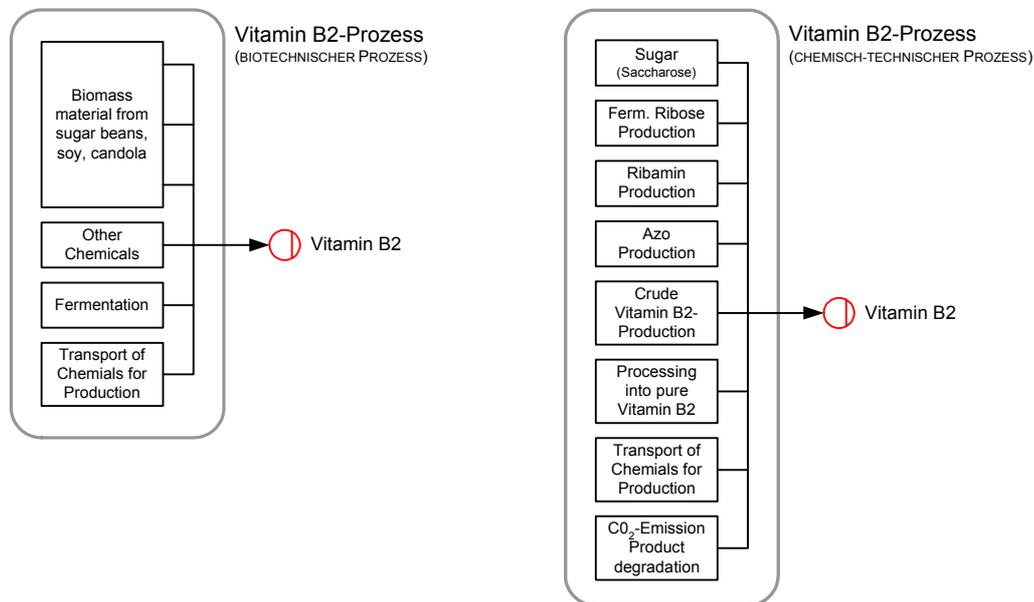


Abbildung 5-24: Bilanzierungsmodelle für die beiden untersuchten Szenarien

Der BASF-Datensatz enthielt die für die Ökoeffizienzanalyse nach der BASF-Methode notwendigen Daten. Im Einzelnen standen für jeden der betrachteten Prozessschritte einheitlich folgende Daten zur Verfügung:

- Energieverbrauch aus Braun- und Steinkohle, Erdgas, Erdöl, Kernenergie, Wasserkraft, Biomasse und sonstigen Brennstoffen
- Rohstoffverbrauch an Boden, Steinkohle, Erdöl, Erdgas, Braunkohle, Steinsalz, Schwefel, Phosphat, Eisenerz, Kalkstein, Bauxit und Sand
- Luftemissionen an Kohlendioxid, Schwefeloxide, Stickoxide, Methan, NMVOC, halog. Kohlenwasserstoffen, Ammoniak, Distickstoffmonoxid und Chlorwasserstoff
- Abwasseremissionen an CSB, BSB₅, N-ges., Ammonium, Phosphat, AOX, Schwermetallen, Kohlenwasserstoffen, Sulfat und Chlorid
- Feste Abfälle in Form von Siedlungsabfällen, Sonderabfällen, Bauschutt und Abraum
- Flächenbedarf in Form von Wald und Biolandbau, Grünflächen und Brachen, konv. Landbau, versiegelten Flächen, Straßen/Schienen und Kanälen

Darüber hinausgehende Input- bzw. Outputdaten lagen nicht vor.

Auf eine grafische Gegenüberstellung von Ausgangsdaten wird an dieser Stelle verzichtet, da der BASF-Datensatz das Ergebnis und nicht die Ausgangsdaten einer Modellierung darstellt und damit vollständig in den Vergleich der Bilanzierungsergebnisse einfließt.

5.1.4.5 Vergleich der Bilanzierungsergebnisse

5.1.4.5.1 Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle inputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 5-19 neben dem Wasserbedarf die Stoff- und Energieeinsätze zusammengefasst, die für die Auswertung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung zur Verfügung standen. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten inputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Die Werte in Tabelle 5-19 zeigen, dass der Aufwand an KEA fossil (Energie aus fossilen Energieträgern) beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um mehr als die Hälfte niedriger ist als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS. Dagegen wurden für den BIOTECHNISCHEN PROZESS alle andern KEA zum Teil deutlich höher bilanziert.

Die Beanspruchung fossiler Rohstoffe ist beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS für Erdgas und Erdöl deutlich größer als beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS. Der Bedarf an Steinkohle und Braunkohle ist dagegen niedriger.

Die Beanspruchung mineralischer Ressourcen zeigt, dass im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS mehr Kalkstein sowie ähnlich viel Steinsalz und Eisenerz benötigt wird, während im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS der Bedarf an Bauxit und Schwefel überwiegt.

Tabelle 5-19: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	BIOTECHNISCHER PROZESS	CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS
<i>Kumulierter Energieaufwand</i>			
KEA fossil	GJ	393	849
KEA regenerativ	GJ	205	28
KEA Kernkraft	GJ	85	37
KEA Wasserkraft	GJ	6,5	2,5
KEA sonstige	GJ	226	57
<i>Fossile Energieträger</i>			
Erdöl	kg	932	8.035
Erdgas	kg	4.234	8.602
Steinkohle	kg	2.840	1.770
Braunkohle	kg	3.022	330
<i>Mineralische Rohstoffe und Erze</i>			
Bauxit	kg	1	5
Kalkstein	kg	593	131
Schwefel	kg	179	287
Steinsalz	kg	799	808
Eisenerz	kg	3	3
<i>Naturraum</i>			
Fläche K4	m ²	- 35.026	- 1.208
Fläche K6	m ²	36.044	3.180
Fläche K7	m ²	80	209

Im folgenden Abschnitt wird näher auf den Energiebedarf (KEA gesamt) eingegangen. Im Gegensatz zu den anderen Auswertungen werden nur die Netto-Ergebnisse dargestellt. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

5.1.4.5.2 KEA gesamt

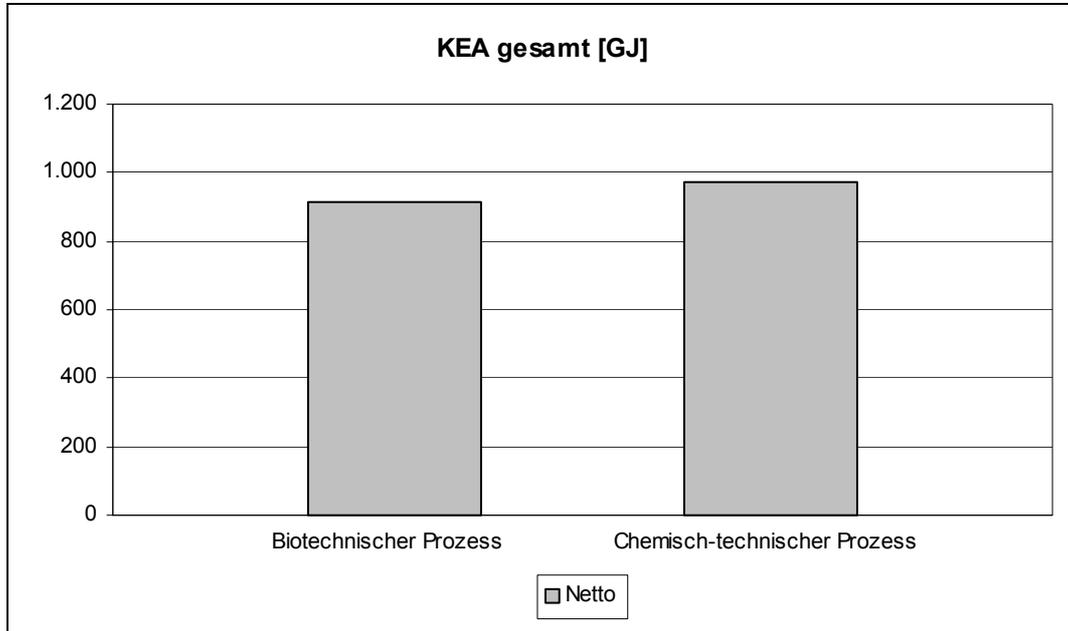


Abbildung 5-25: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Der KEA gesamt beträgt

- 917 GJ für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 973 GJ für das Szenario chemisch-technischer Prozess.

Wie Tabelle 5-19 zeigt, bestimmt der KEA fossil das Netto-Ergebnis beider Szenarien, jedoch in unterschiedlicher Höhe. Während beim CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS der Anteil am Energieverbrauch fast 90 % beträgt, ist es beim BIOTECHNISCHEN PROZESS knapp über 40 %. Hier tragen auch der KEA regenerativ und der KEA sonstiges mit jeweils ca. 25 % wesentlich zum Ergebnis bei.

Fazit: Der Energiebedarf für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 (BASF) ist beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS ca. 6 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.4.5.3 Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle outputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 5-20 neben dem Abfall- und Abwasseraufkommen die Luft- und Wasseremissionen zusammengefasst, die für die Auswertung der UBA-Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Ozonbildung sowie Humantoxikologie und Ökotoxikologie zur Verfügung standen. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten outputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Die Werte der Tabelle zeigen, dass das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS für fünf der aufgeführten Luftparameter geringere Emissionen und für vier Luftparameter höhere Emissionen aufweist.

Bezogen auf den Stoffeintrag ins Wasser bringt der Vergleich ein ähnlich ausgeglichenes Ergebnis. Hier weist das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS für vier der aufgeführten Wasserparameter niedrigere und für drei Wasserparameter höhere Emissionen auf.

Tabelle 5-20: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	BIOTECHNISCHER PROZESS	CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS
<i>Emissionen in die Luft</i>			
Ammoniak	kg	2,87	0,8
Chlorwasserstoff	kg	1,93	1,14
Distickstoffmonoxid	kg	27	0,65
Kohlendioxid, fossil und unspezifisch	kg	25.067	50.272
Methan	kg	55,5	63,5
NMVOG	kg	19	67,9
NOx	kg	91,7	186
Schwefeldioxid	kg	105	424
VOC	kg	0,01	0,0026
<i>Emissionen ins Wasser</i>			
Ammonium	kg	0,07	14,6
AOX	kg	0,00021	0,39
Chlorid	kg	40,1	922
CSB	kg	663	208
Kohlenwasserstoffe, sonst.	kg	0,063	0,39
Phosphat	kg	8,03	0,5
Stickstoffverb., unspezifisch	kg	9,9	0,54
<i>Abfallaufkommen</i>			
Abfälle zur Beseitigung	kg	376	4.954
Abraum	kg	6.375	3.131

Negative Werte: „Einsparung“ durch die Verrechnung von Gutschriften

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die oben genannten Wirkungskategorien eingegangen. In Gegensatz zu den anderen Auswertungen, werden nur die Netto-Ergebnisse dargestellt. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

5.1.4.5.4 Treibhauseffekt

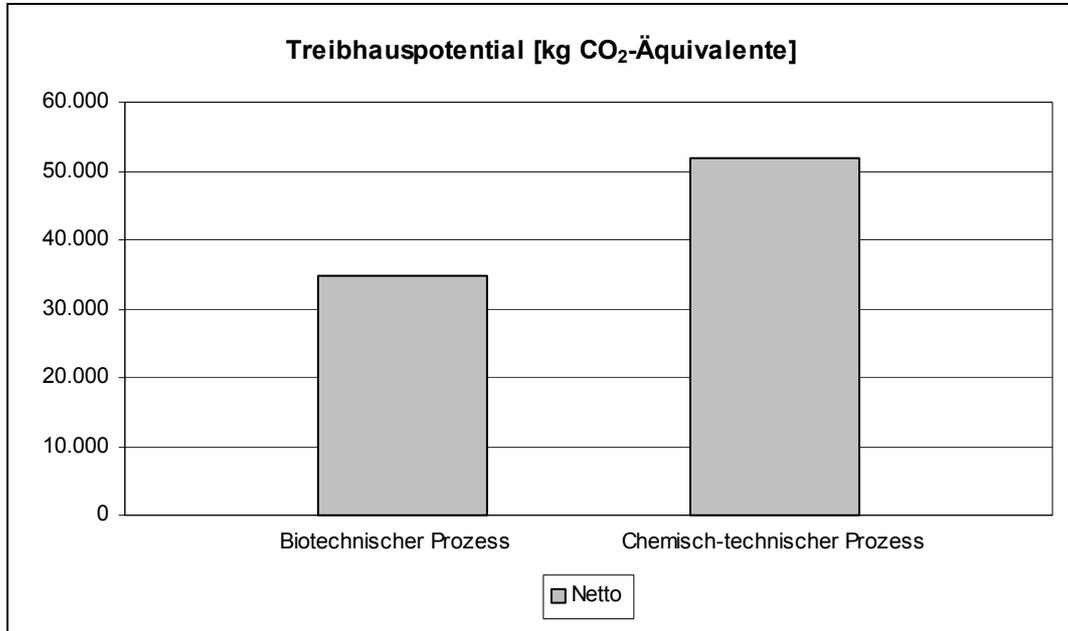


Abbildung 5-26: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Das Treibhauspotential beträgt

- 34.754 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 51.805 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Die CO₂-Äquivalente des Netto-Ergebnisses werden beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS zu 97 % durch Kohlendioxidemissionen verursacht. Auch beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS resultiert der größte Teil des Netto-Ergebnisses aus Kohlendioxidemissionen (72 %). Daneben tragen aber auch Distickstoffmonoxidemissionen, aus denen der größte Teil der restlichen CO₂-Äquivalente gebildet wird, wesentlich zum Netto-Ergebnis bei (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 (BASF) ist die Emission an CO₂-Äquivalenten beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 33 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.4.5.5 Versauerung

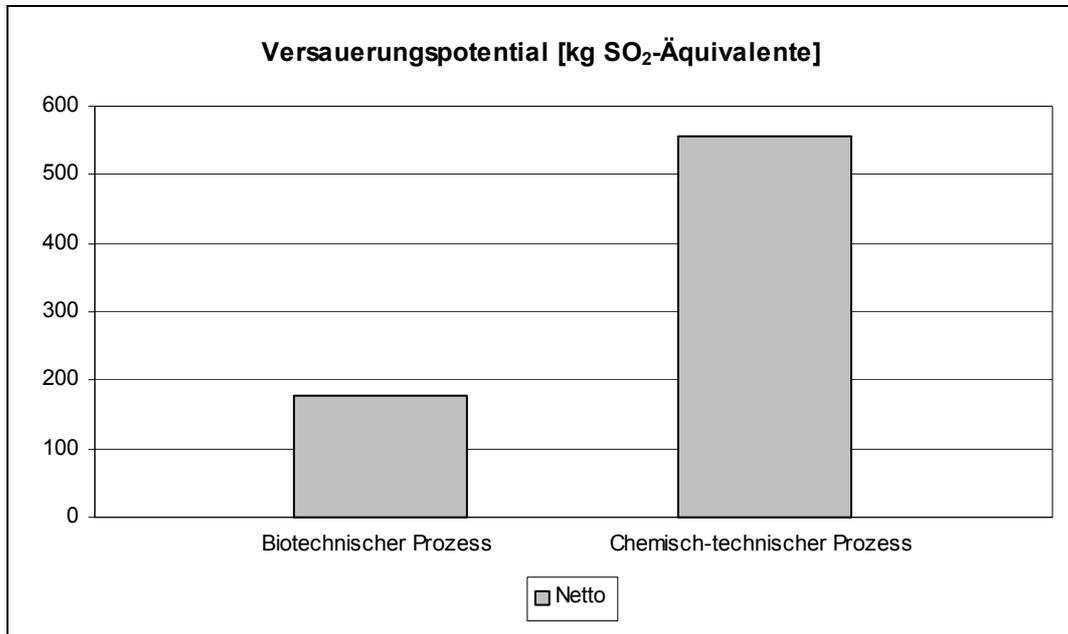


Abbildung 5-27: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Das Versauerungspotential beträgt

- 177 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 557 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

In beiden Szenarien wird das Versauerungspotential fast ausschließlich durch Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen gebildet. Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHEN PROZESS beträgt der Anteil der beiden Stoffe ca. 96 % sowie beim Szenario BIOTECHNISCHEN PROZESS ca. 99 %. Emissionen an Chlorwasserstoff und Ammoniak spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 (BASF) ist die Emission an SO₂-Äquivalenten beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 68 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.4.5.6 Terrestrische Eutrophierung

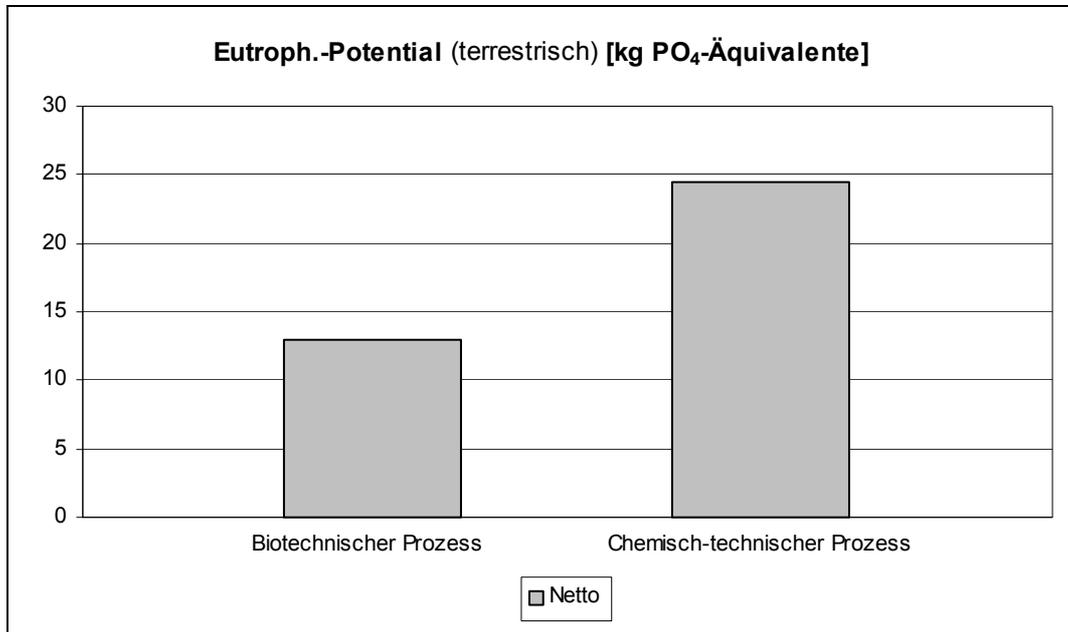


Abbildung 5-28: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Das terrestrische Eutrophierungspotential beträgt

- 13 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 25 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Die Netto-Ergebnisse werden mit 99 % beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sowie 92 % beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS fast ausschließlich durch Stickoxidemissionen verursacht. Die restlichen PO₄-Äquivalente sind auf Ammoniakemissionen zurückzuführen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 (BASF) ist das terrestrische Eutrophierungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 47 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.4.5.7 Aquatische Eutrophierung

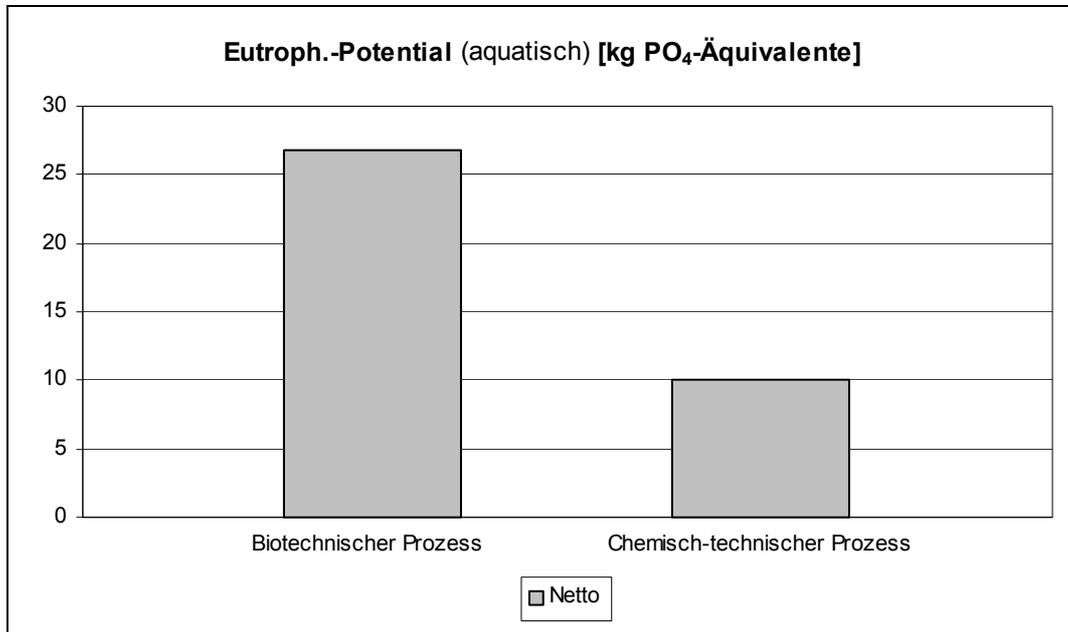


Abbildung 5-29: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Das aquatische Eutrophierungspotential beträgt

- 27 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 10 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Das Netto-Ergebnis des Szenarios CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS wird zum größten Teil durch den CSB (45 %) und durch Ammoniumemissionen (47 %) gebildet. Beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS haben Ammoniumemissionen dagegen so gut wie keinen Einfluss. Hier überwiegen neben dem CSB (54 %) mit 30 % Phosphatmissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 (BASF) ist das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 167 % größer als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.4.5.8 Ozonbildung

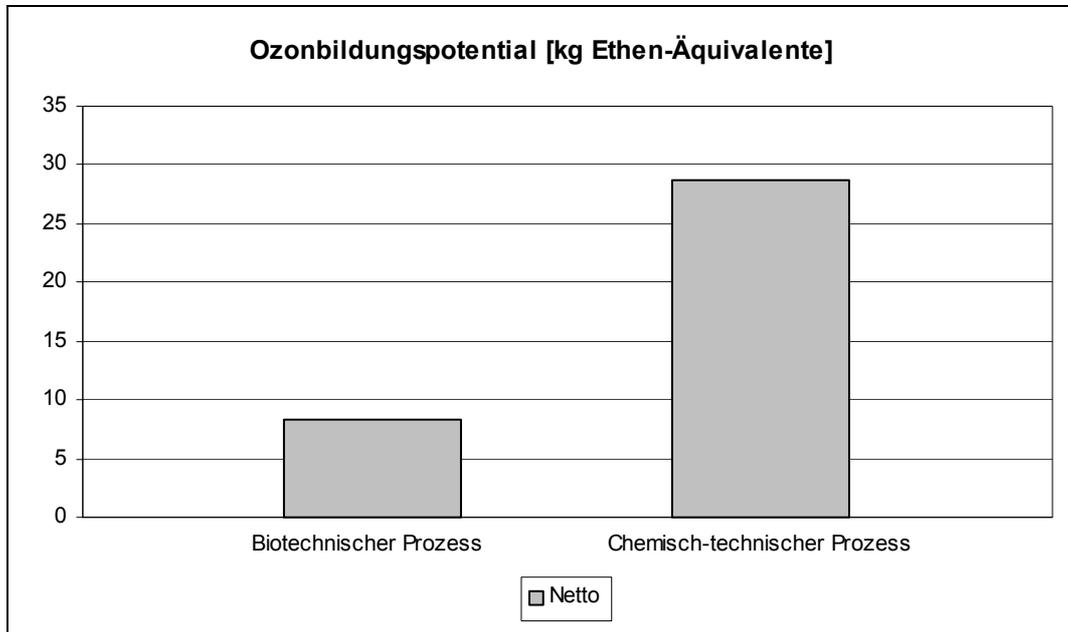


Abbildung 5-30: Photochemische Oxidantienbildung - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Das Ozonbildungspotential beträgt

- 8 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS und
- 29 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

In beiden Szenarien wird das Netto-Ergebnis fast ausschließlich durch NMVOC-Emissionen verursacht. Beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS beträgt der Anteil 98 % und beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS 95 % (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 (BASF) ist die Emission an Ethen-Äquivalenten beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 71 % niedriger als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

5.1.4.5.9 Humantoxizität

Von den ausgewählten humantoxisch eingestuft Parameter stand lediglich das Netto-Ergebnis für Schwefeldioxid zur Verfügung, das in Abbildung 5-31 dargestellt ist.

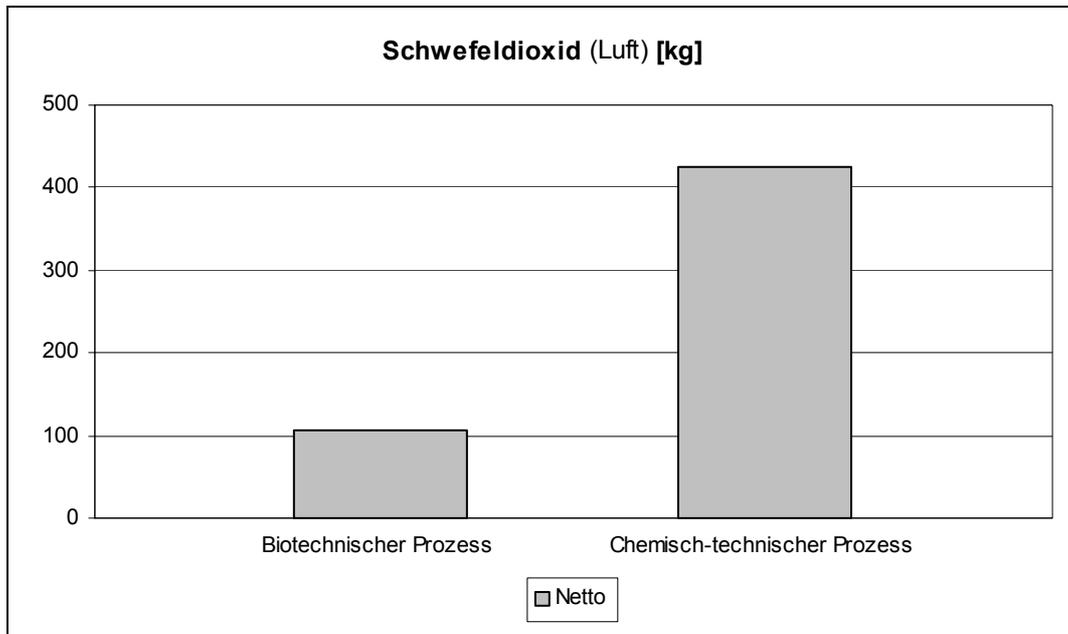


Abbildung 5-31: Humantoxizität am Beispiel von Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-20 dargestellt. Ein Vergleich der beiden Werte zeigt, dass die Schwefeldioxidemissionen beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS um ca. 320 kg (75 %) niedriger sind, als beim Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Fazit: Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wurden für den humantoxisch eingestuft Parameter Schwefeldioxid ein niedrigerer Emissionswert als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS berechnet. Für die anderen Parameter standen keine Daten zur Verfügung.

5.1.4.5.10 Ökotoxizität

5.1.4.5.10.1 Luftemissionen

Von den ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parametern (Luftemissionen) standen neben Schwefeldioxid die Netto-Ergebnisse für Ammoniak und Stickoxide zur Verfügung, die in Abbildung 5-32 dargestellt sind.

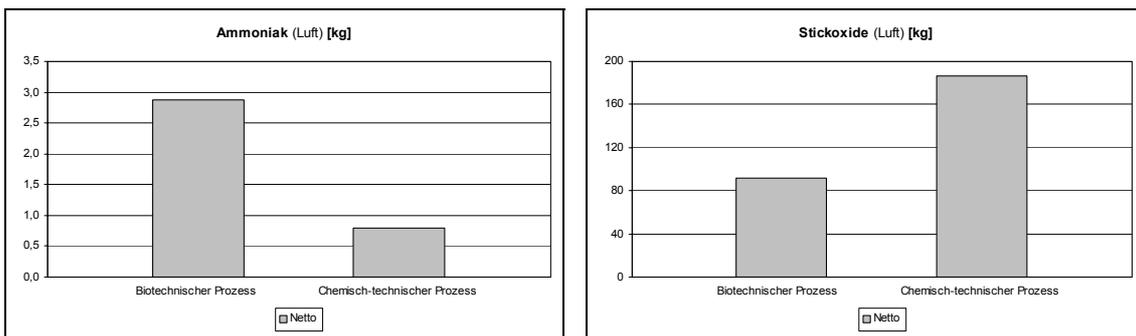


Abbildung 5-32: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxiden - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-20 dargestellt. In Tabelle 5-21 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-21: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammoniak	Belastung	+ 2,4 kg	+ 301 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 319 kg	- 75 %
Stickoxide	Entlastung	- 94 kg	- 51 %

Fazit: Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wurden für den als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Luftemissionen) Ammoniak ein höherer Emissionswert bzw. für Schwefeldioxid und Stickoxide niedrigere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS berechnet.

5.1.4.5.10.2 Wasseremissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter (Wasseremissionen) sind in Abbildung 5-33 die Netto-Ergebnisse für Ammonium und Chlorid dargestellt.

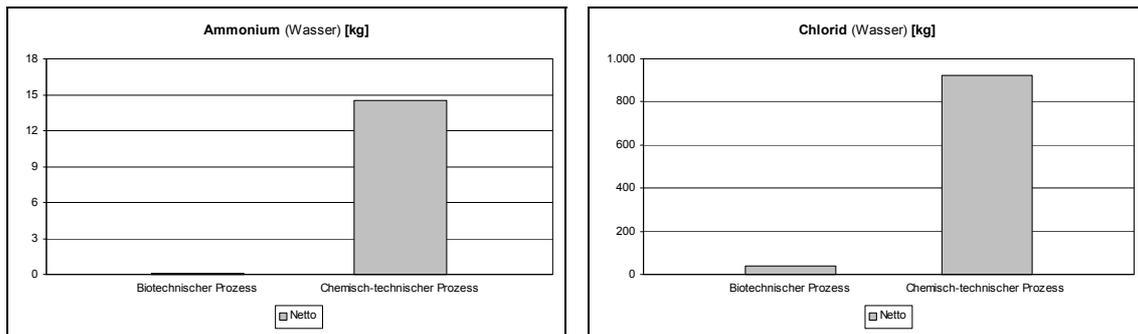


Abbildung 5-33: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Netto-Ergebnis

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-20 dargestellt. In Tabelle 5-22 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-22: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammonium	Entlastung	- 14 kg	- 99,5 %
AOX	Entlastung	- 0,39 kg	- 99,5 %
Chlorid	Entlastung	- 882 kg	- 96 %
Kohlenwasserstoffe	Entlastung	- 0,33 kg	- 84 %

Fazit: Im Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS wurden für alle als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter (Wasseremissionen) deutlich niedrigere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS berechnet.

5.1.4.6 Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Die Ergebnisse der vergleichenden Auswertung der Vitamin B2-Produktion bei der BASF AG durch die Szenarien BIOTECHNISCHER PROZESS und CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS sind in Tabelle 5-23 noch einmal zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte für die hier betrachtete funktionelle Einheit (**Produktion von 1.000 kg Vitamin B2**) berechnet und bei der nachfolgenden Diskussion berücksichtigt.

Die Tabelle zeigt, dass für das Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS gegenüber dem Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS Umweltentlastungspotentiale für die aggregierten Wirkungskategorien kumulierter Energieaufwand (Ressourcenbeanspruchung), Treibhaus-, Versauerungs-, terrestrisches Eutrophierungs- und Ozonbildungspotential deutliche Umweltentlastungen ermittelt wurden. Das aquatische Eutrophierungspotential war beim Szenario BIOTECHNISCHER PROZESS jedoch um 3 Einwohnerwerte höher als bei Szenario CHEMISCH-TECHNISCHER PROZESS.

Bei den als humantoxisch eingestuft und ausgewerteten Einzelstoffen lagen nur für Schwefeldioxid (L) Daten vor. Der Verfahrenvergleich ergab hier eine ausgeprägte Umweltentlastung durch die Anwendung des biotechnischen Verfahrens.

Bei den als ökotoxisch eingestuft und ausgewerteten Einzelstoffen lagen für 7 Stoffe Daten vor. Bei 6 Stoffen (Schwefeldioxid (L); Stickoxide (L); Ammonium (W); AOX (W); Chlorid (W); Kohlenwasserstoffe (W)) dokumentieren die Daten eine ausgeprägte Umweltentlastung bei Anwendung des biotechnischen Verfahrens. Die Ammoniakemissionen lagen bei beiden Verfahren auf einem niedrigen Niveau und waren bei biotechnischen Verfahren 0,27 Einwohnerwerte höher als beim chemisch-technischen Verfahren.

Abschließend weisen wir ausdrücklich darauf hin, dass die Einzelergebnisse nur einen Vergleich der hier ausgewerteten Verfahren erlauben. Aufgrund anderer Rahmenbedingungen bei der Bilanzierung ist insbesondere der Vergleich der Einzeldaten mit den Einzeldaten des Verfahrensvergleichs der DSM Nutritional Products unzulässig.

Tabelle 5-23: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

	Einheit	Biotechnischer Prozess	Chemisch-technischer Prozess	Biotechnischer Prozess	Chemisch-technischer Prozess	Differenz (Bio. - Chem.)
		Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	917	973	5,25	5,58	-0,32
Treibhauspotential	Mg CO ₂ -Äq.	34,8	51,8	2,94	4,39	-1,44
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	177	557	4,34	13,7	-9,34
Eutrophierungspotential (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	12,9	24,5	2,48	4,70	-2,22
Eutrophierungspotential (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	26,8	10,1	4,82	1,81	3,01
Ozonbildungspotential (POCP)	kg Eth-Äq.	8,31	28,7	0,96	3,32	-2,36
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren (L)	kg	--	--	--	--	--
Blei (L)	kg	--	--	--	--	--
Cadmium (L)	kg	--	--	--	--	--
Schwefeldioxid (L)	kg	105	424	10,9	43,9	-32,99
Staub (L)	kg	--	--	--	--	--
Ökotoxische Einzelstoffe						
Ammoniak (L)	kg	2,87	0,80	0,38	0,11	0,27
Fluorwasserstoff (L)	kg	--	--	--	--	--
Schwefeldioxid (L)	kg	105	424	10,9	43,9	-32,99
Schwefelwasserstoff (L)	kg	--	--	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	91,7	186	4,71	9,57	-4,86
Ammonium (W)	kg	0,072	14,6	0,03	5,20	-5,17
AOX (W)	kg	0,00021	0,39	0,004	7,38	-7,38
Chlorid (W)	kg	40,1	922	--	--	--
Kohlenwasserstoffe (W)	kg	0,063	0,39	1,22	7,55	-6,33

5.2 Verfahrensvergleich 2 – Biotechnische und chemisch-technische Lederherstellung

5.2.1 Basisinformationen

5.2.1.1 Grundlagen der Lederherstellung

Tierische Häute und Felle wurden schon in der Vorgeschichte der Zivilisation auf primitive Weise präpariert und so für die jeweilige Anwendung (z.B. Bekleidung) nutzbar gemacht. Die Verarbeitung der Tierhäute zu Leder erfolgte mit Hilfe von Gerbstoffen und unterschiedlichen Gerbtechniken, wobei die Fettgerbung (Sämischgerbung), Rauchgerbung über dem Feuer und die mineralische Gerbung mit Alaun (Weißgerbung) die älteren Gerbarten sein dürften. Das Gerben mit pflanzlichen Mitteln (vegetabile Gerbung) und die Lohgerbung unter Nutzung der Gerbstoffe aus den Rinden von Eichen und Buchen gehören eher zu den neueren Gerbarten. Aus diesen Anfängen entwickelte sich mit fortschreitender Zivilisation und Wissenschaft ein Handwerk und später ein Industriezweig. Seit 1900 ist die Chromgerbung mit Chromsalzen die wichtigste Gerbmethode, da sie gegenüber der Lohgerbung wesentlich kürzere Laufzeiten hat (Lederhaus, 2003). Etwa 80 – 90 Prozent aller gebräuchlichen Lederarten werden nach diesem Verfahren (wet-blue-Verfahren) hergestellt (Trommer und Kellert, 1999). Dem gegenüber steht das „wet-white-Verfahren“, bei dem keine Metallsalze verwendet werden.

Durch besondere Gerbung und Zurichtung werden die Leder je nach ihrer späteren Verwendung zu verschiedenen Produkten gefertigt. Unterschieden werden beispielsweise Lederarten wie Blankleder, Nubukleder, Anilinleder, Veloursleder (Wildleder) oder Vollleder (Lederhaus, 2003).

5.2.1.2 Prozessschritte der industriellen Lederherstellung

Der Gerbprozess besteht aus einer Kette von Einzelschritten, die sich nach dem eingesetzten Verfahren, nach der Art der Rohware und dem herzustellenden Produkt voneinander unterscheiden können. Der Gerbprozess gliedert sich in vorbereitende Prozesse, Prozesse rund um den Kernprozess Gerben und dem Gerben nachgeschaltete Prozesse und nachbearbeitende Prozesse (vgl. Tabelle 5-24).

Eine Studie des „European IPPC Bureau“ (Institute for Prospective Technological Studies; IPPC = Integrated Pollution Prevention and Control) der Europäischen Kommission fasst die derzeit best verfügbaren Techniken¹ in der Gerbereiindustrie zusammen (IPTs, 2001).

Tabelle 5-24: Prozessschritte der Lederherstellung (IPTs, 2001)

Prozess	Process	Kurzbeschreibung
<i>Vorbereitende Prozesse</i>		
Vorsortierung	Sorting	Rohware wird nach verschiedenen Merkmalen vorsortiert
Zurechtschneiden	Trimming	Zurechtschneiden der Felle
Salzen, haltbar machen	Curing	Die Rohware wird für die Zeit vor dem Prozess haltbar gemacht
Lagern	Storing	In gekühlten Räumen wird die Rohware gelagert
Weichen	Soaking	Durch das Weichen wird die Rohware von Schmutz und Salzen befreit
Äschern	Liming, Unhairing	Durch Zugabe von Kalk und Schwefelverbindungen lösen sich im Äscher die Haare und die Oberhaut vom Fell
Entfleischen	Fleshing	Gewebe-, Fleisch- und Fettreste werden mit scharfen Messerwalzen entfernt
Spalten	Splitting	Das Leder wird gespalten, um eine gleichmäßige Dicke zu erreichen
<i>Prozesse rund um den Kernprozess Gerben</i>		
Entkälken	Deliming	Reinigen von Chemikalien, Kalk
Beizen	Bating	Die Haut wird enzymatisch aufgelockert
Entfetten	Degreasing	Die Haut wird entfettet
Pickeln	Pickling	Säureeinsatz zur Reduzierung des pH-Wertes
Gerben	Tanning	Die Hautfasern nehmen die Gerbstoffe auf
Entwässern	Wringing, Draining, Samming, Setting	Die nassen Leder werden durch Abwelken entwässert
Spalten	Splitting	Das Leder wird gespalten, um eine gleichmäßige Dicke zu erreichen
Falzen	Shaving	Das Narbenleder wird auf eine gleichmäßige Stärke gebracht, Unebenheiten auf der Rückseite entfernt
<i>Dem Gerben nachgeschaltete Prozesse</i>		
Neutralisieren	Neutralisation	Die eingesetzten Chemikalien werden neutralisiert und entfernt
Bleichen	Bleaching	Farbminderung nach Gerbung mit Naturstoffen

¹ best available technologies

Prozess	Process	Kurzbeschreibung
Nochmaliges Gerben	Retanning	Verbesserung der Produkteigenschaften
Färben	Dyeing	Die Leder bekommen eine Vielzahl von verschiedenen Färbungen, je nach Verwendungszweck
Fetten	Fatliquoring	Das Leder wird mit Fett durchdrungen. Es bekommt Geschmeidigkeit und Wasserundurchdringlichkeit
Trocknen	Drying	Trocknen, der Wassergehalt wird ggf. gesenkt
<i>Nachbearbeitende Prozesse</i>		
Zurichten, Endbehandlung	Finishing	Nachbehandlung der Oberfläche, ohne die Ledereigenschaften zu verändern
z.B. Stollen	Staking	Das Leder wird gewalkt und dadurch weich und flexibel gemacht
z.B. Schleifen	Buffing	Oberflächenverfeinerung und -abtrag
z.B. Bürsten	Brushing	Reinigung nach dem Schleifen

Aus Gründen der Übersichtlichkeit soll an dieser Stelle nur auf die beiden zu vergleichenden Prozessschritte „Weichen“ und „Äschern“ eingegangen werden. Die gesamte Prozesskette ist im Anhang dargestellt.

5.2.1.2.1 Weichen (Soaking)

Die Weiche hat die Aufgabe, die Rohhaut von anhaftenden Verunreinigungen zu befreien, Konservierungsmittel zu entfernen und den Quellungszustand wie am Körper des lebenden Tieres wieder herzustellen. Die eingesetzte Technik richtet sich nach dem Zustand der Rohware. In den meisten Fällen untergliedert sich der Prozess in zwei Teilschritte, einen Weichvorgang, um den Schmutz und das Salz herauszulösen, und einen Hauptweichvorgang, bei dem Häute und Felle das seit der Schlachtung verlorene Wasser wieder aufnehmen. Das Weichen erfolgt in Mischern, Trommeln, Gruben oder Kanälen. Der Weichprozess dauert mehrere Stunden bis einige Tage. Abhängig von der eingesetzten Rohware können auch Zusatzstoffe wie zum Beispiel Tenside, Enzyme oder Bakterizide beim Weichen eingesetzt werden. Enzyme wurden früher in Form der „faulen Weiche“ eingesetzt, wobei gebrauchte Weichflotten mit hohen Anteilen an abgebautem Eiweiß und hohem Bakterienbesatz den frisch angesetzten Weichflotten zugemischt wurden und dort für ein starkes Bakterienwachstum und damit eine hohe Enzymproduktion sorgten. Durch die Anwesenheit der Fäulnisbakterien besteht die Gefahr irreversibler Hautschäden. Eine Ausweitung der enzymatischen Weiche trat erst ein, nachdem wirksame proteolytische Bakterien- und Pilzenzyme in

ausreichendem Maße zur Verfügung standen. In der Wasserwerkstatt kommt den Proteasen, den Eiweiß spaltenden Enzymen, die größte Bedeutung zu. Die Einsatzmenge hängt von deren Konzentration und der Hautkonservierung ab. Bei den vielen anwendungstechnischen Vorteilen sind der Enzymweiche aber Grenzen hinsichtlich der Enzymaktivität gesetzt, da bereits im Zeitraum von sechs Stunden ein Angriff auf kollagene Proteine erfolgen kann (Zissel, 1988).

Das Weichen erfolgt bei pH 7 bis 9. Es kommen Pilz- und Bakterien-Proteasen sowie Trypsin (Pankreas-Extrakt) zur Unterstützung der Weiche zum Einsatz (Schmid, 2002).

5.2.1.2.2 Äschern – Enthaaren und Hautaufschluss (Liming, Unhairing)

Unter Äschern wird der Prozessschritt verstanden, bei dem die Häute enthaart werden und die Faserstruktur der Haut aufgeschlossen wird. Die Entfernung der Haare und anderer Hautkomponenten erfolgt chemisch und mechanisch. Der Hornstoff (Haare, Haarwurzeln, Epidermis) und das Fett werden hauptsächlich durch Einsatz von Sulfiden (NaHS oder Na_2S) und Kalk entfernt. Als Alternative zu den anorganischen Sulfiden bieten sich organische Präparate wie Mercaptide oder Natriumthioglykolat in Kombination mit starken Alkali- und Aminmischungen an. Teilweise werden Enzympräparate zugegeben, um die Wirksamkeit des Prozesses zu verbessern. Das Äschern kann in Trommeln, Rührern, Mischern oder Gruben durchgeführt werden.

Unterschieden wird je nach der angewandten Verfahrensführung zwischen „haarzerstörendem Prozess“ und „haarerhaltendem Prozess“. Beim haarerhaltenden Prozess werden die Haare auf chemischem Weg gelockert und dann mechanisch durch Abwalzen oder eine maschinelle Enthaarung entfernt. Beim haarzerstörenden Prozess hingegen erfolgt durch den Chemikalieneinsatz ein weitgehend hydrolytischer Abbau der Haare.

5.2.1.3 Stoffströme bei der Lederherstellung im Überblick

Einen Überblick über die Stoffströme bzw. Rohwaren-Stoffströme bei der Verarbeitung von Rinderhäuten nach dem Verfahren der Chromgerbung liefern Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35.

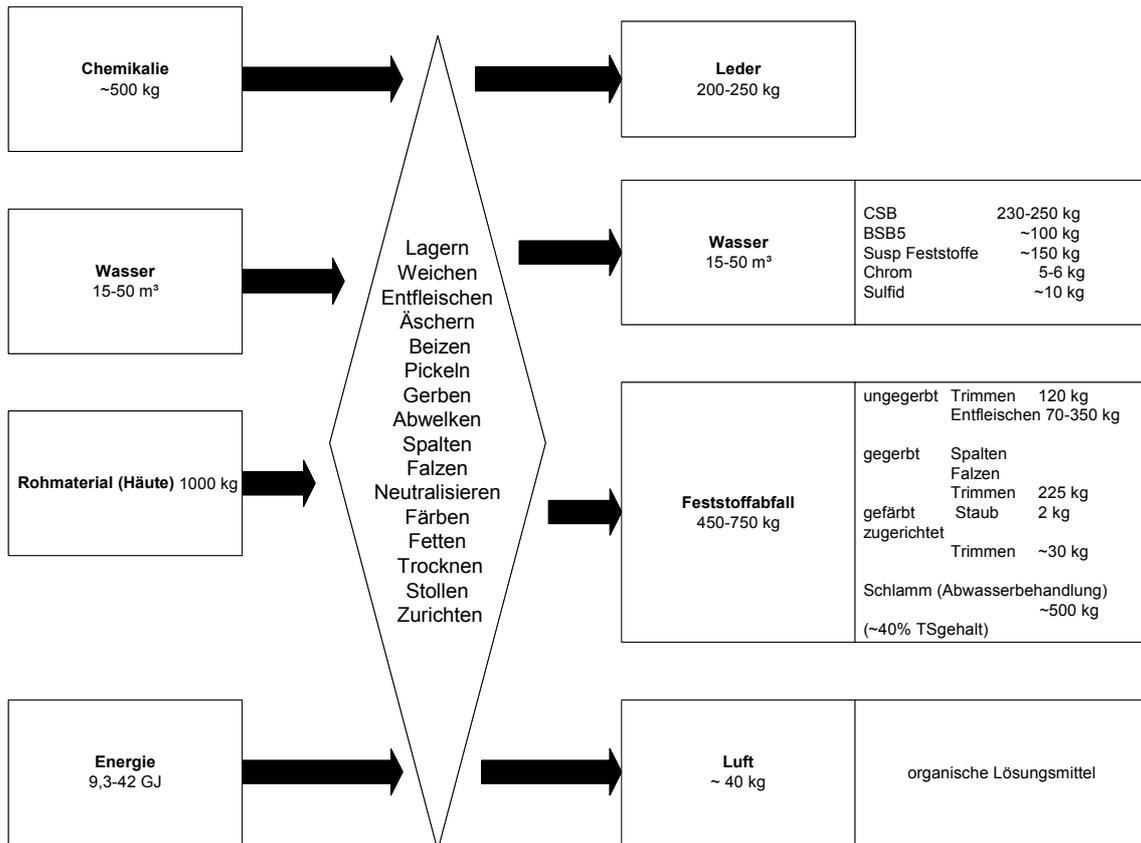


Abbildung 5-34: Verfahrensfließbild und Überblick zu Stoffströmen einer Chromgerberei (nach IPTS, 2001)

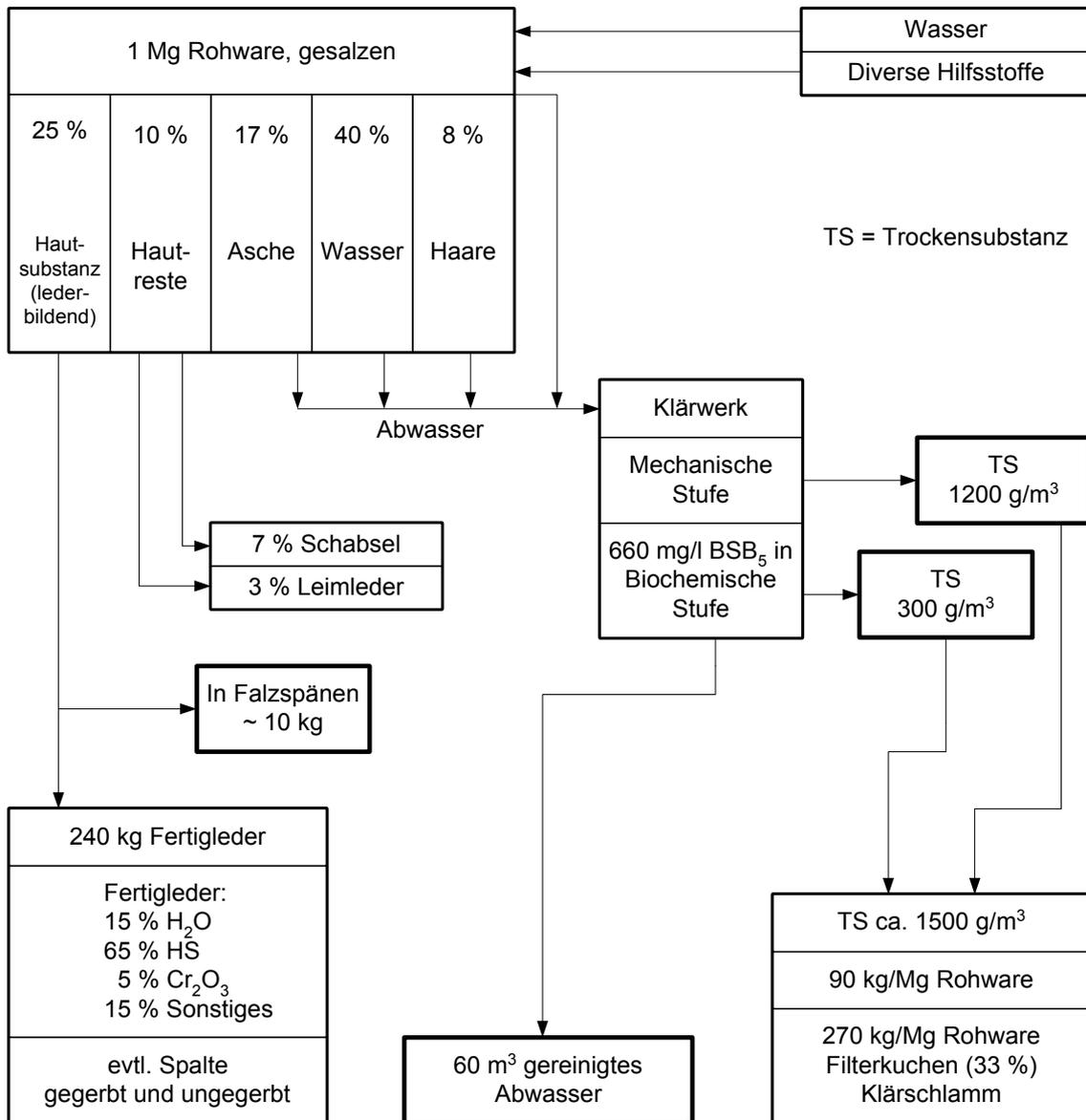


Abbildung 5-35: Rohwaren-Stoffbilanz (nach Feikes, 1990)

5.2.1.4 Bedeutung der Enzyme bei der Lederherstellung

Beim Beizen, vor dem eigentlichen Gerbvorgang, ist der Enzymeinsatz obligat, beim Weichen und Äschern ist er fakultativ möglich. Enzyme werden primär eingesetzt, um Qualitätsverbesserungen beim fertigen Leder zu erzielen, um den Gerbprozess zu beschleunigen und um Chemikalien einzusparen. Vor diesem Hintergrund kann der En-

zumeinsatz die Wirtschaftlichkeit der Lederherstellung verbessern (IPTS, 2002; Nagel und Albus, 2003).

In der Praxis der Lederherstellung kommen Enzyme in unterschiedlichem Ausmaß zum Einsatz. Dies ist begründet in unterschiedlichen Herstellungstechniken und unterschiedlichen Produkthanforderungen. Aus diesem Grund finden sich in der Literatur in den allermeisten Fällen keine exakten Mengenangaben, sondern nur Spannbreiten oder Größenordnungen (IPTS, 2001). Zu beachten ist, dass die verwendeten Proteasen in den stark verunreinigten und chemisch aggressiven Flotten rasch inaktiviert werden, sodass die Proteaseaktivität schnell nachlässt (Trommer et al., 1995).

Derzeit sollen weltweit etwa 15 Prozent der praktizierten Verfahren zum Weichen und Äschern auch den Einsatz von Biokatalysatoren nutzen (IPTS, 2002). Es besteht aber eine anhaltende Tendenz zum verstärkten Einsatz von Enzymen in der Lederherstellung (Nagel und Albus, 2003).

Die Einsatzpotentiale von Enzymen sind in Abbildung 5-36 im Überblick dargestellt. Im Vergleich mit anderen Literaturangaben und im Gespräch mit Fachkreisen (Nagel und Albus, 2003) wurde deutlich, dass die Einsatzmöglichkeiten für Enzyme unterschiedlich eingeschätzt werden. So wird zum Beispiel angemerkt, dass der Einsatz von Lipasen beim Weichen wenig gebräuchlich ist und es wird bezweifelt, dass beim Weichen völlig auf den Einsatz von Tensiden verzichtet werden kann (Nagel und Albus, 2003).

Beim Einsatz der Proteasen ist zu beachten, dass diese nur in einem bestimmten pH-Bereich (pH 8 bis 11) aktiv und am wirkungsvollsten in wässriger Phase sind. Die Effektivität der Enzyme wird durch einen Temperaturanstieg gesteigert, durch Gerbstoffe und Schwermetalle werden die Enzyme gehemmt. (Schill+Seilacher, 2003a).

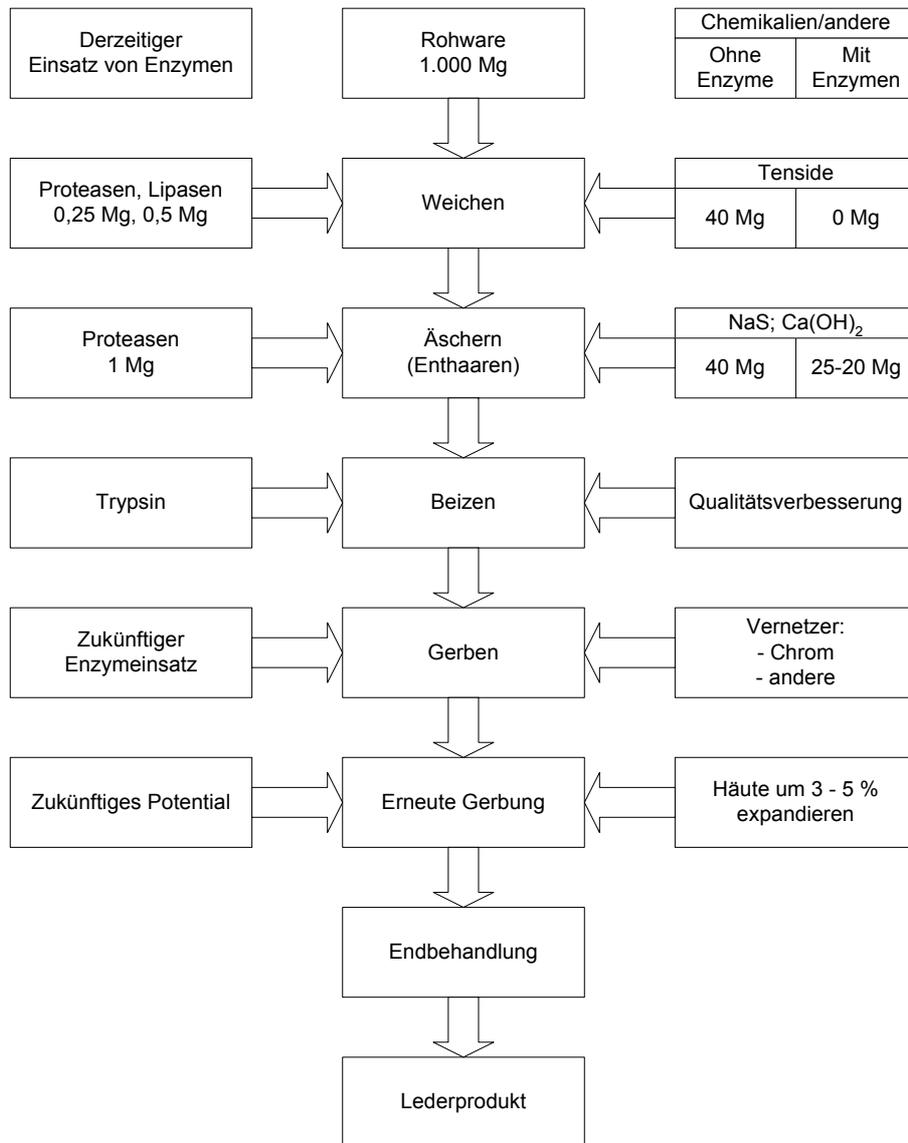


Abbildung 5-36: Einsatzpotentiale für Enzyme bei der Lederherstellung und resultierende Chemikalieneinsparungen (IPTS, 2002)

Beim Weichen (Reinigung und Wasseraufnahme) werden als Zusatzstoffe neben Tensiden und Bakteriziden auch Enzyme eingesetzt. Beim Äschern (Enthaarungsprozess) werden Haare und andere Hautkomponenten chemisch oder mechanisch entfernt und die Faserstruktur der Haut aufgeschlossen. Neben verschiedenen Chemikalien können teilweise auch Enzympräparate zugegeben werden, um die Wirksamkeit des Prozesses zu verbessern. Beim Beizen erfolgt zumindest eine teilweise Schwächung oder Zerstörung von nicht kollagenen Proteinen durch Enzymeinsatz, wobei die verbleiben-

de Faserstruktur „verstärkt“ und nachfolgend das Leder gestreckt wird. Der Einsatz von Enzymen ist beim Beizprozess obligat.

Der Umfang des Enzymeinsatzes ist abhängig von der Produktionsweise einer Gerberei. Die Enzyme selbst werden weitgehend nur von zwei Unternehmen (Novozymes, Genencor) hergestellt und vertrieben. Auf einer zweiten Bearbeitungsstufe werden diese Enzyme weiter aufbereitet und zu fertigen Anwendungsprodukten zusammengestellt (Formulierung). Die fertigen Handelspräparate werden dann von den Gerbereien nach den Anwendungsempfehlungen der Formulierer eingesetzt. Ob und in welchem Umfang Enzyme in den Handelsprodukten beinhaltet sind, ist nicht immer erkennbar, da die exakte Zusammensetzung aus Wettbewerbsgründen häufig nicht offen gelegt wird. Die Proteaseaktivität ist jedoch durch Standardverfahren quantifizierbar.

5.2.1.5 Umweltrelevanz der Lederherstellung

Häute und Felle sind unter dem Blickwinkel der Ökologie als nachwachsende Rohstoffe zu verstehen, die als Reststoffe der tierischen Produktion anfallen und durch die Umwandlung in Leder eine hohe Veredlungsstufe erfahren.

Nach Reich (Reich, 2000) begründet in erster Linie das eigentliche Gerbverfahren die ökologischen Unterschiede zwischen verschiedenen Lederherstellungsverfahren. Deshalb wurden im Rahmen einer Technikabfolgeschätzung und nach den Grundsätzen einer Ökobilanz Standardrezepturen für die üblichen Verfahren einer Chromgerbung, einer Wet-White-Gerbung mit Glutardialdehyd und organischen Gerbstoffen sowie einer Vegetabilgerbung mit Mimosa miteinander verglichen. Angenommen wurde hierbei die Herstellung von Polsterleder, weil nur dafür alle drei Verfahren alternativ zur Anwendung kommen können.

Aufgrund der Aufgabenstellung wurden die der eigentlichen Gerbung vor- und nachgelagerten Prozesse nicht in die Betrachtung mit einbezogen. Bilanziert und bewertet wurden die eingesetzten Gerb- und Nachgerbstoffe, die Prozesse der Gerbung und Nasszurichtung sowie die anfallenden festen und flüssigen Abfälle nach Menge und Zusammensetzung, ihre Verwertung oder Entsorgung. Alle Arbeiten der Wasserwerkstatt, die mechanischen Bearbeitungsprozesse und die Fertigstellung der Leder waren einheitlich gewählt und wurden deshalb nicht berücksichtigt.

Als Ergebnis des Vergleichs bleibt festzuhalten, dass sich die einzelnen Technologien im Zeitbedarf, (Warm-) Wassereinsatz, Temperaturführung und damit im Energieeinsatz und anderen technologischen Parametern nicht unterscheiden. Bei allen Verfahrensvarianten ergeben sich bei Beachtung der relevanten Sicherheitshinweise keine Gefährdungen am Arbeitsplatz. Unterschiede ergaben sich vor allem in der Prozesszeit, aber auch in der Lederausbeute (Flächenrendement). Bezüglich des Prozessablaufs war keines der gewählten Gerbverfahren einem anderen eindeutig überlegen.

Unter Beachtung der organischen Belastung und verschiedener negativer Inhaltsstoffe im Abwasser (BSB, CSB, DOC, AOX ...) zeigte sich zusammenfassend, dass die Gesamtumweltfracht im Falle der Chromgerbung am geringsten, im Falle der Wet-Whitegerbung nur geringfügig und im Falle der pflanzlichen Gerbung deutlich höher ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die mit der Lederherstellung verbundenen Umwelteinwirkungen hauptsächlich auf dem hohen Wasserverbrauch und auf der besonderen Zusammensetzung des Gerbereiabwassers basieren (Trommer, Kellert, 1999).

Reich (2000) zieht zusammenfassend den Schluss, dass bezüglich der chromhaltigen Abprodukte bei sachgemäßer Aufbereitung keine ökologischen Risiken bestehen. Damit besteht keine Überlegenheit der aus chromfreien Gerbverfahren stammenden Abprodukte. Auch andere Autoren sehen in der Chromgerbung ein effizientes und kostengünstiges Gerbverfahren, das vergleichsweise geringe Belastungen bei Abwasser, Schlamm und Abfall pro produzierter Lederfläche mit sich bringt (Trommer, Kellert, 1999).

Der ökologische Vergleich verschiedener Gerbverfahren, wie er von Reich (2000) angestellt wurde, liefert keine Hinweise zur Umweltrelevanz von „haarerhaltendem“ und „haarzerstörendem“ Gerbprozess bzw. lässt er einen unterschiedlich intensiven Enzymeneinsatz unberücksichtigt. Damit sind die Ergebnisse nur bedingt zur Verwendung in vorliegender Studie geeignet.

Andere Autoren berichten über die Zielsetzung haarerhaltender Äscherverfahren, die nur unter Verwendung von Enzymen effektiv und ökologisch vertretbar zu realisieren sind. Die Enzyme werden primär eingesetzt, um Qualitätsverbesserungen beim fertigen Leder zu erzielen, um den Gerbprozess zu beschleunigen, aber auch um Chemikalien einzusparen und damit die Umweltbelastungen des gesamten Gerbprozesses zu mindern (Nagel und Albus, 2003).

Beim haarerhaltenden Prozess lässt sich im Vergleich zum haarzerstörenden Prozess der Einsatz toxikologisch nachteiliger Sulfide reduzieren oder ersetzen, sodass sich die Abwasserbelastung beim Gerben von Großviehhäuten um 30 bis 70 Prozent verringert (Zissel, 1988). Neben Qualitäts- und Ertragsverbesserungen lässt sich bei gleicher Prozessdauer der Sulfid- und Kalkverbrauch beim haarerhaltenden Prozess zumindest um 40 Prozent senken. In Folge ist zu erwarten, dass die Abwasserbelastung abnimmt, der CSB um 50 Prozent, der BSB um 35 Prozent (Schäfer und Dalboge, 1999). Es sei darauf hingewiesen, dass die geringere Abwasserbelastung nicht alleine auf den reduzierten Stoffeinsatz (Chemikalienverbrauch) zurückzuführen ist, sondern auch dadurch zustande kommt, dass die Haare aus dem Abwasserstrom abgetrennt werden. Hierdurch verringert sich die Abwasserbelastung und der Aufwand für die Abwasserbehandlung (Christner, 1988; UNEP, 1991).

5.2.2 Aufgabenstellung

Am Beispiel der Lederherstellung sollte geprüft werden, ob sich durch den Einsatz von Enzymen im Gerbprozess Umweltentlastungseffekte ergeben. Nach dem ursprünglichen Ansatz sollte im direkten Verfahrensvergleich die Lederherstellung mit und ohne Enzymeinsatz miteinander verglichen werden. Bei der Erarbeitung der Basisinformationen und im Gespräch mit Fachkreisen wurde aber deutlich, dass dieser Ansatz verworfen werden muss, weil die Lederherstellung ohne Enzyme gar nicht möglich ist. Das Beizen ist ohne Enzyme nicht zu bewerkstelligen. Bei anderen Prozessschritten wie Weichen und Äschern ist der Enzymeinsatz aus qualitativen und wirtschaftlichen Gründen geboten.

Aus diesem Grund sah der zweite Ansatz einen Verfahrensvergleich vor, der sich auf die beiden Prozessschritte Weichen und Äschern beschränkt und durch einen unterschiedlich hohen Enzymeinsatz gekennzeichnet ist. Der Vergleich konzentriert sich demnach auf den „haarzerstörenden“ und den „haarerhaltenden“ Gerbprozess.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass hier exemplarisch zwei Verfahren ausgewählt wurden, wohlwissend, dass weitere Verfahrensvarianten des haarzerstörenden und haarerhaltenden Gerbprozesses möglich sind. Der haarerhaltende Gerbprozess ist prinzipiell auch ohne Enzymeinsatz zu bewerkstelligen, erfordert aber eine sehr exakte Steuerung und ist sehr diffizil in der Durchführung (Nagel, 2004).

Verglichen wurden Stoffströme auf der Input- und Outputseite, wobei insbesondere die anfallenden Abfälle, Abwässer und gasförmigen Emissionen bzw. auch deren Entsorgung zu berücksichtigen waren.

5.2.3 Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien

Aus den vorgenannten Gründen und unter Berücksichtigung der Basisinformationen wurden die beiden Szenarien ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN modelliert.

Beide Szenarien betrachten die Herstellung von Polsterleder (Möbelleder) aus süddeutschem Rindsleder (Härte gleichmäßig, großflächig, wenig Hautschäden) nach dem Verfahren der Chromgerbung. Die Chromgerbung bietet sich deshalb an, weil sie in der Praxis am weitesten verbreitet ist. Eine Rückgewinnung der Chromverbindungen aus den Gerbestflotten, die zwar prinzipiell möglich ist, aber in den meisten Fällen aus Gründen der geringen Wirtschaftlichkeit nicht praktiziert wird, wurde nicht in die Modellierung einbezogen.

Der entscheidende Verfahrensschritt, der über „haarerhaltende bzw. enzymatische“ oder „haarzerstörende bzw. chemische“ Prozessführung entscheidet, ist das Äschern. Es hängt primär von der chemisch-technischen Verfahrensführung beim Äschern ab, ob der Prozess haarerhaltend oder haarzerstörend ausgeführt wird (FILK, 1993).

5.2.3.1 Szenario enzymatisches Weichen/Äschern

Dieses Szenario beschreibt die Prozessschritte Weichen und Äschern, die im bilanzierten Beispiel unter Einsatz von Chemikalien und enzymhaltigen Präparaten durchgeführt werden, wobei die Haare als Ganzes erhalten bleiben. Die sich ergebende Haarlockerung beruht auf dem hydrolytischen Abbau der Basalzellschicht der Epidermis und der äußeren Haarwurzelscheide (FILK, 1993). Beim haarerhaltenden Prozess erfolgt die Haarabtrennung aus der Flotte direkt beim Äschern, sodass die Flotte die gelösten Haare nicht wie beim haarzerstörenden Prozess in Form hoher organischer Belastung enthält. Hieraus resultieren abwasserseitige Entlastungen im Bereich von 30 % bis 40 %, wobei eine Gesamtreduktion der Schlammfracht und des CSB-Wertes von etwa 50 % anzusetzen ist (Christner, 1990). Gleichzeitig ist mit einer besseren Leder-

qualität und einer größeren Flächenausbeute (Rendement) zu rechnen (Christner, 1990; Schill+Seilacher, 2003a).

Die haarerhaltende Verfahrensführung ermöglicht es, die Haare einer stofflichen Verwertung zuzuführen. Die bedeutendste Verwertungsoption ist bei derzeitiger Marktlage die Kompostierung (Nagel und Albus, 2003)

Die Bilanzierung der beiden Verfahrensschritte erfolgte auf Basis der durchgeführten Versuche (Schill+Seilacher, 2003a) mit Enzymeinsatz beim Weichen (vgl. Abbildung 5-37).

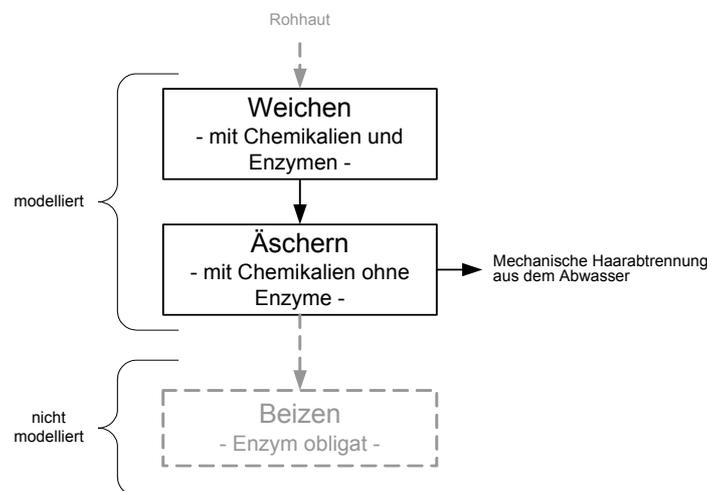


Abbildung 5-37: Prozessschema für ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

Abbildung 5-38 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN. Der Aufbau des Umberto-Modells wurde dem Bearbeitungsprozess angepasst, sodass die Auswertung der Ergebnisse differenziert nach der Herstellung der verwendeten Chemikalien, dem Weichen/Äschern sowie der Entsorgung der Reststoffe erfolgen konnte. Die Teilsysteme sind im Abschnitt 5.2.3.5 beschrieben.

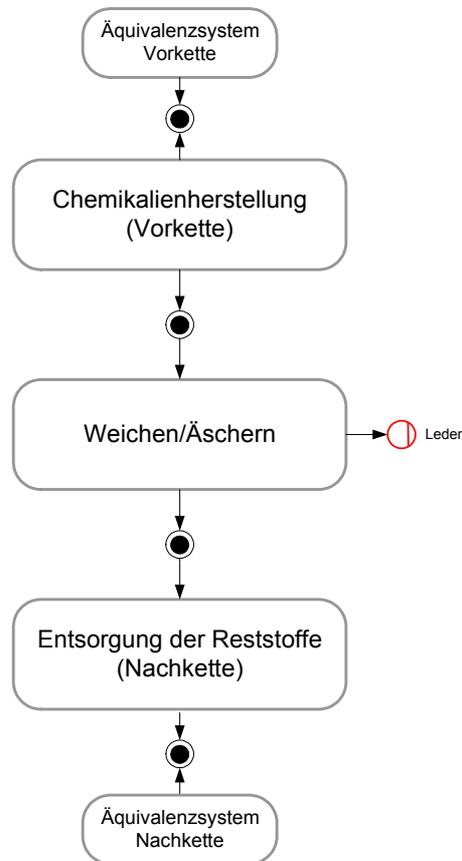


Abbildung 5-38: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

5.2.3.2 Szenario chemisches Weichen/Äschern

Beim in der Lederindustrie etablierten, haarzerstörenden System, werden die Haare in der Flotte durch den Einsatz von Sulfiden und Kalk (Kalk-Natriumsulfid) zerstört. Entscheidend für die Qualität ist, dass nur das Keratin angegriffen wird und das Kollagengeflecht unbeschädigt und sauber als Blöße erhalten bleibt. Nachteilig ist, dass Haarreste im Narben verbleiben, welche in den Blößen und auch später am Fertiglleder (Anilin, Nubuk) noch zu sehen sind. Weiterhin ist die Abwasserbelastung durch den hohen Chemikalienverbrauch sowie die darin gelösten Haare (Keratinhydrolysat) enorm hoch. Gelänge es, diesen durch den Einsatz von Enzymen zu verringern, dann wären besondere Umweltentlastungen zu erwarten (Hüsing et al., 1998).

Beim haarzerstörenden Prozess kann das Weichen unter Verwendung von Enzymen, aber auch ohne Enzyme durchgeführt werden; das Äschern erfolgt in der Praxis i.d.R. mit Enzymen, wäre aber auch ohne Enzyme zu bewerkstelligen. Die Bilanzierung der beiden Verfahrensschritte erfolgte auf Basis der durchgeführten Versuche (Schill+Seilacher, 2003a) ohne Enzymeinsatz (vgl. Abbildung 5-39).

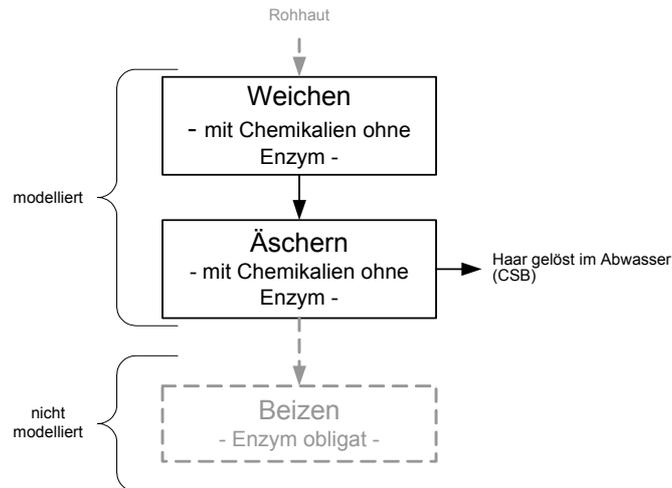


Abbildung 5-39: Prozessschema für CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

Abbildung 5-40 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN. Äquivalent zum enzymatischen Weichen/Äschern ermöglichte der Aufbau des Umberto-Modells die Auswertung der Ergebnisse differenziert nach der Herstellung der verwendeten Chemikalien, dem Weichen/Äschern sowie der Entsorgung der Reststoffe. Die Teilsysteme sind im Abschnitt 5.2.3.5 beschrieben.

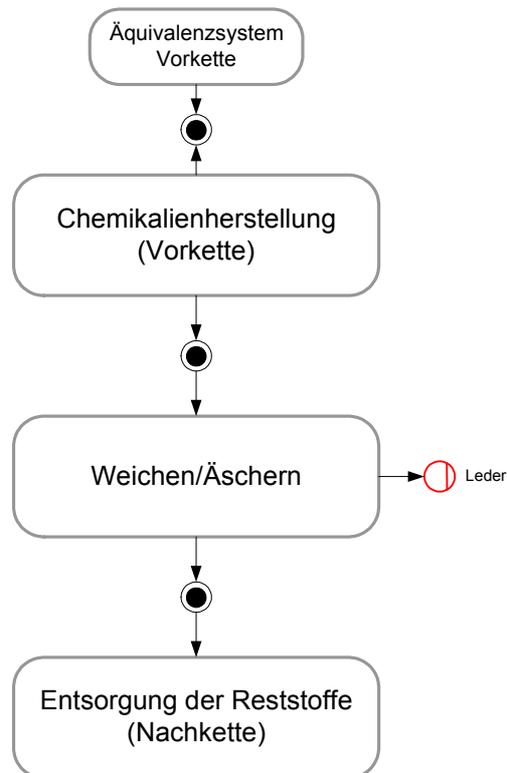


Abbildung 5-40: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

5.2.3.3 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wurde **1.000 kg Leder** als Produkt des gesamten Gerbprozesses gewählt. Dies ist gleichbedeutend mit dem Einsatz von 4.167 kg gesalzener Rohhaut (Salzgewicht), da nach Feikes (1990) aus 1 Mg gesalzener Rohhaut 240 kg Leder hergestellt werden können, was einer Ausbeute von 24 % entspricht.

5.2.3.4 Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze

Im Abschnitt 4 sind die übergreifenden, auf alle Modelle zutreffenden Systemgrenzen und Annahmen, Detailgrenzen vor- und nachgelagerter Prozesse sowie die Vorgehensweise bei der Behebung von Datenlücken und Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen beschrieben. Im Folgenden werden die wichtigsten spezifischen Anmerkungen zur Systemgrenze dieses Verfahrensvergleichs zusammengefasst.

Der Verfahrensvergleich umfasste zum Einen das Äschern, der Prozessschritt der über haarzerstörende oder haarerhaltende Verfahrensführung entscheidet. Zum Anderen wurde auch die Weiche in die Modellierung mit einbezogen, da Weichen und Äschern zum Teil in Kombination erfolgen. Das Beizen, das ohne Enzymeinsatz nicht möglich ist, ist nicht Bestandteil der Modellierung, weil bei diesem Verfahrensschritt der Enzymeinsatz unabhängig von der Art des Äscherns immer gleich ist. Alle weiteren Verfahrensschritte der Lederherstellung sowie die gesamte landwirtschaftliche Vorkette (Aufzucht und Haltung) und das Schlachten der hautliefernden Rinder wurden ebenfalls nicht modelliert, da die Aufwendungen dafür bei beiden Szenarien gleich sind. Die Systemgrenze umfasst damit bei beiden Szenarien:

- den Herstellungsprozess der verwendeten Chemikalien, Enzyme und Hilfsstoffe
- die beiden Prozessschritte Weichen und Äschern sowie
- die quantitative und qualitative Betrachtung der anfallenden Abfälle, Abwässer und gasförmiger Emissionen unter Beachtung der praxismässigen Verwertungs- und Entsorgungsoptionen

Datenlücken und Annahmen

Bei beiden Szenarien wurden verschiedene VINKOL Produkte (Handelsprodukte der Fa. Schill+Seilacher AG, Böblingen) für das Weichen und Äschern modelliert. Aufgrund nicht verfügbarer Daten konnten die Herstellungsprozesse einiger Ausgangsstoffe für die VINKOL Produkte nicht modelliert werden. Diese Prozesse sind in den Vorketten als leere Module enthalten und tragen nur mit ihrem Transporten zu den Ergebnissen bei. Aus Vertraulichkeitsgründen ist es nicht möglich, die fehlenden Ausgangsstoffe zu benennen bzw. näher zu spezifizieren.

Andere bei der Modellierung der VINKOL Produkte aufgetretene Datenlücken konnten durch Annahmen, wie z.B. über die Stöchiometrie der Reaktionsgleichung, geschlossen werden. Da die VINKOL Produkte bis auf das VINKOL A in beiden Szenarien in ähnlichen Mengenverhältnissen eingesetzt wurden, veränderten die Annahmen zwar die absoluten Ergebnisse, die relativen Unterschiede zwischen den Szenarien waren dagegen aber kaum betroffen.

Das bei der Lederherstellung anfallende Leimfleisch wird in Fettschmelzen zu Talg (fetthaltig) und Grießen (proteinhaltig) umgesetzt. Die Weiterverwendung von Talg und Grießen wurde nicht modelliert, da diese nur sehr schwierig zu definieren ist und zudem stark vom Markt abhängt.

Geografischer und zeitlicher Bezug

Der betrachtete geografische Bezugsraum wurde mit den politischen Grenzen der Bundesrepublik Deutschland gleichgesetzt. Allerdings finden die Bereitstellung einzelner (Roh-)Stoffe oder verschiedene Produktionsprozesse nicht immer bzw. nicht ausschließlich in Deutschland statt. Es wurde versucht, den Bezugsraum dann an die jeweiligen Länder anzupassen. War dies nicht möglich, wurde auch der Bezugsraum Deutschland gewählt.

5.2.3.5 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle

Die Bilanzierungsmodelle wurden in Teilsysteme unterteilt (vgl. Abbildung 5-38 und Abbildung 5-40), was eine differenziertere Auswertung der Ergebnisse ermöglichte. In diesem Abschnitt werden die Teilsysteme grafisch vorgestellt sowie bei Bedarf näher beschrieben.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Abbildungen wurden:

- Basismodule für die Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie, Bereitstellung von Energieträgern, Bereitstellung von Hilfsstoffen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung sowie
- In- und Outputströme an Roh- und Betriebsstoffen, Ausgangsstoffen unterhalb der Abschneidekriterien, Energieströme, Emissionen, Abfälle und Abwasser

nur dann dargestellt, wenn sie für das Verständnis erforderlich waren. Vollständige Bilanzierungsmodelle mit allen Teilsystemen und Basismodulen sind im Anhang dargestellt.

Die in den Abbildungen verwendeten grafischen Elemente sind in Tabelle 4-1 erläutert, die Module bzgl. Datenherkunft, Literaturquellen, Bezugsjahr, Repräsentativität, Kurzbeschreibungen, Annahmen und Vorketten sowie die Transporte bzgl. Entfernung,

Auslastung, Nutzlast und Fahrbahnanteile sind im Anhang (*Datenherkunft und -qualität* sowie *Überblick Transporte*) dokumentiert.

5.2.3.5.1 Chemikalienherstellung (Vorkette)

Während bei der Vorweiche ausschließlich Wasser eingesetzt wird, werden zur Hauptweiche verschiedenste Weichhilfsmittel zugesetzt. Es handelt sich dabei um anorganische Weichhilfsmittel wie Natriumhydroxid, Natriumsulfid, Natriumtetrasulfid und Natriumhydrogensulfit. An organischen Weichhilfsmitteln werden nichtionogene aliphatische Glykoläther- und Polyglykolesterverbindungen, sulfatierte Fettalkohole, sulfitierte aliphatische Kohlenwasserstoffe und Enzyme eingesetzt. Zusätzlich finden auch geringe Mengen an bakteriziden und fungiziden Stoffen Verwendung, die bei hohen Temperaturen oder längerer Weiche eine Schädigung der Haut verhindern sollen. Diese Produkte sind vor allem auf der Basis von chlorierten Phenolen und Kresolen, Ethanolamin und Phenylphenolat aufgebaut. Neuere Produkte sind quaternäre organische Ammoniumverbindungen, Chloracetamid und Benzothiazol (Pauckner et al., 1988).

Im Äscher werden entweder hydrolisierende oder reduktive Produkte eingesetzt. Die hydrolysierenden Produkte bewirken den Erhalt der Haare, die reduktiven deren Zerstörung. Als hauptsächlich verwendete Produkte dienen Kalkhydrat Ca(OH)_2 , Natriumsulfid, Natriumsulfhydrat und daneben noch organische Thioderivate und Enzyme.

Tabelle 5-25: Eingesetzte Stoffe/Chemikalien beim Weichen und Äschern

Produkt/Stoff	Erläuterung
Wasser	Leitungswasser
Soda	Chemische Bezeichnung: Natriumcarbonat, kohlensaures Natrium, NaCO ₃
Natron	Chemische Bezeichnung Natriumbicarbonat, Na ₂ CO ₃ bzw. Natriumhydrogencarbonat NaHCO ₃
Natriumsulfid	Na ₂ S
Schwefelnatrium	Natriumsulfid mit mind. 30% Kristallwasser
Tenside	Bezeichnung für alle waschaktiven Substanzen. Tenside werden in verschiedene Gruppen unterteilt: anionisch, kationisch, amphoter und nicht-ionisch.
Kalk	CaOH, Löschkalk, Kalkhydrat
VINKOL A*	Zubereitung mit Proteasen pH: 7,5 bis 8,5 (10%ige wässrige Lösung) / Aktivsubstanz: mindestens 98 % / Ionogenität: Anionisch <i>VINKOL A</i> ist ein enzymatisches Äscherhilfsmittel zur Verbesserung der Blößenqualität. Es entfernt unstrukturiertes Eiweiß aus der Haut und emulgiert das vorhandene Naturfett, was zu einer schnelleren und gleichmäßigeren Penetration der Äscherchemikalien führt.
VINKOL LBA*	Phosphonsäurederivate in wässriger Lösung pH: 0,5 bis 1,5 (10%ige wässrige Lösung) <i>VINKOL LBA</i> ist ein starker Komplexbildner für Kalzium und deshalb zur Verhinderung und Entfernung von Kalkablagerungen geeignet.
VINKOL MK*	Benzisothiazolinon in glykolischer Lösung pH: 7 bis 10 (10%ige wässrige Lösung) / Aktivsubstanz: 57 bis 61% / Ionogenität: Nichtionogen <i>VINKOL MK</i> ist eine Kombination ausgewählter Biozide zur umweltfreundlichen Behandlung von Häuten und Fellen, ohne AOX, PCP, Formaldehyd oder entstehende Abbauprodukte in das Leder zu bringen.
VINKOL TGV*	Organische Schwefelverbindungen mit organischen Zusätzen pH: 8 bis 10 (10%ige wässrige Lösung) <i>VINKOL TGV</i> wurde speziell zur Entfernung von ausgeprägter Epidermis in haarerhaltenden Äschersystemen entwickelt. Reduzierend wirkende Bestandteile, welche durch die Alkalität des Äscherprozesses aktiviert werden.
SILASTOL R 687*	Mischung von nichtionogenen Emulgatoren, APEO-frei pH: 5 bis 8 (10%ige wässrige Lösung) / Aktivsubstanz: Mindestens 90 % / Ionogenität: Nichtionogen <i>SILASTOL R 687</i> ist ein universell anwendbares, hochwirksames Emulgatorsystem mit breitem Anwendungsbereich. Durch seinen nichtionogenen Charakter ist es besonders geeignet für alle Prozesse der Wasserwerkstatt, wo eine besondere Säurestabilität gefordert ist.

* Handelsprodukt der Fa. Schill+Seilacher AG, Böblingen

Der Hautaufschluss erfolgt im Wesentlichen durch den Kalk bzw. dem Verhältnis Kalk zu den angeführten schwefelhaltigen Produkten. Beim reinen Enzymäscher wären weder Kalk noch schwefelhaltige Produkte notwendig. Allerdings ist der reine Enzymäscher sehr selten, da die Gefahr des Hautangriffs sehr groß ist. Als Enzyme kommen tryptische Pankreasenzyme, Pilzenzyme oder Bakterienproteasen in Frage. Zusätzliche Äscherhilfsmittel sind Natriumhydroxid, nichtionogene Emulgatoren auf Polyglykoläther- oder Polyglykolesterbasis, Fettalkoholsulfate und primäre Amine (Pauckner et al., 1988).

Aus der Vielfalt der möglichen Rezepturen wurden die in den halbtechnischen Versuchen angewandten Rezepturen APLF 2003 No. 1 (chemisch, haarzerstörend) und Tanning Tech 2001 No. 1 (enzymatisch, haarerhaltend) der Bilanzierung zugrunde gelegt (Schill+Seilacher, 2003b). Die dabei eingesetzten Produkte (Stoffströme) und die technischen Rahmenbedingungen sind in Tabelle 5-25, Abbildung 5-44 und Abbildung 5-45 dargestellt. Die Mengenangaben in Prozent beziehen sich in allen Fällen auf das Salzgewicht (Input).

In Abbildung 5-41 und Abbildung 5-42 sind die Module und Transporte im Teilsystem *Chemikalienherstellung* sowie die Verknüpfungen untereinander dargestellt.

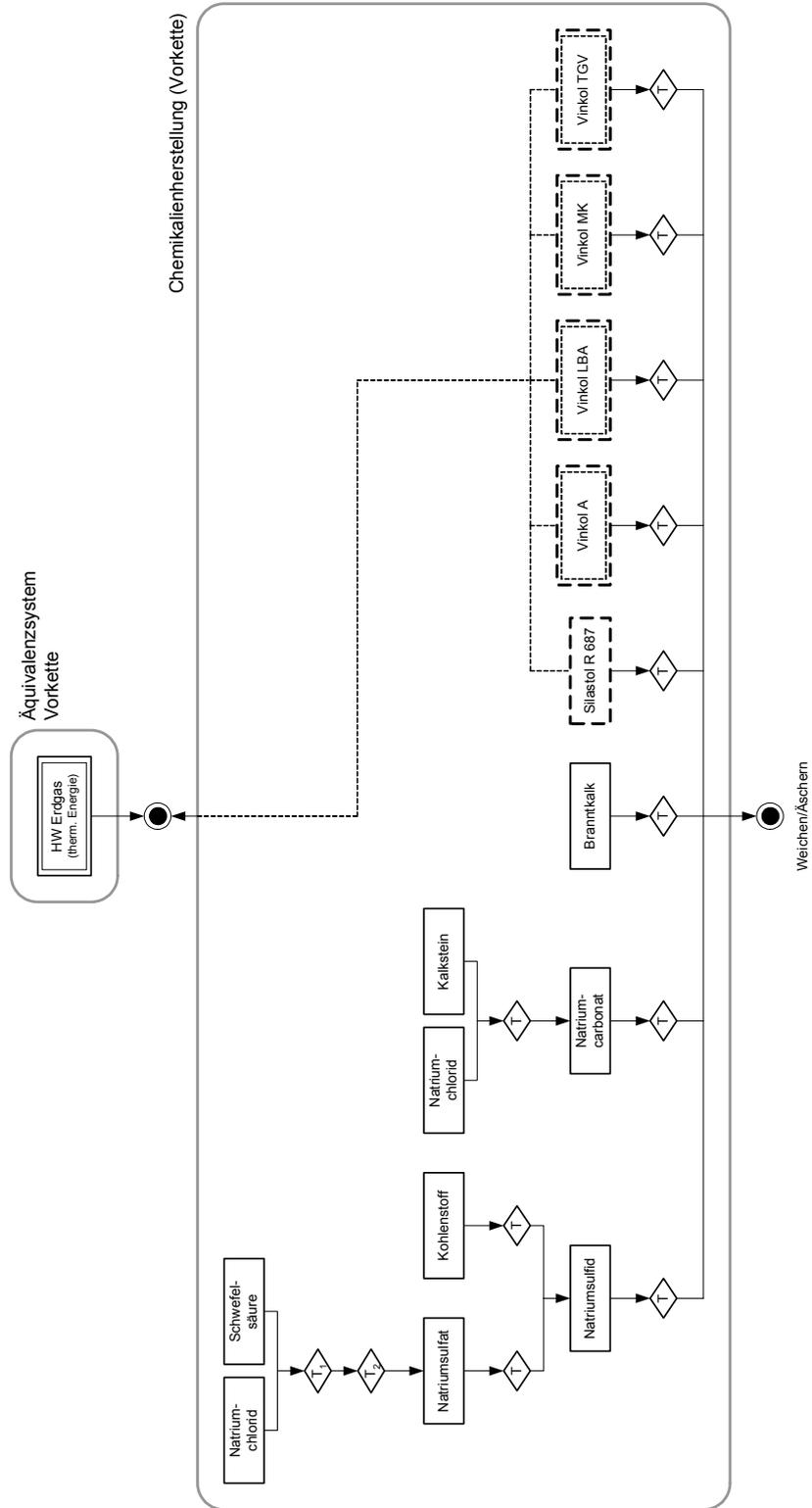


Abbildung 5-41: Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Chemikalienherstellung* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

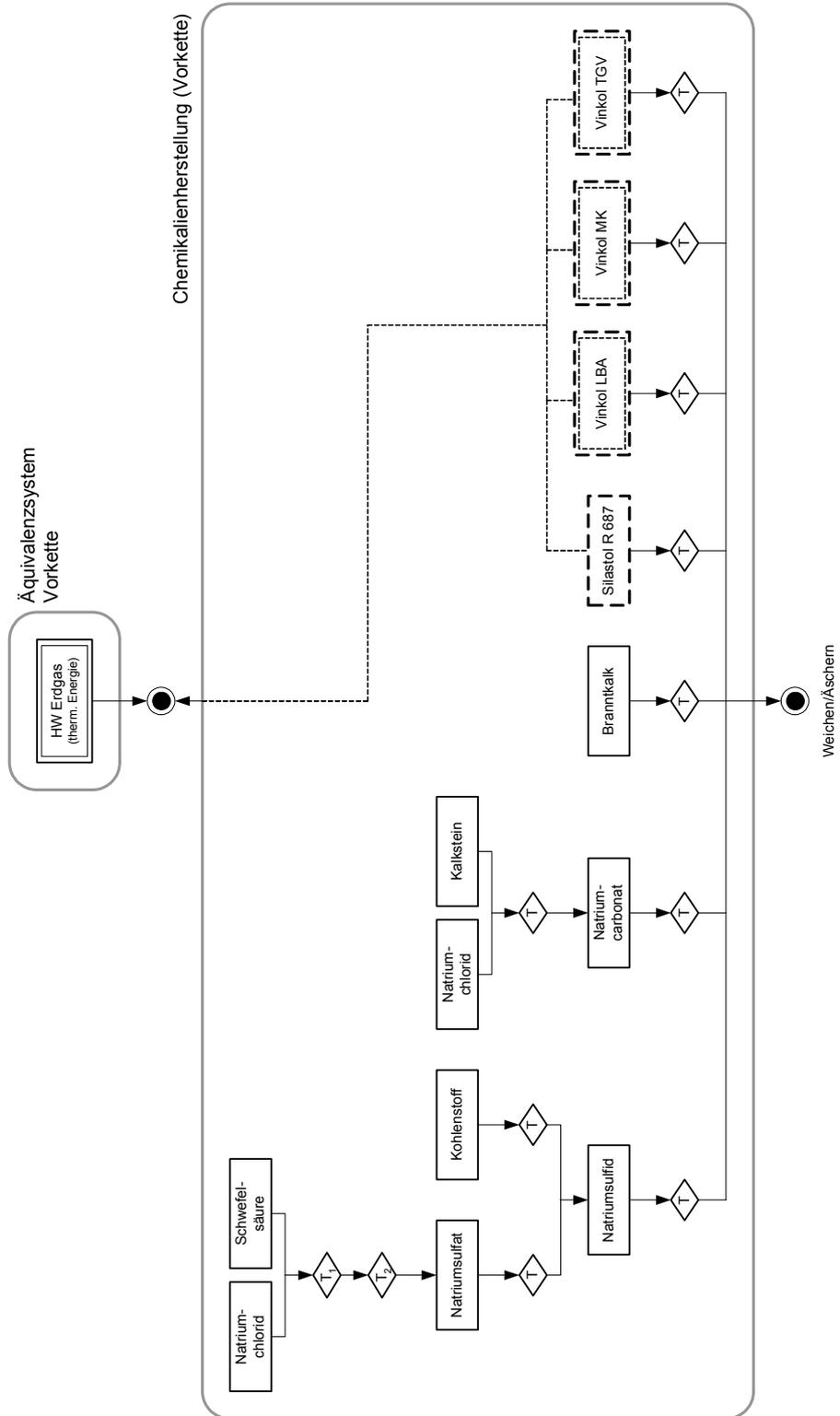


Abbildung 5-42: Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Chemikalienherstellung* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

5.2.3.5.2 Weichen/Äschern

Abbildung 5-43 zeigt eine schematische Darstellung des Umberto-Modells des Teilsystems *WEICHEN/ÄSCHERN*, das für beide Szenarien identisch ist.

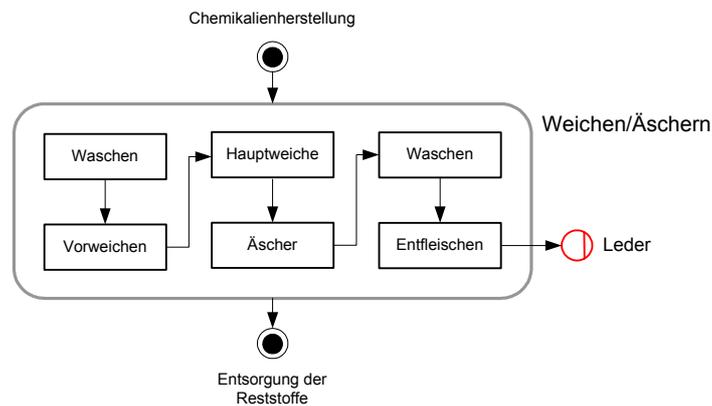


Abbildung 5-43: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *WEICHEN/ÄSCHERN*

Da die ausgewertete Fachliteratur keine ausreichenden Daten zur Bilanzierung der beiden beschriebenen Äschersysteme bereitstellte, wurden im Entwicklungslabor der Fa. Schill+Seilacher AG, Böblingen, Versuche im halbertechnischen Maßstab durchgeführt, um die notwendigen Daten für einen Verfahrensvergleich zu gewinnen. Die für die Modellierung verwendeten Daten beziehen sich auf die in diesen Versuchen verwendeten Rezepturen.

In Abbildung 5-44 und Abbildung 5-45 sind die wichtigsten Daten (Stoff- und Energieflüsse) aus den Versuchen dargestellt, aus Gründen der Vertraulichkeit aber in Materialgruppen zusammengefasst.

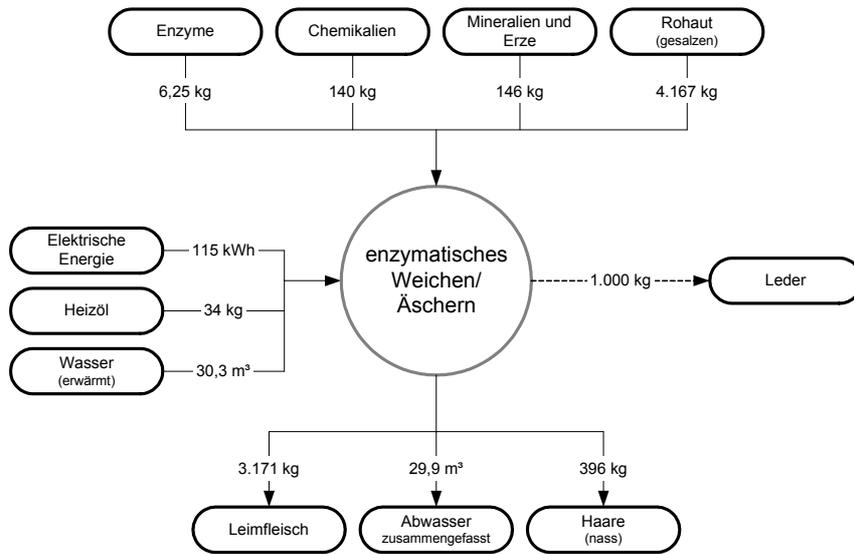


Abbildung 5-44: In-/Outputdiagramm mit den in Versuchen (im halbtechnischen Maßstab) gewonnenen Ausgangsdaten für das enzymatische Weichen und Äschern

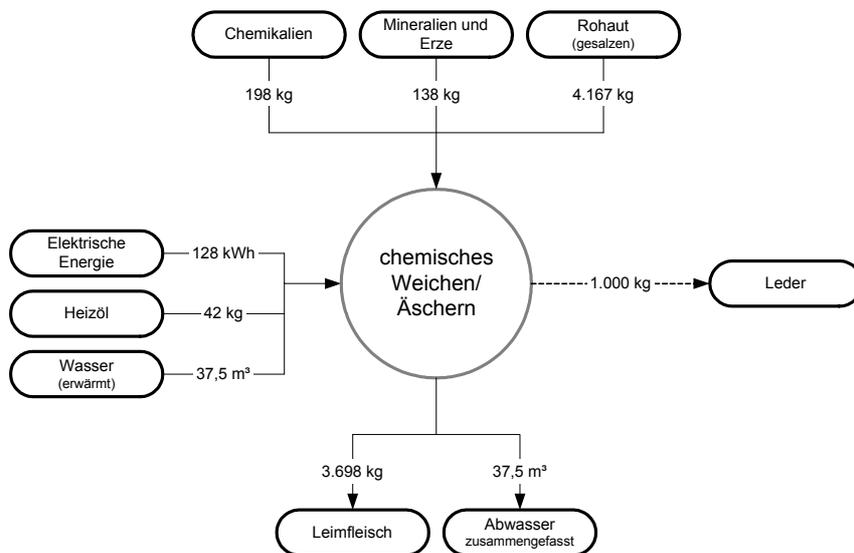


Abbildung 5-45: In-/Outputdiagramm mit den in Versuchen (im halbtechnischen Maßstab) gewonnenen Ausgangsdaten für das chemische Weichen und Äschern

Im Folgenden wird näher auf die Prozessdaten, den Wasserverbrauch, den Energieverbrauch, das Abwasser, die festen Abfälle sowie die Abluft eingegangen.

Prozessdaten des enzymatischen Weichens/Äscherns

Beim Versuch im halbtechnischen Maßstab betrug das Salzgewicht der Rohhaut 18 kg (auf dieses Gewicht beziehen sich alle nachfolgenden Prozentangaben). Durch das Vorweichen mit einer wässrigen Flotte unter Verwendung von VINKOL MK und SILASTOL R 687 erhöhte sich das Gewicht der Rohhaut auf ein Weichgewicht von 25,5 kg. Aus dem anschließenden Entfleischen resultierten:

- Entfleischgewicht: 17,6 kg
- Leimfleisch: 7,9 kg

In der Hauptweiche wurden in der wässrigen Flotte VINKOL MK, Soda und VINKOL A verwendet. Das enzymhaltige VINKOL A ist dabei unverzichtbar für den haarerhaltenden Prozess.

Das Äschern erfolgte unter Verwendung von VINKOL TGV, Kalkhydrat, Schwefelnatrium und Silastol R 687 in wässriger Lösung. Beim Nachäschern wird VINKOL LBA in wässriger Lösung eingesetzt. Aus einem Äschergewicht von 25 kg resultierten:

- Entfleischgewicht: 19,2 kg
- Leimfleisch: 5,8 kg

Der Wasserbedarf für den gesamten Prozess lag bei 680 % des Salzgewichtes, was einer Flotte von 122,4 kg und einem Schlammanfall von 0,296 kg entsprach. Leimfleisch fiel insgesamt in einer Menge von 13,7 kg an.

Der Einsatz von VINKOL A ermöglichte eine Einsparung von etwa 1,3 % bis 1,8 % Natriumsulfid, sodass nur 1,2 % Natriumsulfid eingesetzt werden mussten.

Das Versuchsprotokoll mit detaillierten Informationen zu den Arbeitsgängen, zum Chemikalien- und Wassermengen, zur Temperaturführung, zu Lauf- und Einwirkzeiten sowie zu Produkten und Abprodukten ist dem Anhang beigelegt.

Prozessdaten des chemischen Weichens/Äscherns

Beim Versuch im halbtechnischen Maßstab betrug das Salzgewicht der Rohhaut 16 kg (auf dieses Gewicht beziehen sich alle nachfolgenden Prozentangaben). Durch das Vorweichen mit einer wässrigen Flotte unter Verwendung von VINKOL MK und Natri-

umcarbonat erhöhte sich das Gewicht der Rohhaut auf ein Weichgewicht von 26 kg. Aus dem anschließenden Entfleischen resultierten:

- Entfleischgewicht: 17,0 kg
- Leimfleisch: 9,0 kg

In der Hauptweiche wurden in der Flotte SILASTOL R 687 und Natriumcarbonat verwendet. Auf den Einsatz eines enzymhaltigen Äscherhilfsmittel wurde verzichtet.

Bei einer Restflotte von 30 % erfolgte das Äschern unter Verwendung von VINKOL TGV, Natriumsulfid und Kalkhydrat sowie beim Nachäschern mit VINKOL LBA in wässriger Lösung. Aus einem Äschergewicht von 23,7 kg resultierten:

- Entfleischgewicht: 18,5 kg
- Leimfleisch: 5,2 kg

Der Wasserbedarf für den gesamten Prozess lag bei 900 % des Salzgewichtes, was einer Flotte von 144 kg und einem Schlammanfall von 0,342 kg entspricht. Leimfleisch fiel insgesamt in einer Menge von 14,2 kg an.

Durch den Verzicht auf ein enzymhaltiges Äscherhilfsmittel ist der Bedarf an Natriumsulfid beim Äschern gegenüber dem enzymatischen Weichen/Äschern (1,2 %) mit 2,5 % bis 3,0 % mehr als doppelt so groß. Diese höhere Menge an Sulfiden ist erforderlich, wenn die gleiche Lederqualität erreicht werden soll.

Das Versuchsprotokoll mit detaillierten Informationen zu den Arbeitsgängen, zu Chemikalien- und Wassermengen, zur Temperaturführung, zu Lauf- und Einwirkzeiten sowie zu Produkten und Abprodukten ist dem Anhang beigelegt.

Annahmen und Erläuterungen zu den Prozessdaten

Neuansatz Äscherflotten: Nach jedem einzelnen Arbeitsschritt wurden die Flotten ganz oder teilweise abgelassen. Es blieb dabei unberücksichtigt, dass beim gänzlichen Ablassen im Material ein gewisser Anteil der Flotte (bis 30 Prozent) zurückbleibt. Es wurde angenommen, dass die Flotte zu 100 Prozent mit den für den jeweiligen Arbeitsschritt notwendigen Anwendungsprodukten neu anzusetzen ist. Eine Kreislaufführung von Wasser fand weder in den Versuchen statt, noch wird sie im Allgemeinen in der großtechnischen Lederherstellung praktiziert.

Verhältnis Gewicht Rohhaut zu Gewicht Blöße: Beim chemischen, haarzerstörenden Äscher erfolgte ausgehend vom Rohgewicht von 16 kg eine Flüssigkeitsaufnahme um 3,2 kg auf 19,2 kg. Beim enzymatischen, haarerhaltenden Äscher betrug die Flüssigkeitsaufnahme 0,5 kg auf 18,5 kg Blößengewicht. Die Zahlenangaben deuten auf ein qualitativ besseres Äschern beim haarerhaltenden Prozess hin. Die Aussagen können jedoch keine Hinweise auf eventuelle, umweltentlastende Effekte liefern.

CSB der Entkalkungbeize: Die bestehenden Unterschiede im chemischen Sauerstoffbedarf bei der Entkalkungbeize können für einen Verfahrensvergleich im Sinn des Projektes nicht herangezogen werden, da dieser Verfahrensschritt außerhalb der gesetzten Systemgrenzen liegt. Indirekt besteht allerdings eine Auswirkung auf die Belastung des Gesamtabwassers (aller Prozessschritte).

Die Laufzeiten der Aggregate wurden in Minuten angegeben, wobei die Aggregate während der gesamten Laufzeit in Bewegung sind (Energiebedarf). Beim Äschern über Nacht wurden die Aggregate automatisiert so gesteuert, dass von 16:00 Uhr bis 7:00 Uhr, entsprechend 15 Stunden, die Aggregate pro Stunde 10 Minuten bewegt wurden (insgesamt 150 Minuten).

Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht ein wesentlicher Faktor in der Lederindustrie. Je nach Verfahrensführung schwankt er in weiten Grenzen. In den letzten Jahren konnte die Effizienz des Wassereinsatzes erhöht werden. Der effektivere Einsatz wurde zum Beispiel durch kurze Flotten, Vermeiden von Spül-, dafür Durchführen von Waschvorgängen sowie durch Flottenrecycling erreicht (Hauber und Schröder, 2002; FILK, 1993).

Nach den Ergebnissen der Versuche im halbtechnischen Maßstab lag der Wasserverbrauch je kg Rohhaut beim chemischen, haarzerstörenden Äscher bei 9 kg und beim enzymatischen, haarerhaltenden Äscher bei 7,27 kg. Der Wasserverbrauch ist damit beim haarerhaltenden Prozess unter Verwendung enzymhaltiger Präparate auf 80,8 % gefallen, was einer Minderung des Wasserverbrauchs bzw. der Abwassermenge von 19,2 % entspricht (Schill+Seilacher, 2003b).

Energie

Der Energieverbrauch einer Gerberei ist von großer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit. Die Stromkosten stehen größtmäßig an dritter Stelle hinter Wärmeverbrauch und Wasser-/Abwasserkosten (Pfisterer, 1986). Die realen Werte streuen stark. Die Aufteilung des eingesetzten elektrischen Stromes auf einzelne Fertigungsstufen ist stark vom Produktionsprogramm abhängig und kann deshalb nicht allgemein gültig dargestellt werden. Nach Angaben der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, werden in der Wasserwerkstatt 23 % vom Gesamtenergiebedarf (kWh) der Lederherstellung verbraucht. Hingegen kommen 40 % der installierten Leistung (kW) aus diesem Arbeitsbereich. Unterschiede in Bezug auf die chemische, haarzerstörende und enzymatische, haarerhaltende Verfahrensführung sind der Literatur nicht zu entnehmen. Es ist aber zu vermuten, dass beim haarerhaltenden Prozess der Energieaufwand für die Haargewinnung (erhöhte Pumpenleistung; Drehsieb) etwas über dem Energiebedarf des haarzerstörenden Prozesses liegt (Nagel, 2004).

Tabelle 5-26: Energieverbrauch in der Gerberei (Wittlinger, 2002)

	Einheit	Pro m ² Leder	Pro 100 kg Rohhaut (Salzgewicht)
Wärme	kWh	16	240
Druckluft	m ³	4	60
Elektrizität	kWh	3,5	53

In Anlehnung an die bei den Versuchen im halbtechnischen Maßstab ermittelten Laufzeiten und unter Annahme von praxisüblichen Stromverbräuchen ergab sich hinsichtlich des Energieverbrauchs folgende Situation:

Die Aggregatlaufzeiten der einzelnen Arbeitsschritte addierten sich beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN auf insgesamt 580 Minuten. Beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN ergaben sich Laufzeiten von insgesamt 520 Minuten. Die Laufzeiten sind damit beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN um ca. 10 % verringert. Der Energiebedarf für Entfleischen, Spalten und Transporteinrichtungen wurde unter der Annahme, dass dafür ein Viertel der Energie innerhalb der Wasserwerkstatt aufgewendet wird, mit 25 % zum Abzug gebracht (vgl. Tabelle 5-27). Dieser

Energiebedarf wurde aber nicht in der Bilanzierung berücksichtigt, da die Arbeitsschritte nach dem Äschern erfolgen und damit außerhalb der Systemgrenzen liegen.

Tabelle 5-27: Praxisüblicher Energieverbrauch der Prozesse Weichen und Äschern

Energiebedarf	Einheit	Enzymatischer Äscher	Chemischer Äscher
Wasserwerkstatt gesamt	kWh/Mg Rohhaut	41	41
Rohwarenbehandlung, Entfleischen und Spalten ¹	%	-25 %	-25 %
Weichen und Äschern ²	kWh/Mg Rohhaut	27,57	30,75
Laufzeiten der Fässer	min	520 (8,7 h)	580 (9,7 h)

¹ außerhalb der Systemgrenze

² innerhalb der Systemgrenze - berechnet mithilfe des Verhältnisses der Laufzeiten zwischen haarerhaltendem und -zerstörendem Äscher

Der Energieverbrauch der Wasserwerkstatt liegt bei 11,4 % des Gesamtenergiebedarfs. Bei Laufzeiten von 580 und 520 Minuten ergibt sich ein Unterschied im Energieverbrauch von 3,18 kWh. Es wird deutlich, dass der Energiebedarf innerhalb der Systemgrenzen nur unerheblich ist. Bei Antriebsleistungen der Fässer von 10 - 20 kW, je nach Umdrehungsgeschwindigkeit, könnte der Energiebedarf noch geringer als dargestellt sein und die sich ergebenden Unterschiede bezüglich der beiden Szenarien noch geringer ausfallen.

Für die Bilanzierung wird angenommen, dass das Prozesswasser durch Heißwasser (max. 16 bar, ca. 140° C) auf die benötigte Temperatur (zwischen 25°C und 28°C) erhitzt wird. Dieses Heißwasser wird in einem Kessel unter Einsatz von Heizöl erzeugt. Vor Ort wird dann mittels Misch- und Dosierstrecken das eigentliche Prozesswasser gemischt an die Fässer abgegeben. Der Einsatz alternativer Energien wird für die folgende Betrachtung nicht unterstellt.

Insgesamt wies die Warmwasserbereitstellung einen Bedarf an leichtem Heizöl von 12 l/Mg Rohware im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN in der Wasserwerkstatt. Darin enthalten sind Gebäudeheizung, die Warmwasserbereitstellung und sonstige Prozesswärme. Aufgrund fehlender Daten konnte die Warmwasserbereitstellung nicht detailliert modelliert werden. Es wurde deshalb der Heizölbedarf der Wasserwerkstatt für die Modellierung verwendet. Im Modell wurden sowohl die Bereitstellung des Heizöls als auch dessen Verbrennung in einem Kessel mit den dabei entstehenden Emissionen bilanziert.

Ein geringer Unterschied im thermischen Energiebedarf zwischen den beiden Szenarien ergab sich durch die unterschiedlichen Wassermengen, die benötigt wurden. Im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN wurden 12 L Rohöl verbraucht, um 9 m³ Wasser zu erwärmen, im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN wurden dagegen nur 9,69 L Rohöl verbraucht, um die notwendigen 7,27 m³ Wasser zu erwärmen.

Abwassermenge und -belastung

Da im Bereich der Wasserwerkstatt aus Qualitätsgründen keine Wässer recycelt werden, ist die Abwassermenge gleich der verbrauchten Wassermenge zu setzen. Dass dabei ein gewisser Anteil der Flottenflüssigkeit dem Produkt anhaften bleibt, wurde als Ungenauigkeit hingenommen und blieb bei der Bilanzierung unberücksichtigt. Die Abwassermenge betrug damit je kg Rohhaut beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 7,27 kg und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 9 kg (Schill+Seilacher, 2003b). Damit ergab sich beim enzymatischen Äschen ein Abwasserminderungspotential (Äscherflotte) von 19,2 %.

Bei 1 Mg Rohhaut lag die organische Belastung der Äscherflotte, gemessen als Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), beim chemischen, haarzerstörenden Äscher bei 69.242 mg/LSauerstoff und beim enzymatischen, haarerhaltenden Äscher bei 52.622 mg/LSauerstoff. Der CSB war damit beim haarerhaltenden Prozess unter Verwendung enzymhaltiger Präparate auf 76 Prozent gefallen, was einer Minderung der Abwasserbelastung von 24 % gleichkommt.

Auch hinsichtlich des Prozessschlammanfalls ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen enzymatischer und chemischer Verfahrensführung. Je 1 Mg Rohhaut fiel beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN eine Schlammmenge von insgesamt 0,342 kg an, was 21,4 g/kg Rohhaut entsprach. Beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN war der Schlammanfall um 23,4 % auf insgesamt 0,296 kg, entsprechend 16,4 g/kg Rohhaut, vermindert.

Die Daten zur Abwassermenge und -belastung sind in Tabelle 5-28 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 5-28: Abwasserbelastungen, die für die Modellierung der Abwassereinigung verwendet wurden (Schill+Seilacher, 2003b)

	Einheit	ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN
CSB	mg O ₂ /kg Rohhaut	52.622	69.242
Schlammfall	g/kg Rohhaut	16,4	21,4
Abwasseranfall	kg/kg Rohhaut	7,28	9,0
CSB berechnet	mg O ₂ /kg Abwasser	7.288,3	7.693,6

Feste Abfälle

Der Gesamtabfall bei der Lederherstellung umfasst neben den ungegerbten Abfällen aus der Wasserwerkstatt auch gegerbte Abfälle, die im feuchten oder trockenen Zustand anfallen. Die gegerbten Rückstände können in chromfreie und chromhaltige Rückstände unterteilt werden. Die anfallenden Abfallmengen und das Verhältnis der Abfallarten zueinander sind abhängig von der Arbeitsweise jedes einzelnen Betriebes, von der eingearbeiteten Rohware und von den hergestellten Lederarten (Zissel, 1988).

Im Sinne des zu betrachtenden Verfahrensvergleichs kam hinsichtlich fester Abfälle dem Leimfleisch in beiden Szenarien und den ungelösten Haaren beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN die Hauptbedeutung zu. Andere feste Abfälle waren im Hinblick auf die Aufgabenstellung mengenmäßig irrelevant und konnten daher vernachlässigt werden oder fielen unabhängig von der Prozessführung in etwa gleicher Menge an.

Leimfleisch

Nach den Ergebnissen der Versuche im halbtechnischen Maßstab betrug der Leimfleischanfall je kg Rohhaut beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 0,89 kg und beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 0,76 kg. Dies entspricht einer Minderung des mengenmäßigen Anfalls um 14,6 %. Der höhere Leimfleischanteil beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN deutet auf eine prallere Haut, eventuell mit vermehrtem Haaranteil. Dies ist zumindest in der Tendenz als Qualitätsnachteil zu werten (Schill+Seilacher, 2003b; Nagel, 2004).

Leimfleisch (Leimleder) ist als Nebenprodukt der Lederherstellung zu verstehen, dessen Verwertung je nach Marktsituation Kosten verursacht, kostenneutral ist oder eine Wertschöpfung in geringerem Umfang erbringt. Die Verwertung erfolgt in Fettschmel-

zen oder in der Gelatineherstellung. Leimfleisch ist deshalb kein Abfall, dennoch ist eine Verminderung des Anteils positiv zu werten, weil ein größerer Anteil des Inputs (Haut) sich im Endprodukt Leder wieder findet (Binder, 2004; Nagel, 2004). Das Leimfleisch setzt sich zu 80 % aus Wasser und 20 % Trockensubstanz, davon 35 % Fett, 15 % Mineralstoffe und 50 % Protein, zusammen.

Haaranfall beim Abtrennen aus der Äscherflotte

Während beim chemischen Weichen/Äschern die Haare in mehr oder weniger gelöster Form als organische Belastung im Abwasserstrom zu finden sind, fallen beim enzymatischen Weichen/Äschern die Haare mehr oder weniger als Ganzes an. Für ein Salzgewicht der Rohhaut von 18 kg fielen bei den Versuchen im halbtechnischen Maßstab 1,71 kg nasse Haare an, was einem Trockengewicht von 0,376 kg entspricht.

Abluft - gasförmige Emissionen

In den einzelnen Stadien der Lederherstellung können in unterschiedlichem Maße Emissionen auftreten und die Beschaffenheit der Umgebungsluft beeinflussen. Beim Weichen und Äschern wird im alkalischen Bereich Ammoniak abgegeben, das aus der hydrolytischen Spaltung der Amide der Aminosäuren stammt. Die Abgabe von Schwefelwasserstoff ist im alkalischen Milieu minimal, sodass in einer gut belüfteten Wasserwerkstatt die MAK-Werte garantiert unterschritten sind (Feikes, 1990). Dies wird auch belegt durch Angaben aus der Praxis (Bader, 2003) mit dem Hinweis, dass schwefelwasserstoffhaltige Flüssigprodukte in geschlossenen Systemen gehandhabt werden. Auch wenn die gasförmigen Emissionen im Allgemeinen unproblematisch sind, so ist es doch als positiv zu bewerten, dass bei Einsatz von Enzymen oder anderer sulfidfreier Enthaarungsmittel das Risiko einer Schwefelwasserstoffbildung geringer wird.

Da weder aus der Literatur, noch aus Praxismessungen quantitative Daten zu gasförmigen Emissionen vorlagen, konnten eventuelle Unterschiede der beiden Szenarien bei der Modellierung nicht deutlich gemacht werden.

5.2.3.5.3 Entsorgung der Reststoffe (Nachkette)

In Abbildung 5-46 und Abbildung 5-47 sind die Bilanzierungsmodelle für das Teilsystem *Entsorgung* der beiden Szenarien dargestellt.

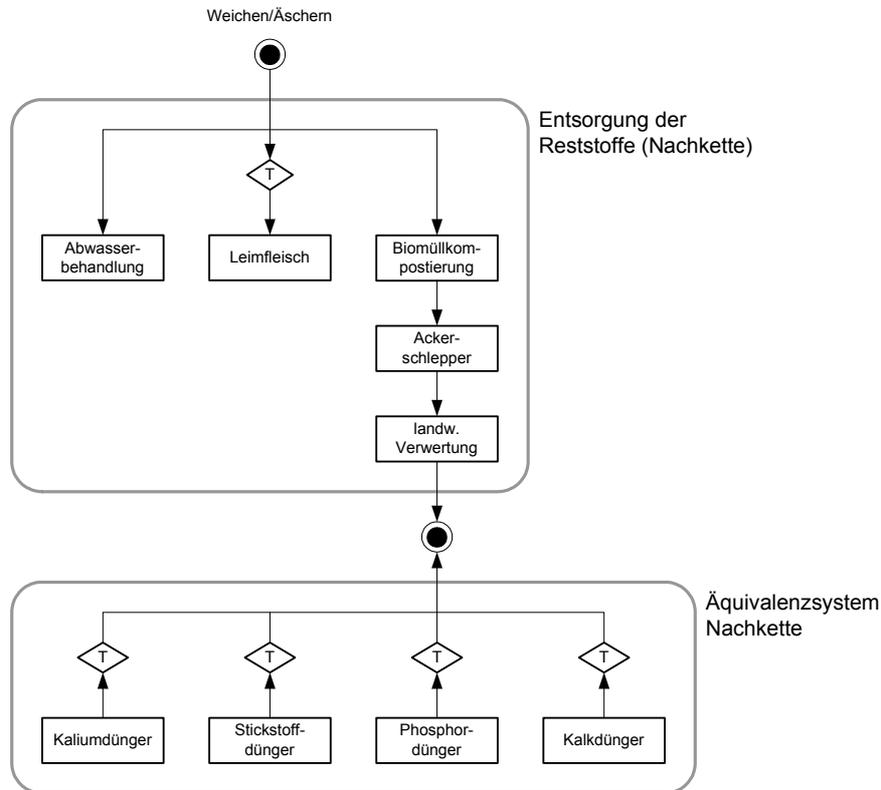


Abbildung 5-46: Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Entsorgung* inklusive des Äquivalenzmodells

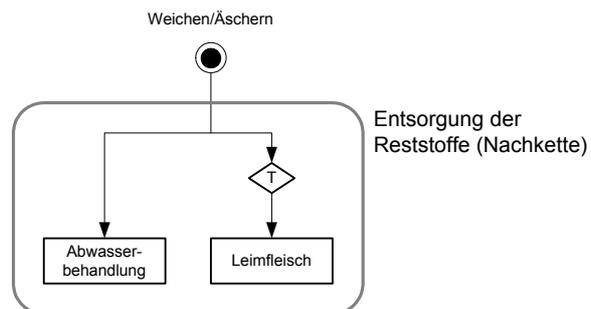


Abbildung 5-47: Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Entsorgung*

Aufgrund der hohen organischen Fracht (CSB von 2000 bis 5000 mg/l) müssen Gerbereiabwässer mechanisch, chemisch und biologisch behandelt werden, bevor sie in ei-

nen Vorfluter eingeleitet werden können. Ein gewisser Stapelraum ist hierbei unerlässlich, weil die Abwässer nicht kontinuierlich anfallen.

Eine Reinigung kann zum Einen chemisch-mechanisch im Gesamtstrom erfolgen, wobei das bei der Gerbung nicht gebundene Chrom nahezu vollständig in den Gerbereischlamm gelangt. Zum Anderen kann eine Behandlung im Teilstromverfahren Chrom beispielsweise zu 95 % bis 99 % zurückgewonnen und der Gerbstoffverbrauch um 20 % bis 30 % gesenkt werden. Gleichzeitig wird die Menge und der Gehalt chromhaltigen Gerbereischlammes drastisch vermindert (FILK, 1998). Bei der Teilstrombehandlung der Abwässer, insbesondere der Äschereiabwässer, bietet sich auch eine Entsulfidierung (katalytische Sulfoxidation oder Eisensulfatverfahren) an, um die Bildung von Schwefelwasserstoff bei niedrigen pH-Werten zu unterbinden (Fürst, 1992).

Die Modellierung der Abwasserbehandlung erfolgte unter Verwendung von Literaturangaben und Daten aus der Gerbereipraxis. Es wird von einer Teilstrombehandlung ausgegangen. Abwässer, die in chromfreien Prozessschritten (Vorweichen, Hauptweiche/Äscher, Waschen und Entkälken/Beizen) anfallen, werden in einem Teilstrom A behandelt. Mit Chrom versetzte Abwässer, ab den Prozessschritten Pickeln und Gerben über Abwelken, chromhaltige Nachgerbung, Neutralisation, Fettung, Färbung bis hin zur Fertigware, werden in einem eigenen Teilstrom B geführt, der außerhalb der Systemgrenzen liegt und deshalb nicht weiter betrachtet werden soll. Das Verhältnis von Teilstrom A zu Teilstrom B liegt bei etwa 2 : 1.

Das Abwasser des Teilstroms A gelangt mit dem Abwasser ohne Vorbehandlung in die werkseigene mechanisch-biologische Kläranlage. Sulfid wird simultan durch Oxidation mit Luftsauerstoff aus dem Abwasser entfernt. Im Wesentlichen erfolgt die Oxidation über die Zwischenstufe Schwefel zu Sulfat. Aufgrund des hohen Kalkgehalts des Abwassers entsteht daraus CaSO_4 (Gips).

Der anfallende Klärschlamm wird mittels Eisen-III-Chlorid und Kalk (Kalkmilch 10%ig bis 12%ig) konditioniert und anschließend über eine Kammerfilterpresse entwässert.

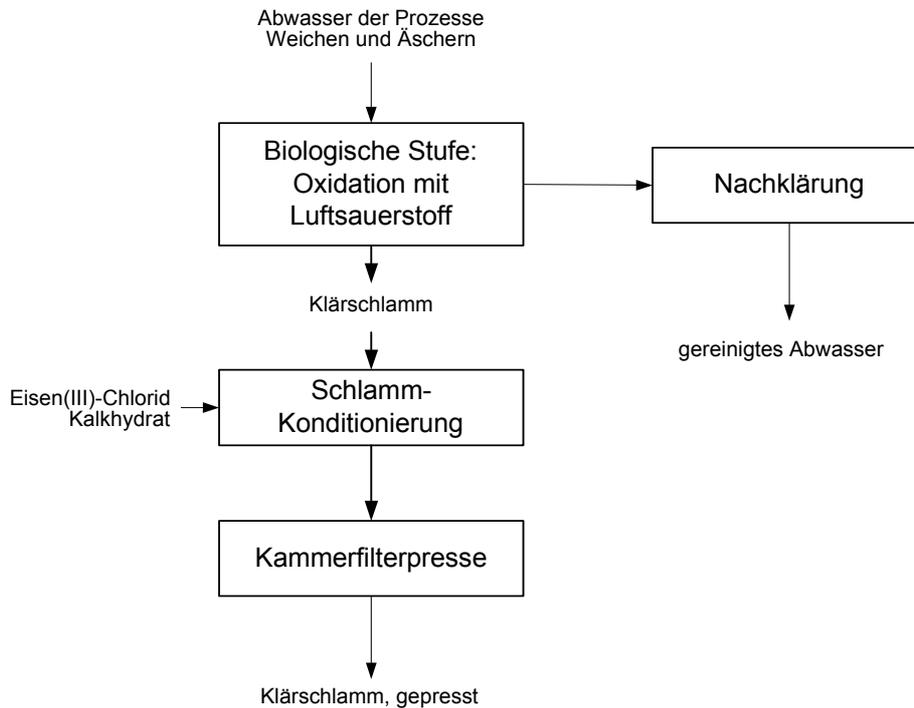


Abbildung 5-48: Ablaufschema der Abwasserbehandlung des chromfreien Abwasser-Teilstromes A

Die Ablaufwerte und Abbauraten für die Kläranlage wurden von Bader (2003) zur Verfügung gestellt. Eine nähere Beschreibung ist aus Gründen der Vertraulichkeit nicht möglich.

Das beim Weichen und Äschern anfallende Leimfleisch wird zur Fettschmelze transportiert. Aufgrund unzureichender Datengrundlage wurden die Massenströme, die in der Fettschmelze aus dem Leimfleisch entstehen, vernachlässigt. In der Fettschmelze wird das Leimfleisch zu Talg, dem fetthaltigen Bestandteil des Leimfleisches, und zu Grießen, dem proteinhaltigen Bestandteil, umgesetzt. In Tabelle 5-33 sind die entsprechenden Massenströme zusammengefasst.

Die im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN anfallenden Haare werden in einer Kompostierungsanlage genutzt und anschließend landwirtschaftlich verwertet (Düngung von Feldern). Die im Kompost enthaltenen Nährstoffe werden als Systemnutzen angesehen und in einem Äquivalenzsystem verrechnet, indem synthetisch hergestellte Düngemittel (Handelsdünger) substituiert werden.

5.2.3.5.4 Äquivalenzsysteme

In Tabelle 5-29 sind die Zusatznutzen aus den beiden Szenarien sowie die dadurch substituierten Materialien und Endenergien aus Primärrohstoffen zusammengefasst. Die konventionellen Herstellungs- bzw. Produktionsprozesse zu den aufgeführten Zusatznutzen sind im Anhang (Datenherkunft und -qualität) dokumentiert.

Tabelle 5-29: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen

Zusatznutzen aus beiden Szenarien	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Energiegutschrift aus der Methanolherstellung ¹⁾	Thermische Energie aus einem Heizwerk Erdgas	1,0
Zusatznutzen aus dem Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
CaO-Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung des Kompost ²⁾	Kalkdünger	1,0
K-Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung des Kompost ²⁾	Kalium-Dünger	1,0
P ₂ O ₅ -Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung des Kompost ²⁾	Phosphor-Dünger	1,0
N-Dünger aus der landwirtschaftlichen Verwertung des Kompost ²⁾	Stickstoff-Dünger	1,0

¹⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Chemikalienherstellung)

²⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Entsorgung der Reststoffe)

5.2.4 Vergleich der Bilanzierungsergebnisse

5.2.4.1 Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle inputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 5-3 neben dem Wasserbedarf die Stoff- und Energieeinsätze zusammengefasst, die für die Auswertung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten inputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Tabelle 5-30: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN
<i>Kumulierter Energieaufwand</i>			
KEA fossil	MJ	7.765	9.239
KEA regenerativ	MJ	30	31
KEA Kernkraft	MJ	1.065	1.187
KEA Wasserkraft	MJ	19	19
KEA sonstige	MJ	9,5	8,9
<i>Fossile Energieträger</i>			
Erdöl	kg	82	101
Erdgas	kg	52	52
Steinkohle	kg	52	74
Braunkohle	kg	103	114
<i>Mineralische Rohstoffe</i>			
Kalkstein	kg	297	289
Natriumchlorid	kg	79	116
Rohkali	kg	-6,8	-
Rohphosphat	kg	1,8	2,8
Schwefel	kg	19	36
<i>Wasserbedarf</i>			
Grundwasser	m ³	0,0024	0,0019
Kühlwasser	m ³	54	63
Wasser (Kesselspeise)	m ³	13	15
Wasser (Prozess)	m ³	0,032	0,033
Wasser, unspezifisch	m ³	0,96	1,37
<i>Naturraum</i>			
Fläche K7	m ²	0,003	0,004

Negative Werte: „Einsparung“ durch die Verrechnung von Gutschriften

Die Werte der Tabelle zeigen, dass beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN der Aufwand an KEA fossil (Energie aus fossilen Energieträgern) um knapp 20 % sowie an KEA Kernkraft (Kernenergie) um gut 10 % niedriger ist als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN wird fast doppelt so viel Steinkohle und mehr als 20 % mehr Erdöl benötigt als im Szenario ENZYMATISCHES WEI-

CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN. Für Braunkohle und Rohgas ist der Bedarf im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN nur geringfügig größer bzw. gleich.

Die Beanspruchung mineralischer Ressourcen zeigt, dass für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zum Teil deutlich mehr Natriumchlorid, Rohphosphat und Schwefel benötigt wird. Der Unterschied ist besonders bei Schwefel stark ausgeprägt, was auf den erhöhten Einsatz von Natriumsulfid anstelle des enzymhaltigen VINKOL A zurückzuführen ist. Die anderen mineralischen Ressourcen liegen in ähnlichen Mengenbereichen.

Abgesehen vom Grundwasser, was mengenmäßig eine untergeordnete Rolle spielt, wird im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN deutlich mehr Wasser verbraucht.

Im folgenden Abschnitt wird näher auf den Energiebedarf (KEA gesamt) eingegangen. Es sind die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend wurden die signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

5.2.4.2 KEA gesamt

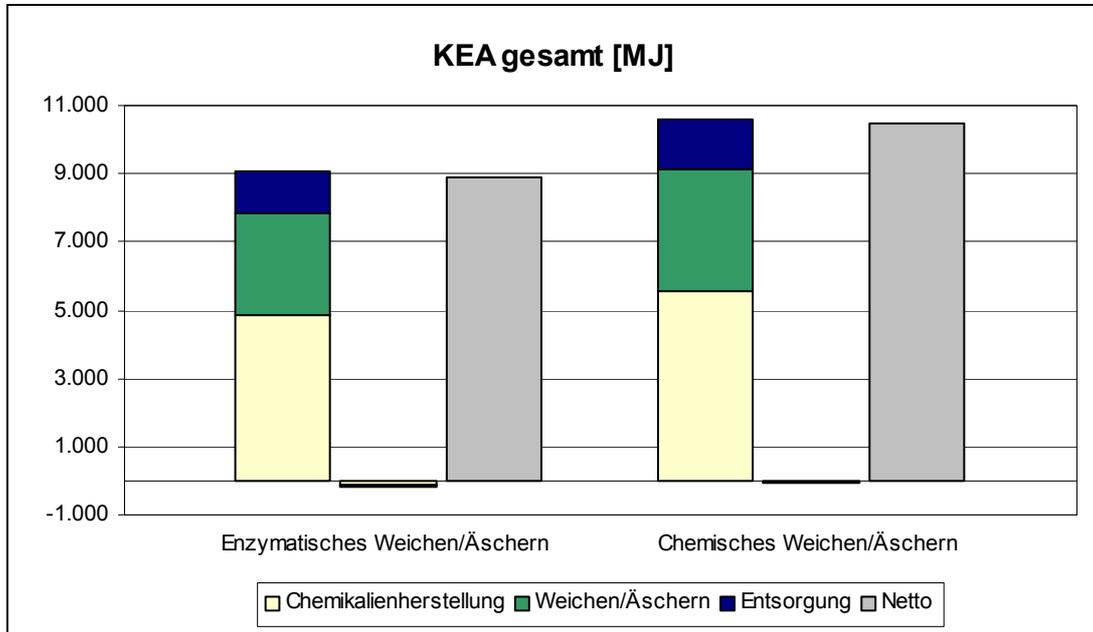


Abbildung 5-49: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-49 zeigt, dass der Energieverbrauch im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN etwas höher ist als im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Brutto-Ergebnis

Die prozentuale Aufteilung des Brutto-Ergebnisses auf die Teilprozesse ist bei beiden Szenarien gleich. Jeweils 53 % des KEA gesamt ist auf den Energiebedarf für die Chemikalienherstellung zurückzuführen. Einen großen Anteil daran hat die Herstellung von Natriumsulfid, Vinkol TGV und MK sowie Branntkalk. Da das Brutto-Ergebnis beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höher ist als beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN, ist auch der jeweilige absolute Beitrag der Teilprozesse im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sowohl eine geringfügig andere Zusammensetzung der Chemikalien als auch eine etwas erhöhte Menge an Chemikalien benötigt wird.

Etwa ein Drittel des KEA gesamt trägt das Weichen und Äschern zum Brutto-Ergebnis bei. Auch hier weist das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN einen höheren absoluten Beitrag auf, da einerseits die Laufzeit der Aggregate länger ist und die benötigte Wassermenge höher ist. Daraus ergibt sich sowohl ein höherer Verbrauch an elektrischer als auch an thermischer Energie sowie auch eine höherer Abwassermenge.

Die restlichen 14 % des KEA gesamt entfallen auf die Entsorgung der Reststoffe und sind dort hauptsächlich für die Bereitstellung von elektrischer Energie aufzubringen.

Tabelle 5-31: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt

Modul	Anteil	
<i>Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ¹⁾	1,76 GJ	19 %
Vinkol TGV ²⁾	1,37 GJ	15 %
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	1,24 GJ	14 %
Natriumsulfid ²⁾	1,18 GJ	13 %
Branntkalk ²⁾	0,87 GJ	10 %
Vinkol MK ²⁾	0,58 GJ	6 %
Strommix - elektrische Energie ³⁾	0,58 GJ	6 %
<i>Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Natriumsulfid ²⁾	2,49 GJ	24 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ¹⁾	2,18 GJ	21 %
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	1,38 GJ	35 %
Vinkol TGV ²⁾	1,09 GJ	10 %
Branntkalk ²⁾	0,82 GJ	8 %
Strommix - elektrische Energie ³⁾	0,68 GJ	6 %

¹⁾ Teilsystem Weichen/Äschern

²⁾ Teilsystem Chemikalienherstellung

³⁾ Teilsystem Entsorgung der Reststoffe

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-49).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 2 % auf einen KEA gesamt von 8,89 GJ für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und
- weniger als 1 % auf einen KEA gesamt von 10,49 GJ für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Wie Tabelle 5-31 zeigt, wird das Netto-Ergebnis beider Szenarien zum größten Teil durch den KEA fossil sowie zu einem geringeren Anteil durch den KEA Kernkraft bestimmt.

Fazit: Der Energiebedarf für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder ist beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN ca. 15 % niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

5.2.4.3 Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle outputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 5-32 neben dem Abfall- und Abwasseraufkommen die Luft- und Wasseremissionen zusammengefasst, die für die Auswertung der UBA-Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Ozonbildung sowie Humantoxikologie und Ökotoxikologie notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten outputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Die Werte der Tabelle zeigen, dass das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN für fast 2/3 der aufgeführten Luftparameter geringere Emissionen aufweist. Für gut 1/3 der Luftparameter verursacht das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höhere Emissionen. Bei sechs Luftparametern fällt die Mehr-/Minderemission mit max. $\pm 6\%$ aber gering aus.

Bezogen auf den Stoffeintrag ins Wasser zeigt sich ein ähnliches Bild wie für die Luftemissionen. Auch hier weist das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN für fast 2/3 der aufgeführten Wasserparameter niedrigere Emissionswerte auf. Für gut 1/3 der

Wasserparameter verursacht das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höhere Emissionen, wobei aber die Mehremission für Chrom mit + 10 % gering ausfällt.

Tabelle 5-32: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN
<i>Emissionen in die Luft</i>			
Ammoniak	g	8,1	16
Benzo(a)pyren	g	0,0003	0,0003
Benzol	g	2,6	3,3
Blei	g	0,01	0,01
Cadmium	g	0,004	0,005
Chlorwasserstoff	g	20	22
Dieselpartikel	g	32	42
Distickstoffmonoxid	g	19	30
Fluorwasserstoff	g	0,97	1,1
Formaldehyd	g	8,8	11
Kohlendioxid, fossil und unspezifisch	g	675800	835746
Kohlenmonoxid	g	3133	3064
Methan	g	1022	1398
NMVOC	g	132	171
NOx	g	1541	1826
PAH	g	0,002	0,003
Perfluorethan	g	0,0000005	0,0000005
Perfluormethan	g	0,00003	0,00003
Schwefeldioxid	g	1208	1675
Schwefelwasserstoff	g	0,08	0,07
Staub	g	555	701
VOC	g	737	693
<i>Emissionen ins Wasser</i>			
Ammonium	g	64	73
AOX	g	4,8	6,0
Blei	g	0,14	0,18
Chlorid	g	6081	9691
Chrom	g	0,15	0,14

	Einheit	ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN
CSB	g	6344	7035
Fluorid	g	0,24	0,19
Kohlenwasserstoffe, halog.	g	0,00000002	0,00000003
Kohlenwasserstoffe, sonst.	g	0,74	0,24
Nitrat	g	2043	2561
PAH	g	0,000000003	0,000000003
Phosphat	g	0,41	0,02
Phosphorverb. als P	g	6,0	7,5
Stickstoffverb. als N	g	0,10	0,12
Stickstoffverb., unspezifisch	g	0,92	1,3
Sulfid	g	0,40	0,34
Zink	g	0,05	0,04
Zinn	g	0,000009	0,00001
<i>Abfallaufkommen</i>			
Abfälle zur Beseitigung	kg	3,1	4,4
Abfälle zur Verwertung	kg	411	543
Abfälle ohne Zuordnung	kg	0,92	0,67
Abraum	kg	912	1018
<i>Abwasseraufkommen</i>			
Abwasser (Kesselschlammung)	m ³	13	15
Abwasser (Kühlwasser)	m ³	19	21
Abwasser (Prozess)	m ³	0,002	0,003
Abwasser geklärt	m ³	30	38
Abwasser sonstige	m ³	0,32	0,002
Wasserdampf	m ³	33	38

Beim Abfallaufkommen wie auch beim Abwasseraufkommen sind die Werte aller Parameter bis auf einen für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN größer als beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Aufgrund unzureichender Datengrundlage wurden die Massenströme, die aus der Fettschmelze des Leimfleisches entstehen, vernachlässigt. Das Leimfleisch besteht aus 80 % Wasser. In der Fettschmelze wird das Leimfleisch zu Talg, dem fetthaltigen Be-

standteil des Leimfleisches, und zu Grießen, dem proteinhaltigen Bestandteil, umgesetzt. In Tabelle 5-33 wird deutlich, dass diese Massenströme für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höher sind als für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Tabelle 5-33: Quantifizierung des Inputs und der Rückstände aus der Fettschmelze bezogen auf die funktionelle Einheit (Nettoergebnisse)

	Einheit	ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN	CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN
Leimfleisch	kg	3171	3698
Talg	kg	222	259
Grießen	kg	317	370

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die oben genannten Wirkungskategorien eingegangen. Es sind die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend hinsichtlich signifikanter Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

5.2.4.4 Treibhauseffekt

Abbildung 5-50 zeigt, dass im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN mehr treibhausrelevante Emissionen entstehen als im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

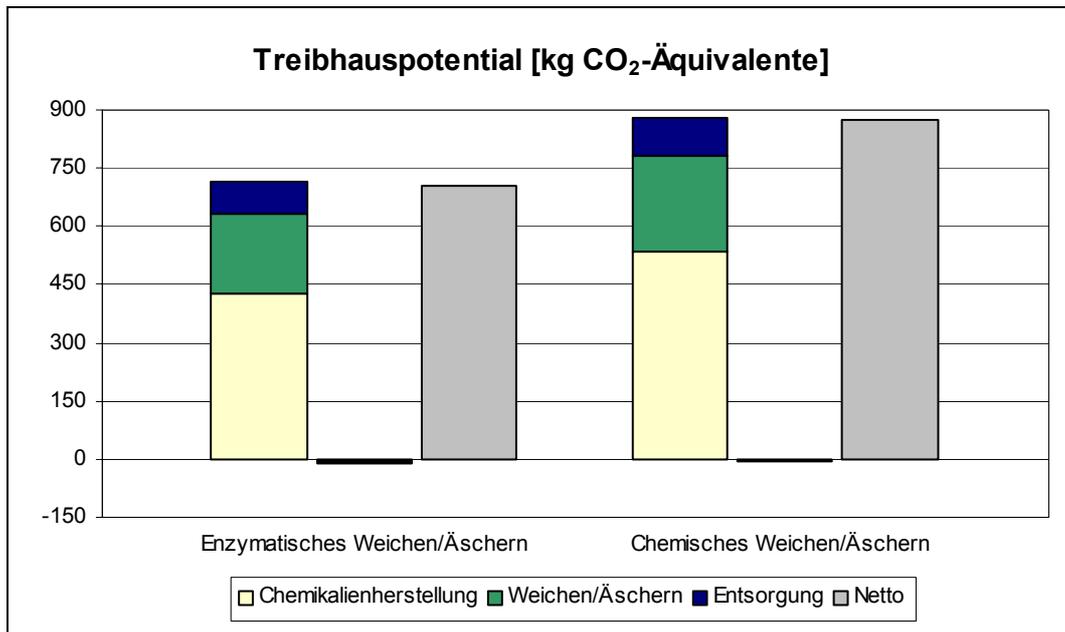


Abbildung 5-50: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Brutto-Ergebnisse

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien überwiegend durch Emissionen aus der Chemikalienherstellung bestimmt. Beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN stammen 60 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 61 % der CO₂-Äquivalente aus diesem Teilsystem. In beiden Szenarien sind dafür hauptsächlich die Herstellungsprozesse für Branntkalk, Natriumsulfid und Vinkol TGV verantwortlich, jedoch in unterschiedlichen Größenordnungen.

Knapp 30 % der restlichen CO₂-Äquivalente werden durch das Weichen und Äschern hervorgerufen. Die Emissionen entstehen dort fast ausschließlich bei der Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie.

Emissionen aus der Entsorgung der Reststoffe haben den geringsten Anteil an den Brutto-Ergebnissen. Im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN entfallen 12 % und im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 11 % auf dieses Teilsystem.

Tabelle 5-34: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Brantkalk ¹⁾	181 kg CO ₂ -Äqu.	25 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ²⁾	128 kg CO ₂ -Äqu.	18 %
Natriumsulfid ¹⁾	123 kg CO ₂ -Äqu.	17 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	76 kg CO ₂ -Äqu.	11 %
Vinkol TGV ¹⁾	68 kg CO ₂ -Äqu.	9 %
<i>Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Natriumsulfid ¹⁾	261 kg CO ₂ -Äqu.	30 %
Brantkalk ¹⁾	171 kg CO ₂ -Äqu.	19 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ²⁾	159 kg CO ₂ -Äqu.	18 %
Strommix - elektrische Energie ²⁾	85 kg CO ₂ -Äqu.	11 %
Vinkol TGV ¹⁾	54 kg CO ₂ -Äqu.	6 %

¹⁾ Teilsystem Chemikalienherstellung

²⁾ Teilsystem Weichen/Äschern

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien unterscheiden sich unerheblich voneinander, da nur geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-50).

Netto-Ergebnisse

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 2 % auf ein Treibhauspotential von 703 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und
- weniger als 1 % auf ein Treibhauspotential von 874 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Das Treibhauspotential wird bei beiden Szenarien zu 96 % durch Kohlendioxidemissionen gebildet. Die restlichen CO₂-Äquivalente verteilen sich auf Methan- und Distickstoffmonoxidemissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder ist die Emission an CO₂-Äquivalenten beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN ca. 20 % niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

5.2.4.5 Versauerung

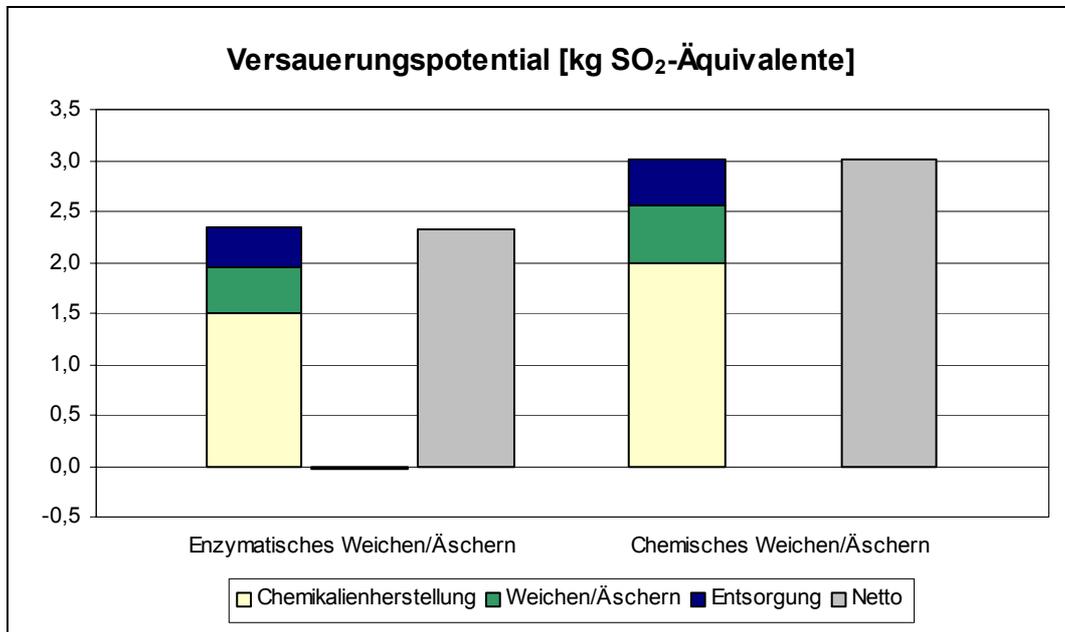


Abbildung 5-51: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-51 zeigt, dass das Versauerungspotential beim SZENARIO CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN größer ist, als beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Brutto-Ergebnisse

Bei beiden Szenarien wird das Brutto-Ergebnis hauptsächlich durch Emissionen aus der Chemikalienherstellung bestimmt. Dieser Teilprozess trägt beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 66 % und beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 64 % zum Brutto-Ergebnis bei. Ein Großteil davon geht auf die Herstellung von Natriumsulfid und Vinkol TGV zurück, deren prozentualer Anteil bei den Szenarien aber unterschiedlich ist.

Beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN stammen 18 % und beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 19 % der Brutto-Ergebnisse aus dem Teilsystem Weichen/Äschern. In beiden Szenarien ist dies überwiegend auf die Bereitstellung von thermischer Energie zurückzuführen.

Die restlichen SO₂-Äquivalente entfallen auf die Entsorgung der Reststoffe und sind dort zu einem großen Teil dem LKW-Transport des Leimfleisches zuzuordnen.

Tabelle 5-35: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Natriumsulfid ¹⁾	573 g SO ₂ -Äqu.	25 %
Vinkol TGV ¹⁾	385 g SO ₂ -Äqu.	16 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ²⁾	324 g SO ₂ -Äqu.	14 %
LKW Transport Leimfleisch ³⁾	272 g SO ₂ -Äqu.	12 %
<i>Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Natriumsulfid ¹⁾	1212 g SO ₂ -Äqu.	40 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ²⁾	401 g SO ₂ -Äqu.	13 %
LKW Transport Leimfleisch ³⁾	317 g SO ₂ -Äqu.	11 %
Vinkol TGV ¹⁾	308 g SO ₂ -Äqu.	10 %

¹⁾ Teilsystem Chemikalienherstellung

²⁾ Teilsystem Weichen/Äschern

³⁾ Teilsystem Entsorgung der Reststoffe

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-51).

Netto-Ergebnisse

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 1 % auf ein Versauerungspotential von 2,23 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und
- weniger als 1 % auf ein Versauerungspotential von 3,00 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Das Netto-Ergebnis wird beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zu 52 % und im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zu 56 % durch Schwefeldioxidemissionen bestimmt. Die restlichen SO₂-Äquivalente resultieren zum größten Teil aus Stickoxidemissionen. Beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN sind es 46 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 43 % (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder ist die Emission an SO₂-Äquivalenten beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN um ca. 23 % niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

5.2.4.6 Terrestrische Eutrophierung

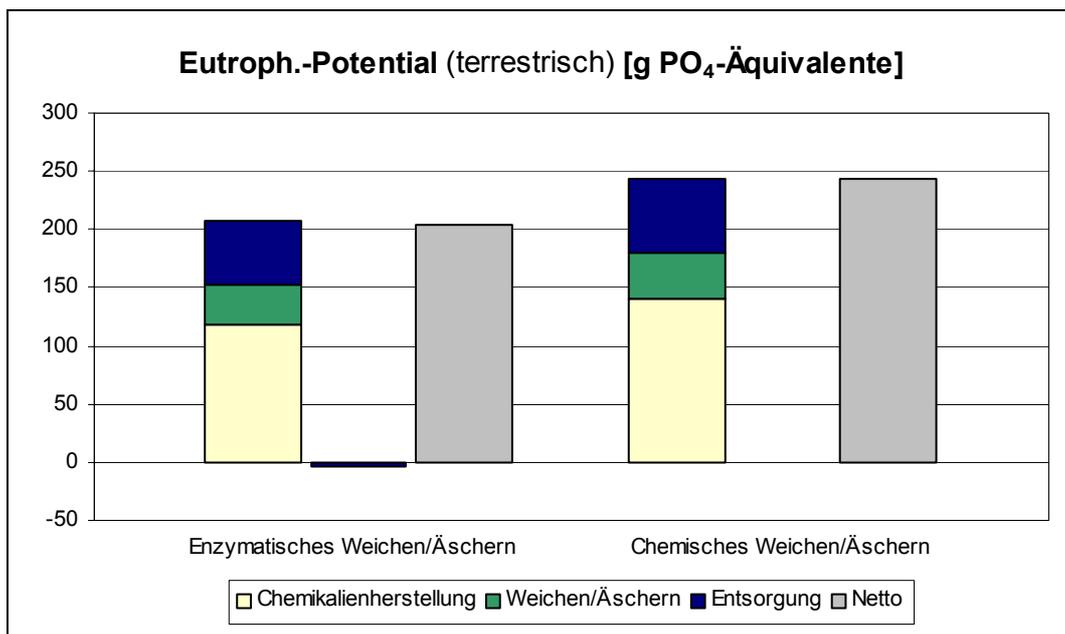


Abbildung 5-52: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-52 zeigt, dass das terrestrische Eutrophierungspotential beim SZENARIO ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN niedriger ist, als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Brutto-Ergebnisse

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien zu 57 % durch Emissionen aus der Chemikalienherstellung bedingt. Die größten Einzelanteile davon machen Natriumsulfid und Vinkol TGV aus, jedoch zu unterschiedlichen Anteilen.

Jeweils 27 % der Emissionen entstehen bei der Entsorgung der Reststoffe. Dafür ist hauptsächlich der Transport des Leimfleisches verantwortlich.

Die restlichen PO₄-Äquivalente werden durch das Weichen und Äschern verursacht. Hier stammen die Emissionen fast ausschließlich aus der Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie.

Tabelle 5-36: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
LKW Transport Leimfleisch ¹⁾	45 g PO ₄ -Äqu.	21 %
Vinkol TGV ²⁾	30 g PO ₄ -Äqu.	17 %
Natriumsulfid ²⁾	28 g PO ₄ -Äqu.	17 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ³⁾	20 g PO ₄ -Äqu.	10 %
Strommix - elektrische Energie ³⁾	14 g PO ₄ -Äqu.	7 %
<i>Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Natriumsulfid ²⁾	59 g PO ₄ -Äqu.	26 %
LKW Transport Leimfleisch ¹⁾	52 g PO ₄ -Äqu.	22 %
Heizwerk Heizöl EL - thermische Energie ³⁾	25 g PO ₄ -Äqu.	10 %
Vinkol TGV ²⁾	24 g PO ₄ -Äqu.	10 %
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	15 g PO ₄ -Äqu.	7 %

¹⁾ Teilsystem Entsorgung der Reststoffe

²⁾ Teilsystem Chemikalienherstellung

³⁾ Teilsystem Weichen/Äschern

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien unterscheiden sich unerheblich voneinander, da nur geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-52).

Netto-Ergebnisse

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- 2 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von 0,2 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und
- weniger als 1 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von 0,24 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Das Netto-Ergebnis resultiert bei beiden Szenarien fast ausschließlich aus Stickoxidemissionen. Beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN beträgt deren Anteil an den PO₄-Äquivalenten 99 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 98 % (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder ist das terrestrische Eutrophierungspotential beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN um ca. 16 % niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

5.2.4.7 Aquatische Eutrophierung

Abbildung 5-53 zeigt, dass das aquatische Eutrophierungspotential beim SZENARIO ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN niedriger ist, als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

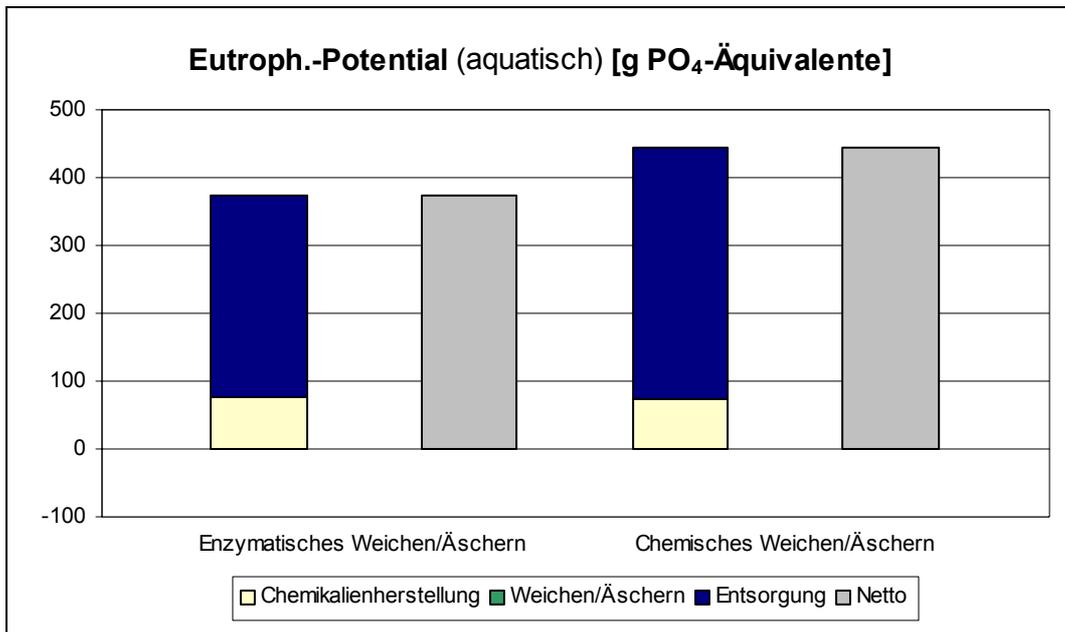


Abbildung 5-53: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Brutto-Ergebnisse

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien hauptsächlich durch Emissionen aus der Entsorgung der Reststoffe, und dort fast ausschließlich aus der Abwasserbehandlung, bestimmt. Dieser Teilprozess trägt beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 80 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 83 % zum Brutto-Ergebnis bei.

Die restlichen PO₄-Äquivalente werden jeweils durch die Chemikalienherstellung hervorgerufen. Verantwortlich ist dafür der Herstellungsprozess von Vinkol MK.

Tabelle 5-37: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des aquatischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Abwasserbehandlung ¹⁾	285 g PO ₄ -Äqu.	77 %
Vinkol MK ²⁾	74 g PO ₄ -Äqu.	20 %
<i>Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Abwasserbehandlung ¹⁾	371 g PO ₄ -Äqu.	83 %
Vinkol MK ²⁾	74 g PO ₄ -Äqu.	17 %

¹⁾ Teilsystem Chemikalienherstellung

²⁾ Teilsystem Entsorgung der Reststoffe

Gutschriften

Es treten keine Gutschriften auf (vgl. Abbildung 5-53). Die Brutto-Ergebnisse sind gleich den Netto-Ergebnissen.

Netto-Ergebnisse

Das aquatische Eutrophierungspotential beträgt

- 0,37 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und
- 0,45 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Das Netto-Ergebnis wird beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zu 52 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zu 55 % durch die Nitrat-Emission hervorgerufen. Zu den restlichen PO₄-Äquivalente trägt hauptsächlich der CSB bei. Sein Anteil beträgt beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 37 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 35 % (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder ist das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN um ca. 16 % niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

5.2.4.8 Ozonbildung

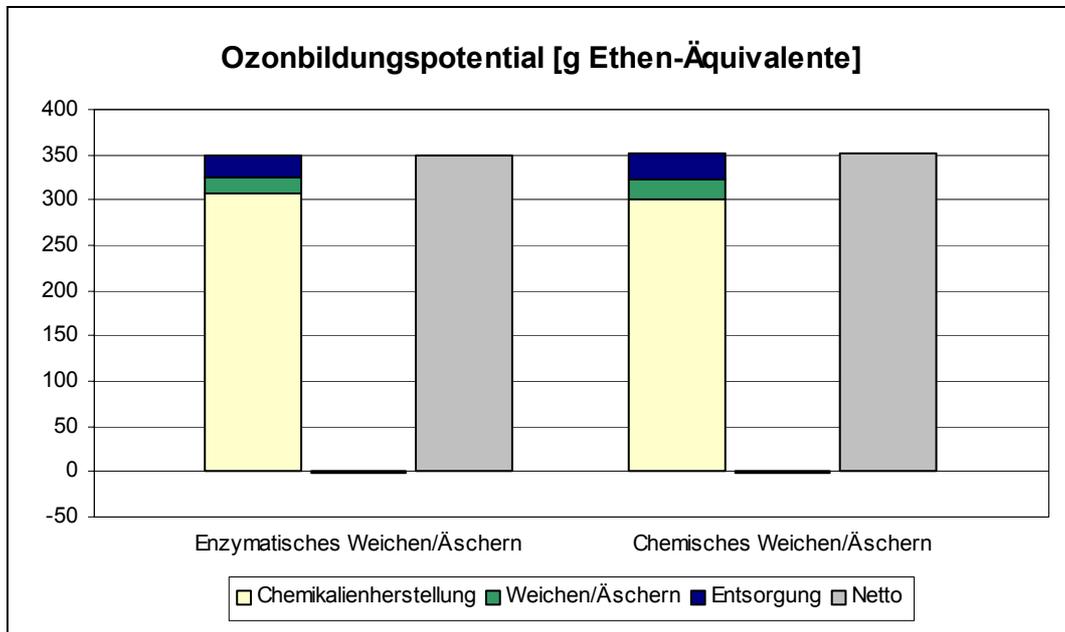


Abbildung 5-54: Ozonbildungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 5-54 zeigt, dass sich das Ozonbildungspotential beider Szenarien nur geringfügig unterscheidet.

Brutto-Ergebnisse

Das Brutto-Ergebnis wird bei beiden Szenarien durch Emissionen aus der Chemikalienherstellung dominiert. Beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN stammen 88 % und beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN 86 % aus diesem Teilsystem. Der überwiegende Teil kann davon der Herstellung von Vinkol MK, Natriumsulfid, Vinkol TGV und Silastol zugeordnet werden. Die Reihenfolge der Anteile unterscheidet sich bei beiden Szenarien.

Die restlichen Ethen-Äquivalente kommen zu ähnlichen Anteilen aus dem Weichen und Äschern sowie aus der Entsorgung der Reststoffe. Im letztgenannten Teilsystem wird der Emissionsbeitrag durch den Transport des Leimfleisches hervorgerufen.

Tabelle 5-15: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Ozonbildungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Vinkol MK ¹⁾	109 g Ethen-Äqu.	32 %
Silastol ¹⁾	88 g Ethen-Äqu.	26 %
Vinkol TGV ¹⁾	48 g Ethen-Äqu.	15 %
Natriumsulfid ¹⁾	37 g Ethen-Äqu.	12 %
LKW Transport Leimfleisch ²⁾	24 g Ethen-Äqu.	7 %
<i>Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN</i>		
Vinkol MK ¹⁾	109 g Ethen-Äqu.	31 %
Natriumsulfid ¹⁾	77 g Ethen-Äqu.	23 %
Silastol ¹⁾	59 g Ethen-Äqu.	17 %
Vinkol TGV ¹⁾	38 g Ethen-Äqu.	11 %
LKW Transport Leimfleisch ²⁾	25 g Ethen-Äqu.	8 %

¹⁾ Teilsystem Chemikalienherstellung

²⁾ Teilsystem Entsorgung der Reststoffe

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-54).

Netto-Ergebnisse

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf ein Ozonbildungspotential von

- 0,349 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und
- 0,352 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

Das Netto-Ergebnis wird im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zu 80 % durch VOC unspezifische Emissionen verursacht und im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zu 75 %. Die restlichen Ethen-Äquivalente werden größtenteils durch NMVOC-Emissionen sowie zu einem geringeren Anteil durch Methanemissionen hervorgerufen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für das Weichen und Äschern zur Herstellung von 1.000 kg Leder ist die Emission an Ethen-Äquivalenten beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN um ca. 1 % niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

5.2.4.9 Humantoxizität

Stellvertretend für die ausgewählten humantoxisch eingestuft Parameter sind in Abbildung 5-55 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Nettoergebnis für Cadmium und Schwefeldioxid dargestellt.

Abbildung 5-55 zeigt, dass für die beiden dargestellten Parameter die Emissionen beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höher sind als beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

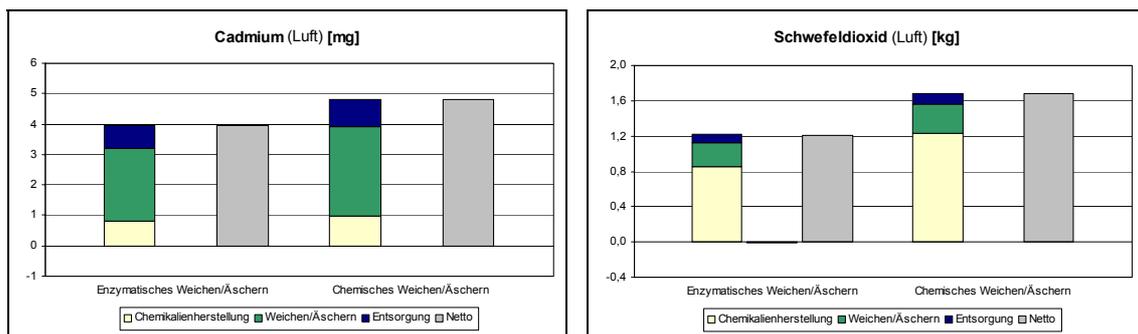


Abbildung 5-55: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Brutto-Ergebnisse

Für die vier untersuchten Parameter Benzo(a)pyren, Blei, Schwefeldioxid und Staub werden die Bruttoergebnisse bei beiden Szenarien überwiegend durch Emissionen aus der Chemikalienherstellung (zwischen 58 % und 96 %) bestimmt. Emissionen aus dem Teilprozess des Weichens und Äscherns tragen zwischen 3 % und 27 % bei. Der Beitrag durch Emissionen aus der Entsorgung der Reststoffe ist mit einer Spanne von 1 % bis 29 % ähnlich bedeutend. Auch wenn die Beiträge der einzelnen Teilprozesse bei den einzelnen Parametern unterschiedlich sind, so liegen diese bei beiden Szenarien pro Parameter nahe beieinander.

Der Beitrag der Teilprozesse für den Parameter Cadmium unterscheidet sich deutlich von den oben Genannten, da hier bei beiden Szenarien Emissionen aus dem Teilprozess Weichen/Äschern mit jeweils 61 % den Hauptteil zum Ergebnis beitragen.

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind für alle Parameter fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. z.B. Abbildung 5-55).

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-32 dargestellt. In Tabelle 5-38 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-38: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Benzo(a)pyren	Entlastung	- 0,014 mg	- 4 %
Blei	Belastung	+ 0,54 mg	+ 6 %
Cadmium	Entlastung	- 0,86 mg	- 18 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 0,47 kg	- 28 %
Staub	Entlastung	- 0,15 kg	- 21 %

Fazit: Im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN wurden für die human toxikologisch eingestuft Parameter Benzo(a)pyren, Cadmium, Schwefeldioxid und Staub niedrigere bzw. für Blei höhere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN berechnet, wobei für Benzo(a)pyren die Minderemission mit - 4 % sowie für Blei die Mehremission mit + 6 % gering ausfällt.

5.2.4.10 Ökotoxizität

5.2.4.10.1 Luftemissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter für Luftemissionen sind in Abbildung 5-56 die Bruttobeiträge der Teilsysteme und Gutschriften sowie das Nettoergebnis für Ammoniak und Stickoxide dargestellt.

Abbildung 5-56 zeigt, dass für die beiden dargestellten Parameter die Emissionen beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höher sind als beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN. Auffallend ist die Gutschrift bei Ammoniak für das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

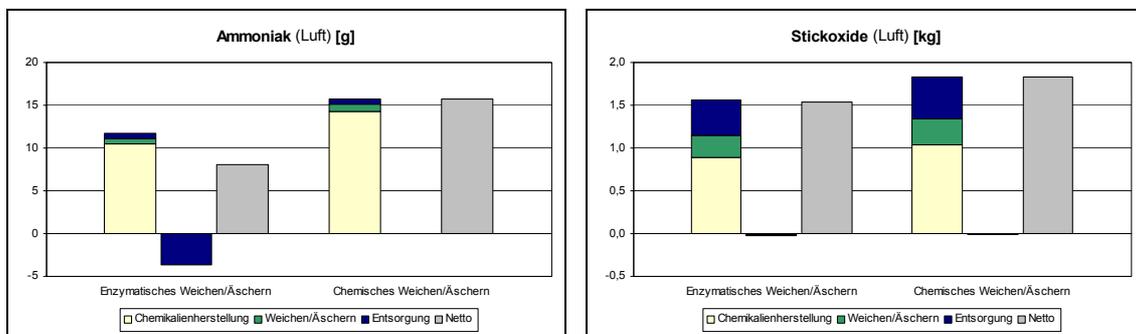


Abbildung 5-56: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxiden - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Brutto-Ergebnisse

Die Brutto-Ergebnisse für die Parameter Ammoniak und Schwefelwasserstoff werden in beiden Szenarien zum größten Teil durch Emissionen aus der Chemikalienherstellung verursacht (zwischen 89 % und 100 %). Auch bei den Parametern Schwefeldioxid und Stickoxide tragen Emissionen aus der Chemikalienherstellung mit 57 % und 74 % hauptsächlich zu den Brutto-Ergebnissen bei. Daneben werden aber auch größere Anteile der Emissionen durch Weichen und Äschern (zwischen 16 % und 22 %) sowie durch die Entsorgung der Reststoffe (zwischen 7 % und 27 %) verursacht.

Bei Fluorwasserstoff tragen bei beiden Szenarien die Emissionen aus der Chemikalienherstellung sowie aus dem Weichen und Äschern jeweils 40 % zum Ergebnis bei. Die restlichen Emissionen gehen auf die Entsorgung der Reststoffe zurück.

Gutschriften

Bis auf Ammoniak sind die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien für alle anderen Parameter identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. z.B. Abbildung 5-56). Für Ammoniak fällt im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN eine Gutschrift in Höhe von 31 % der Brutto-Ergebnisse bei der Entsorgung der Reststoffe an. Diese ist darauf zurückzuführen, dass durch die landwirtschaftliche Verwertung der kompostierten Haare synthetische Düngemittel substituiert werden, was sich hauptsächlich in verminderten Emissionen aus der Herstellung von Stickstoffdünger widerspiegelt.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-32 dargestellt. In Tabelle 5-39 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-39: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammoniak	Entlastung	- 7,71 g	- 49 %
Fluorwasserstoff	Entlastung	- 0,13 g	- 12 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 0,47 kg	- 38 %
Schwefelwasserstoff	Belastung	+ 0,017 g	+ 25 %
Stickoxide	Entlastung	- 0,29 kg	- 16 %

Fazit: Im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN wurden die als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter (Luftemissionen) Ammoniak, Fluorwasserstoff, Schwefeldioxid und Stickoxide niedrigere bzw. für Schwefelwasserstoff höhere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN berechnet.

5.2.4.10.2 Wasseremissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter für Wasseremissionen sind in Abbildung 5-57 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Nettoergebnis für Ammonium und Chlorid dargestellt.

Abbildung 5-57 zeigt, dass beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN die Emissionen für Ammoniak und Chlorid höher sind als beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN, wobei der Unterschied bei Chlorid größer ist.

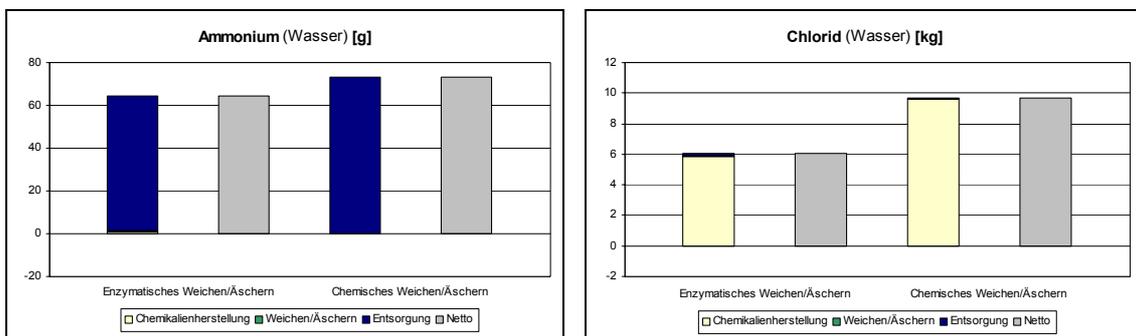


Abbildung 5-57: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Brutto-Ergebnisse

Die Brutto-Ergebnisse der Parameter Ammonium und AOX werden fast ausschließlich durch Emissionen aus der Entsorgung der Reststoffe bestimmt (zwischen 98 % und 100 %). Bei den Parametern Chlorid und Kohlenwasserstoffe machen dagegen Emissionen aus der Chemikalienherstellung 97 % bis 100 % der Brutto-Ergebnisse aus.

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind für alle Parameter fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 5-57).

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 5-32 dargestellt. In Tabelle 5-40 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 5-40: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammonium	Entlastung	- 9,2 g	- 13 %
AOX	Entlastung	- 1,21 g	- 20 %
Chlorid	Entlastung	- 3,61 kg	- 37 %
Kohlenwasserstoffe	Belastung	+ 0,49 g	+ 202 %

Fazit: Im Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN wurden die als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Wasseremissionen) Ammonium, AOX und Chlorid niedrigere bzw. für Kohlenwasserstoffe höhere Emissionswerte als im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN berechnet.

5.2.5 Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Vergleich enzymatischer und chemischer Prozessführung beim Weichen und Äschern durch die Szenarien ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN und CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN sind in Tabelle 5-41 noch einmal zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte für die hier betrachtete funktionelle Einheit (**Produktion von 1.000 kg Leder**) berechnet und bei der nachfolgenden Diskussion berücksichtigt. Hierbei ist zu beachten, dass alle Daten der Einwohnerwerte (EWW) mit Faktor 1.000 multipliziert wurden, um die Lesbarkeit der Zahlen zu erleichtern.

Die Tabelle zeigt, dass das Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN gegenüber dem Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN Umweltentlastungspotentiale für alle aggregierten Wirkungskategorien aufweist. Beim Ozonbildungspotential waren die Unterschiede der Verfahrensvarianten jedoch vernachlässigbar.

Tabelle 5-41: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

	Einheit	Enzymatisches Weichen u. Äschern	Chemisches Weichen u. Äschern	Enzymatisches Weichen u. Äschern	Chemisches Weichen u. Äschern	Differenz (Enz. - Chem.)
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	8,89	10,49	50,9	60,1	-9,15
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq.	703	874	59,6	74,1	-14,51
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	2,32	3,00	57,0	73,8	-16,77
Eutrophierungspotential (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	0,20	0,24	39,0	46,6	-7,62
Eutrophierungspotential (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	0,37	0,45	67,2	80,1	-12,89
Ozonbildungspotential (POCP)	kg Eth-Äq.	0,35	0,35	40,5	40,8	-0,31
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren (L)	mg	0,33	0,34	1,97	2,05	-0,09
Blei (L)	kg	0,0000089	0,0000084	1,16	1,09	0,07
Cadmium (L)	kg	0,0000039	0,0000048	29,5	35,9	-6,42
Schwefeldioxid (L)	kg	1,21	1,68	125	173	-48,36
Staub (L)	kg	0,55	0,70	176	222	-46,28
Ökotoxische Einzelstoffe						
Ammoniak (L)	kg	0,008	0,016	1,06	2,08	-1,02
Fluorwasserstoff (L)	kg	0,0010	0,0011	0,65	0,73	-0,08
Schwefeldioxid (L)	kg	1,21	1,68	125	173	-48,36
Schwefelwasserstoff (L)	kg	0,000083	0,000067	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	1,54	1,83	79,2	93,9	-14,65
Ammonium (W)	kg	0,064	0,073	22,9	26,2	-3,29
AOX (W)	kg	0,0048	0,0060	90,7	114	-22,98
Chlorid (W)	kg	6,08	9,69	--	--	--
Kohlenwasserstoffe (W)	kg	0,008	0,016	1,06	2,08	-1,02

Bei den als humantoxisch eingestuft und ausgewerteten 5 Einzelstoffen waren die Emissionen bei den Parametern Cadmium (L), Schwefeldioxid (L) und Staub (L) beim Szenario ENZYMATISCHES WEICHEN/ÄSCHERN deutlich niedriger als beim Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN. Für die anderen beiden Parameter wurden keine relevanten Unterschiede ermittelt.

Bei den als ökotoxisch eingestuft und ausgewerteten 9 Einzelstoffen dokumentieren die Ergebnisse bei 7 Stoffen deutliche Minderemissionen bei der Anwendung des ENZYMATISCHEN WEICHENS/ÄSCHERNS. Bei zwei Einzelstoffen waren die Unterschiede der Emissionen der beiden Verfahren sehr gering.

Die ausgewerteten Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter verdeutlichen, dass es unterschiedliche Einflussgrößen auf die Ergebnisse gab. Bei den meisten Wirkungskategorien trug die Chemikalienherstellung in beiden Szenarien über die Hälfte der Emissionen bei. Unterschiede bei der Chemikalienherstellung der beiden Szenarien waren sowohl auf eine geringfügig andere Zusammensetzung der eingesetzten Chemikalien als auch auf erhöhte Menge an Chemikalien im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN zurückzuführen. Die Herstellung des enzymhaltigen Vinkol A hatte keinen relevanten Einfluss auf die Chemikalienherstellung. Im Gegensatz dazu wirkte sich die Herstellung des Natriumsulfids, das anstelle des Vinkol A zu größeren Anteilen im Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN eingesetzt wurde, in einigen Wirkungskategorien deutlich auf das Ergebnis aus.

Im Teilprozess Weichen/Äschern wies das Szenario CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN höhere absolute Beiträge auf, da einerseits die Laufzeit der Aggregate länger war und die benötigte Wassermenge höher war. Daraus ergab sich sowohl ein höherer Verbrauch an elektrischer als auch an thermischer Energie. Aus dem höheren Wasserverbrauch ergab sich auch ein erhöhter Abwasseranfall, der zudem höher belastet war. Daher ergaben sich auch für den Teilprozess Entsorgung höhere absolute Beiträge des Szenarios CHEMISCHES WEICHEN/ÄSCHERN.

6 Auswertung der Umweltlastungseffekte durch Produktsubstitutionen

Dieses Projektmodul sah vor, biotechnische und chemisch-technische Herstellungsverfahren für 2 analoge Produkte mit funktionaler Gleichwertigkeit (P1 und P2) einer vergleichenden Auswertung zu unterziehen. Die Produktvergleiche sollten die Vorketten für die Rohstoffbereitstellung, die Herstellungsprozesse für das chemisch-technische und das biotechnische Produkt sowie deren anschließende Nutzungsphase umfassen. Details zur Auswahl der im Rahmen dieser Studie betrachteten Produkte enthält Abschnitt 3.

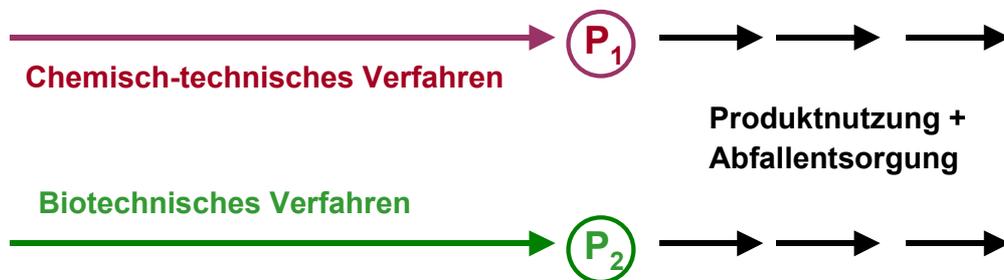


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der Rahmenbedingungen für den Produktvergleich

Im Rahmen dieser Studie konnten nur einzelne Produktvergleiche durchgeführt werden. Bei der Entwicklung der meisten derzeit am Markt vorhandenen Produkte hatten Belange des Umweltschutzes keine Priorität. Die im Rahmen dieser Studie erhaltenen Ergebnisse geben deshalb den derzeitigen Istzustand wieder. Es ist jedoch davon auszugehen, dass für die jeweiligen Herstellungsverfahren noch Umweltlastungspotentiale erschlossen werden können. Deshalb wurde im Abschnitt 6.1 an einem sehr gut dokumentierten Beispiel überprüft, welche Umweltlastungspotentiale durch eine optimierte Verfahrensgestaltung erschlossen werden könnten.

Bei den in den Abschnitten 6.2 und 6.3 vergleichend ausgewerteten Produkten wurde dagegen der aktuelle Istzustand der jeweiligen Herstellungsverfahren herangezogen. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte deshalb beachtet werden, dass durch die Optimierung der aktuellen Herstellungsverfahren weitere Umweltlastungspotentiale erschlossen werden könnten.

6.1 Produktvergleich 1 - Loose-fill-Packmittel aus EPS und Stärke

6.1.1 Auswertung der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln

In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhaben wurde untersucht, wie ein Ersatz von Kunststoffen aus fossilen Rohstoffen durch Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen unter Umweltgesichtspunkten zu bewerten ist. Das BIfA hat federführend zusammen mit dem IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung sowie unter Mitwirkung der Flo-Pak GmbH die Ökobilanz erarbeitet (Würdinger et al., 2002).

In der Ökobilanz wurden zwei Loose-fill-Packmittelsysteme miteinander verglichen, deren unterschiedliche Rohstoffherkunft wesentlich für das mit der Ökobilanz verbundene Erkenntnisinteresse war:

1. Verpackungssystem basierend auf einem Loose-fill-Packmittel aus fossilen Rohstoffen (Expandiertes Primär- bzw. Sekundär-Polystyrol)
2. Verpackungssystem basierend auf einem Loose-fill-Packmittel aus nachwachsenden Rohstoffen (Expandierte Stärke)

In der Praxis zeigten diese Verpackungssysteme sehr vielfältige Ausgestaltungen. Deswegen war es notwendig, verschiedene Ausprägungen, die in ihrer Gesamtheit eine verlässliche Einschätzung der realen Verhältnisse erlaubten, zu modellieren. Dazu wurde eine Vielzahl von Szenarien definiert und bilanziert und bezüglich der Umweltwirkungen miteinander verglichen.

Als funktionelle Einheit der Ökobilanz und damit als Grundlage für den Produktvergleich wurde ein (Füll-)Volumen von 100 m³ Loose-fill-Packmittel gewählt.

Mit hohem Detaillierungsgrad wurden in der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmittel sämtliche Stoff- und Energieströme von der Rohstoffgewinnung (Landwirtschaft, Petrochemie), der Rohstoffverarbeitung (Produktgewinnung), der Nutzung des Packmittels und der Verwertung der Abfälle (Recycling, Entsorgung) vergleichend bilanziert. Dabei wurden neben den bei den Projektpartnern realisierten Varianten der Polymerproduktion verschiedene Szenarien bilanziert, bei denen Alternativen der Rohstoffgewinnung,

der Produktherstellung sowie der Abfallverwertung ausgewertet wurden. Diese Auswertungen waren aufschlussreich, um jenen Lebensweg eines Produktes aufzeigen zu können, der mit einem Minimum an Umweltbelastungen verbunden ist.

Dieses umfangreiche Vorhaben bietet eine sehr gute Datengrundlage, um das umweltentlastende Potential der Substitution eines auf chemisch-technischem Wege hergestellten Produktes auf Basis fossiler Rohstoffe durch ein Produkt auf Basis nachwachsender Rohstoffe beurteilen zu können. Im Rahmen dieser Studie wurden deshalb keine neuen Daten erhoben, sondern die Ergebnisse der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln wurden unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und für zielgerichtete Darstellung aufbereitet.

Bevor auf die Gesichtspunkte eingegangen wird, unter denen die Ökobilanz zu Loose-fill-Packmittel im Rahmen dieser Studie ausgewertet wurde, soll zunächst begründet werden, warum sich die früher durchgeführte Ökobilanz besonders für die hier durchgeführte Auswertung eignet.

- Die vergleichende Ökobilanz von Loose-fill-Packmitteln aus Stärke bzw. Polystyrol war eine nach DIN 14040ff durchgeführte Ökobilanz mit sämtlichen notwendigen Schritten und wies deshalb nicht nur Systemgrenzen von der Wiege bis zur Bahre auf, sondern auch eine dem Ziel und dem Erkenntnisinteresse entsprechende Detailtiefe bzw. eine entsprechend umfangreiche Datengrundlage der Modellierung.
- Während bei allen anderen Projektmodulen in erster Linie eine Auswertung der Umwelteinflüsse für konkrete Verfahrens- oder Produktbeispiele erfolgte, sollte in diesem Projektmodul in Sinne einer Sensitivitätsanalyse aufgezeigt werden, inwieweit eine Optimierung des Lebensweges eines Produktes dessen Ökobilanz beeinflussen kann. Dazu eignete sich insbesondere die Vielzahl der Szenarien, die modelliert und bilanziert wurden. Diese Szenarien stellten einerseits reale Lebenswege der Loose-fill-Packmittel dar, andererseits wurden weitere denkbare alternative Lebenswege modelliert, um die Bandbreiten der möglichen Ergebnisse zu quantifizieren.
- Durch die Vielzahl an Szenarien konnten darüber hinaus sehr gut und fundiert Optimierungspotentiale in den einzelnen Lebenswegabschnitten aber auch in den modellierten Prozessen aufgezeigt werden.

- Die detaillierte Modellierung und Ergebnisdarstellung ermöglichte die Identifizierung ergebnisentscheidender Einflussfaktoren bzw. der Lebenswegabschnitte mit den größten Beiträgen zu den Ergebnissen.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Auswertung der vergleichenden Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol verfolgte folgende Ziele:

- Verdeutlichung der Lebenswegabschnitte (Materialbereitstellung, Vertrieb/Nutzung oder Entsorgung), die wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Damit kann die Frage beantwortet werden, wie die Systemgrenzen der Untersuchungsgegenstände festgelegt werden müssen, damit die Vergleichbarkeit von Produkten und Verfahren gewährleistet ist und alle relevanten Lebenswegabschnitte in die Betrachtung einbezogen werden (vgl. Kapitel 6.1.3).
- Verdeutlichung der möglichen Unterschiede und Bandbreiten in den Ergebnissen in Abhängigkeit der gewählten Rahmenbedingungen zwischen Loose-fill-Packmitteln aus nachwachsenden und fossilen Rohstoffen (vgl. Kapitel 6.1.4).
- Verdeutlichung der detaillierten Auswertung anhand der Parameter Treibhauspotential, Ozonbildungspotential, Kumulierter Energieaufwand (KEA) einschließlich der materialspezifischen Feedstockenergie und der Flächenbeanspruchung. Durch die Auswertung der Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel können mithilfe der Ergebnisse wichtige Schlüsse für den Vergleich biotechnische und chemisch-technischer Verfahren und Produkte gezogen werden (vgl. Kapitel 6.1.4).

6.1.2 Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise bei der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln

Nachfolgend werden die wichtigsten Schritte bei der Durchführung der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln dargestellt. Eine ausführliche Darstellung und Erläuterung findet sich im Bericht zu der Ökobilanz (Würdinger et al., 2002).

6.1.2.1 Erkenntnisinteresse der Ökobilanz

Ziel der im Auftrag der DBU durchgeführten Ökobilanz waren folgende übergeordnete Fragestellungen, für deren Beantwortung im Sinne einer dauerhaften und tragfähigen Entwicklung durch die verlässlich und transparent aufbereiteten Untersuchungsergebnisse der Ökobilanz eine gute Grundlage geschaffen wurde:

- Ist die Substitution fossiler Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe zur Herstellung von Kunststoffen aus ökologieorientierter Sicht tatsächlich positiv zu bewerten, wenn dabei alle relevanten Umweltfolgen über den gesamten Lebensweg eines konkreten Produktes hinweg berücksichtigt werden?
- In welchem Umfang beeinflussen dabei die Wiederverwendung und Verwertung der Altprodukte die mit dem Produktlebensweg insgesamt verbundenen Umweltauswirkungen?
- Welche Entsorgungsverfahren für biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind bei einer ökologieorientierten Sichtweise zu bevorzugen?

Aus den übergeordneten Fragestellungen wurden im Sinne des Erkenntnisinteresses der Ökobilanz konkrete Fragestellungen abgeleitet und in Gruppen zusammen gefasst:

- In welchen umweltbezogenen Punkten unterscheiden sich Loose-fill-Packmittel aus EPS bzw. Stärke besonders, wo sind sie vergleichbar und lässt sich insgesamt unter Umweltgesichtspunkten eine eindeutige Rangfolge aufstellen?
- Welche Unterschiede ergeben sich, wenn Polystyrol bzw. Stärke unterschiedlicher Herkunft verwendet wird? Wie groß sind dabei die Unterschiede zwischen verschiedenen Sekundär-Polystyrol-Arten? Inwieweit wirkt sich hierbei die Art und Weise der Aufbereitung von Polystyrol-Abfällen auf die Ergebnisse aus? Welchen Einfluss hat der Wert, der den im Produktsystem verwerteten Abfällen zugeschrieben wird?
- Welche Schwankungsbreiten ergeben sich für die landwirtschaftliche Produktion unterschiedlicher Stärkepflanzen, welche bei der Stärkeproduktion? Wie wirken sich Intensitätsunterschiede bei der landwirtschaftlichen Produk-

tion auf die Ergebnisse aus? Welchen Einfluss haben verfahrenstechnische Änderungen bei der Stärkeproduktion auf die Ergebnisse?

- Wie wirkt sich die in der industriellen Praxis häufig zu beobachtende mehrfache Verwendung von Loose-fill-Packmitteln auf die Ergebnisse aus – und wie weit sind die Differenzen abhängig bzw. unabhängig von der Materialart? Welchen Unterschied macht es dabei, ob die Loose-fill-Packmittel direkt firmenintern wiederverwendet werden oder ob diese Wiederverwendung über einen Werkstoffhof mit den dafür erforderlichen Transporten erfolgt?
- Inwieweit beeinflusst die Art des Entsorgungsverfahrens die Ergebnisse und welche Entsorgungsverfahren sind aus ökologischer Sicht zu bevorzugen?
- Wie verändern sich die Ergebnisse, wenn angenommen wird, dass die Stärke-loose-fill-Packmittel die gleiche Schüttdichte aufweisen wie die EPS-Variante? Wie wirkt sich der Zusatz von auf fossilen Rohstoffen hergestelltem Polyvinylalkohol (PVA) bei den Stärke-loose-fill-Packmitteln auf die Ergebnisse aus? Wie verändern sich die Ergebnisse, wenn anstelle von Maisstärke Maisgrieß verwendet wird? Welche Rolle spielen die Transportentfernungen?

Neben diesen eher produktspezifischen Fragen stellten sich an vielen Stellen der Auswertung immer wieder die folgende Fragen:

- Wie groß ist der Anteil verschiedener Lebenswegabschnitte bzw. Prozesse an den Ergebnissen? Wo sind in den Produktlebenswegen die bedeutendsten Schwachstellen, wo finden sich die größten Optimierungspotentiale? Wie schlagen bestimmte Annahmen bei der Modellierung von Prozessen sowie zu anderen Aspekten der Vorgehensweise auf die Ergebnisse durch? Wie macht sich die Vorgehensweise bei Allokationen in den Ergebnissen bemerkbar? Wie bedeutsam sind die mit den untersuchten Packmittelsystemen verbundenen Umweltauswirkungen im Vergleich zu den Gesamtumweltbelastungen in Deutschland?

6.1.2.2 Vorgehensweise bei der Erstellung der Ökobilanz

6.1.2.2.1 Allgemeiner Überblick

Bei der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff. wurde wie in Abbildung 6-2 schematisch dargestellt vorgegangen: Ausgehend von der Zieldefinition wurden innerhalb der Sachbilanz relevante Prozesse beschrieben, die erforderlichen Sachbilanzdaten abgeleitet und auf dieser Basis verschiedene Szenarien modelliert und bilanziert. In der Wirkungsabschätzung wurden dann die Sachbilanzergebnisse in Wirkungskategorien zusammengefasst und zu Wirkungsindikatorergebnissen verrechnet. Am Ende stand die Auswertung der Ergebnisse, die zu Optimierungsvorschlägen führte. Um die Qualität sicherzustellen, nahmen unabhängige Experten eine externe Begutachtung (Critical review) vor. Zusätzlich wurden interessierte Kreise mittels eines Fachgesprächs über Vorgehensweise und Zwischenergebnisse informiert und so eingebunden.

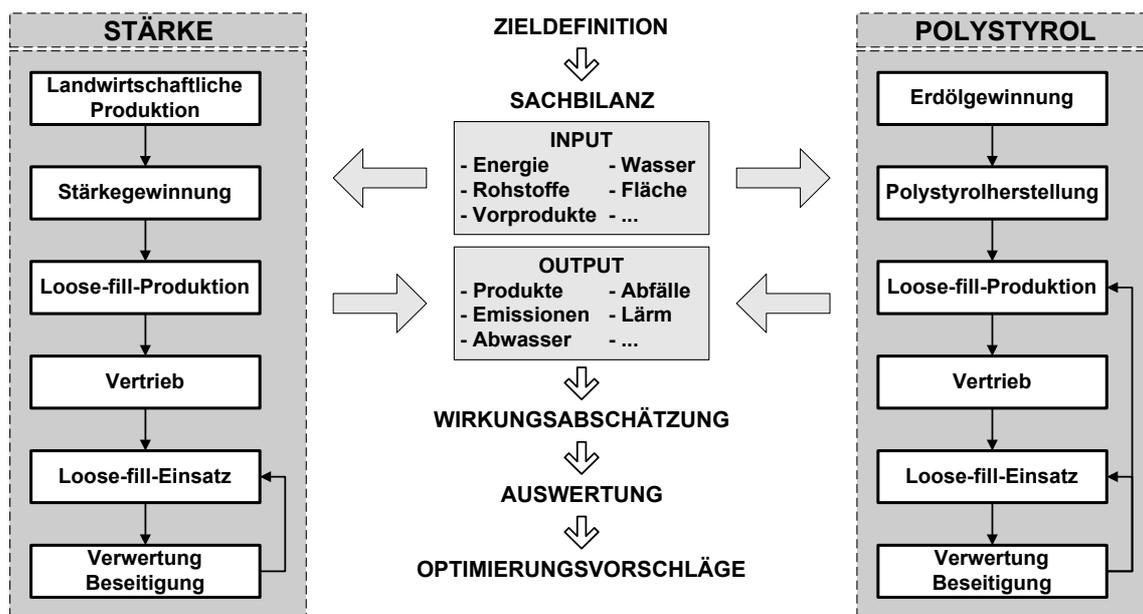


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Loose-fill-Packmittel-Lebenswege und der Ökobilanz-Methodik

Entsprechend der Forderung in Ökobilanzen umfassten die Systemgrenzen der zu vergleichenden Produktsysteme alle Prozesse von der Wiege bis zur Bahre und alle Stoffströme an den Systemgrenzen als Elementarflüsse. Dort wo dies nicht eingehalten

werden konnte, wurde geeignete Abschneidekriterien angewandt bzw. Systemerweiterungen und Allokationen vorgenommen.

Die Untersuchung gliederte sich in zwei Auswertungsschritte, für die jeweils sinnvolle und geeignete Untersuchungsszenarien unter Berücksichtigung von Realitätsnähe und Erkenntnisinteresse definiert wurden.

6.1.2.2.2 Vorgehen bei der Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung

Die in der Ökobilanz berücksichtigten Sachbilanzparameter ergaben sich aus Tabelle 6-1, die auch zeigt, welche Wirkungskategorien für die Auswertung betrachtet wurden und welche Sachbilanzparameter bei der Wirkungsabschätzung zu Wirkungsindikatoren zusammengefasst bzw. direkt für die Auswertung verwendet wurden.

Tabelle 6-1: Bei der Auswertung berücksichtigte Wirkungskategorien, diesen zugeordnete Sachbilanzparameter und Einheiten der Wirkungsindikatorergebnisse

Wirkungskategorie	Sachbilanzparameter*	Wirkungsindikator (Einheit)*
Humantoxizität	As, BaP, Benzol, Cd, Cr (als Cr-VI), PCDD/F, Ni, Pb, SO ₂ , Dieselpartikel	kg Arsen-Äquivalente; kg Pb; kg SO ₂ ; kg Dieselpartikel
Ökotoxizität	AOX (Wasser); HF, NH ₃ , NO _x , SO ₂ (Luft); Pflanzenschutzmittel	Keine Aggregation; Angabe jeweils in kg
Eutrophierung (aquatisch)	P-ges., CSB, N-ges., NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalente
Eutrophierung (terrestrisch)	NO _x , NH ₃	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalente
Naturraumbeanspruchung	Fläche	m ² je Natürlichkeitsklasse IV - VII
Ozonbildung (bodennah)	NO _x , Benzol, CH ₄ , Formaldehyd, NMVOC, VOC, Pentan, Butan	kg Ethen-Äquivalente; kg N-korrigierte Ethen-Äquivalente
Ressourcenbeanspruchung	Erdöl, Erdgas, Braunkohle, Steinkohle; Uran; Biomasse	MJ KEA fossil; MJ KEA nuklear; MJ KEA solar; kg Rohöläquivalente
Ozonabbau (Stratosphäre)	N ₂ O	kg N ₂ O
Treibhauseffekt	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	kg CO ₂ -Äquivalente
Versauerung	NO _x , SO ₂ , H ₂ S, HCl, HF, NH ₃	kg SO ₂ -Äquivalente

Die Auswertung wurde verbal argumentativ in enger Anlehnung an die Methode des Umweltbundesamtes durchgeführt (UBA, 1999). Dabei wurden Szenarien anhand der Ergebnisse für die in Tabelle 6-1 aufgelisteten Wirkungsindikatoren miteinander verglichen. Bei allen Vergleichen wurden für jeden Wirkungsindikator zwei Arten von Ergeb-

nissen (Brutto/Netto) berechnet und diskutiert, wobei die Netto-Ergebnisse letztendlich über das Abschneiden der Szenarien entscheiden: *Brutto-Ergebnisse* ergeben sich direkt aus den In- und Outputs des Produktsystems. *Netto-Ergebnisse* berücksichtigen zusätzlich, dass Zusatznutzen des Produktsystems (z.B. Nutzenergie, Reduktionspotential, Sekundärrohstoffe, Nährstoffe) eine Erzeugung an anderer Stelle ersetzen – und im Produktsystem verwertete Abfälle nicht mehr anderweitig zu entsorgen waren. Ebenso wurde die ökologische Wertigkeit der für die Herstellung von Loose-fill-Packmitteln verwendeten Polystyrolabfälle über die Frage beantwortet, mit welchen Umweltauswirkungen die alternative Entsorgung dieser Polystyrolabfälle verbunden wäre, bzw. welche Zusatznutzen sich daraus ergeben hätten. Dazu wurden über Äquivalenzsysteme, die repräsentativ die alternative Nutzenbereitstellung bzw. Abfallentsorgung nachbildeten, Zu- und Abschläge (bzw. Last- und Gutschriften) berechnet und mit den Brutto-Ergebnissen verrechnet.

6.1.2.2.3 Untersuchungsszenarien im 1. Auswertungsschritt

In der Ökobilanz wurden viele verschiedene EPS- und Stärke-Szenarien miteinander verglichen (vgl. Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3), die jeweils den gesamten Lebensweg der Loose-fill-Packmittel umfassen und vor allem nach ihrer Relevanz für die Praxis als auch für das Erkenntnisinteresse ausgewählt wurden.

Zuerst wurden Vergleiche innerhalb der Materialgruppe durchgeführt und dabei der Einfluss der Lebenswegphasen Materialbereitstellung, Nutzung und Entsorgung auf die Umweltrelevanz der Loose-fill-Packmittel getrennt untersucht. Um den Einfluss einer Lebenswegstufe zu untersuchen, wurden jeweils zwei Lebenswegstufen konstant gehalten und eine Lebenswegstufe durch vier bis fünf Möglichkeiten variiert.

Tabelle 6-2: Szenarien zu den EPS-loose-fill-Packmitteln: Berücksichtigte Variationen in den Lebenswegabschnitten (grau hinterlegt: konstant gehaltenes Vergleichsszenario)

<i>Materialbereitstellung</i>					
Sekundär-Polystyrol aus PS-Produktionsabfällen	Primär-Polystyrol	Sekundär-Polystyrol aus PS-Bechern im DSD-Abfall	Sekundär-Polystyrol aus EPS-Verpackungen	Sekundär-Polystyrol aus MC-/ CD-Hüllen	
<i>Nutzung</i>					
Einmalige Nutzung	Betriebsinterne Wiederverwendung (zweimalige Nutzung)	Betriebsinterne Wiederverwendung (viermalige Nutzung)	Wiederverwendung über Wertstoffhof (viermalige Nutzung)	Einmalige Nutzung (ohne Allokation)	
<i>Entsorgung</i>					
Erfassung mit Restmüll und Beseitigung gemäß Beseitigungsmix	Erfassung mit Restmüll und Beseitigung in MVA	Separate Erfassung und energetische Verwertung in optimierter MVA	Erfassung über DSD und rohstoffliche Verwertung im Hochofen	Wertstoffhof u. werkstoffliches Recycling (Quasi-closed-loop-Recycling)	Wertstoffhof und werkstoffliches Recycling (Open-loop-Recycling)

Tabelle 6-3: Szenarien zu Stärke-loose-fill-Packmitteln: Berücksichtigte Variationen in den Lebenswegabschnitten (grau hinterlegt: konstant gehaltenes Vergleichsszenario)

<i>Materialbereitstellung</i>					
Maisstärke	Kartoffelstärkeproduktion I (Kläranlage)	Kartoffelstärkeproduktion II (Abwassererregung)	Weizenstärke aus konventionell produziertem Weizen	Weizenstärke aus extensiv produziertem Weizen	
<i>Nutzung</i>					
Einmalige Nutzung	Betriebsinterne Wiederverwendung (zweimalige Nutzung)	Betriebsinterne Wiederverwendung (viermalige Nutzung)	Wiederverwendung über Wertstoffhof (viermalige Nutzung)	Einmalige Nutzung (ohne Allokation)	
<i>Entsorgung</i>					
Erfassung mit Restmüll und Beseitigung gemäß Beseitigungsmix	Erfassung mit Restmüll und Beseitigung in MVA	Separate Erfassung und energetische Verwertung in optimierter MVA	Erfassung mit Bioabfall und Kompostierung	Erfassung mit Bioabfall und Vergärung	Erfassung über DSD und rohstoffliche Verwertung im Hochofen

6.1.2.2.4 Untersuchungsszenarien im 2. Auswertungsschritt

Im zweiten Auswertungsschritt wurden je vier ausgewählte EPS- und Stärke-Szenarien anhand der Bilanzierungsergebnisse miteinander verglichen. Die Szenarienauswahl in diesem Auswertungsschritt wurde dabei den Kriterien Realitätsnähe, Erkenntnisinteresse und Abschätzung der Extremwerte und damit der denkbaren Bandbreiten gerecht.

Deshalb sollte an dieser Stelle nun vor allem untersucht werden, inwieweit sich die Unterscheidung zwischen Kunststoff auf Basis fossiler Rohstoffe (EPS) bzw. auf Basis nachwachsender Rohstoffe (Stärke) auch in den Ergebnissen widerspiegelt. Dazu wurden aus den im ersten Auswertungsschritt betrachteten Möglichkeiten der Bereitstellung von Polystyrol und Stärke jeweils vier Varianten ausgewählt und mit einer Auswahl von jeweils vier Entsorgungsvarianten kombiniert. Da die Ergebnisse zur Nutzungsphase unabhängig von der Materialart eindeutig für eine Wiederverwendung sprachen, wurde dieser Aspekt hier nicht weiter betrachtet. Demgemäß wurde die Nutzungs- und Vertriebsphase in allen Szenarien jeweils identisch zum materialgleichen Vergleichsszenario gehalten.

Tabelle 6-4: In der zweiten Auswertungsphase verglichene Stärke- und EPS-Szenarien

<i>Stärke-Szenarien</i>				
Szenario	Stärke I (Stärke-Vergleichsszenario)	Stärke II	Stärke III	Stärke IV
Herstellung	Maisstärke	Weizenstärke (Anbau konventionell)	Weizenstärke (Anbau extensiv)	Kartoffelstärke II (Abwasserverregnung)
Nutzung	Einmalige Nutzung	Einmalige Nutzung	Einmalige Nutzung	Einmalige Nutzung
Entsorgung	Beseitigungsmix (Restmüll)	Kompostierung	Vergärung	Optimierte MVA
<i>EPS-Szenarien</i>				
Szenario	EPS I (EPS-Vergleichsszenario)	EPS II	EPS III	EPS IV
Herstellung	Sekundär-Polystyrol (Produktionsabfälle)	Primär-Polystyrol	Sekundär-Polystyrol (EPS-Verpackungen)	Sekundär-Polystyrol (MC-/CD-Hüllen)
Nutzung	Einmalige Nutzung	Einmalige Nutzung	Einmalige Nutzung	Einmalige Nutzung
Entsorgung	Beseitigungsmix (Restmüll)	Hochofen (Erfassung über DSD)	Optimierte MVA (Separate Erfassung)	Werkstoffliches Recycling (Open-loop)

6.1.3 Auswertung wesentlicher allgemeiner Ergebnisse der Ökobilanz

Nachfolgend werden in den Kapiteln 6.1.3.1 bis 6.1.3.5 wesentliche Ergebnisse der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln verbal argumentativ dargestellt. In der Ökobilanz konnte gezeigt werden, welcher der Lebenswegabschnitte Materialbereitstellung, Nutzung/Vertrieb und Entsorgung bei Stärke- und EPS-loose-fill-Packmitteln einen wesentlichen Beitrag zu den Ergebnissen hat. Darüber hinaus wurden auch die Umweltauswirkungen der Zusatznutzen quantifiziert und es wurde analysiert, inwieweit die Zusatznutzen der Produktsysteme und die damit verbundenen Zu- und Abschläge (oder Gut- bzw. Lastschriften) die Ergebnisse beeinflussten. Eine ausführliche Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der Ergebnisse finden sich im Bericht zu der Ökobilanz (Würdinger et al., 2002).

6.1.3.1 EPS-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Materialbereitstellung

Die Polystyrol-Bereitstellung beeinflusste bei vielen Indikatoren die für die EPS-Szenarien ermittelten Ergebnisse maßgeblich. Dabei schnitt die beim untersuchten Produkt häufige Verwendung geeigneter Sekundär-Polystyrole (PS-Produktionsabfälle, MC-/CD-Hüllen, EPS-Verpackungen und PS-Becher aus DSD-Sammlung) durchgehend besser ab als der Einsatz von Primär-Polystyrol. Die Unterschiede zwischen den betrachteten Sekundär-Polystyrolen waren jedoch größer als zwischen dem ungünstigsten Sekundär-Polystyrol und Primär-Polystyrol. Entscheidend für das Abschneiden der Sekundär-Materialien war dabei der Zusatznutzen, der mit der alternativen durchschnittlichen Entsorgung der spezifischen Polystyrol-Abfallfraktion verbunden war: Je geringer dieser ausfiel, desto günstiger erwies sich die Verwendung zur Herstellung von EPS-loose-fill-Packmitteln. Besonders positiv wirkte es sich deshalb aus, wenn Polystyrol-Abfälle eingesetzt wurde, die andernfalls kaum verwertet wurden - wie dies bei den MC-/CD-Hüllen der Fall war. Wesentlich geringeren Einfluss auf die Ergebnisse hatte dagegen der Recyclingaufwand der eingesetzten Polystyrol-Abfälle, wobei die Herstellung eines Mahlgutes gegenüber einer stromintensiveren Regranulierung umweltfreundlicher war. Auffallend waren bei allen EPS-Szenarien ferner die hohen spezifischen Beiträge beim Ozonbildungspotential, die auf die Freisetzung der Treibmittel Pentan und Butan zurückzuführen waren. Hier könnte ein Wechsel des Treibmittels oder eine Abgasreinigung die Umweltbilanz der EPS-Packmittel deutlich verbessern.

6.1.3.2 EPS-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Entsorgungsverfahren

Die Art der Entsorgung hatte erhebliche Auswirkungen auf die umweltbezogene Bewertung der untersuchten Szenarien zu EPS-loose-fill-Packmitteln. Dabei trugen die Emissionen, die direkt aus der Entsorgung resultierten, in den meisten Kategorien jedoch nur geringfügig zum Gesamtergebnis bei. Erheblich einflussreicher und letztendlich ergebnisbestimmend waren dagegen diejenigen Werte, die sich für die Zusatznutzen aus der Entsorgung (Strom, Wärme, Reduktionspotential, Sekundär-Polystyrol) über entsprechende Äquivalenzsysteme errechneten. Am besten schnitten dabei die beiden untersuchten Varianten zur werkstofflichen Verwertung ab. Mit relativ deutlichem Abstand folgte die hochwertige energetische Verwertung der EPS-loose-fill-Packmittel mittels einer optimierten Müllverbrennungsanlage. Den nächsten Rang teilten sich die beiden Szenarien zur rohstofflichen Verwertung im Hochofen und zu einer

repräsentativen Müllverbrennungsanlage. Am ungünstigsten stellte sich der Beseitigungsmix dar, wobei sich insbesondere der hohe Deponierungsanteil und die damit nicht gegebene Nutzung bemerkbar machten.

6.1.3.3 Stärke-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Materialbereitstellung

Über die Wahl der Pflanzenart, die Intensität der Pflanzenproduktion und verfahrenstechnische Maßnahmen bei der Stärke-Produktion konnten die Umweltauswirkungen der Stärke-Bereitstellung deutlich gesenkt werden. Dabei schnitten die Verwendung von Weizenstärke aus konventionell angebautem Weizen insgesamt am ungünstigsten ab. Mit sehr geringem Abstand folgte das Maisstärke-Szenario, das den Hauptanteil der in den Markt gebrachten Stärke-loose-fill-Packmittel repräsentierte. Deutlich besser stellte sich dagegen der Einsatz von Kartoffelstärke bzw. von Weizenstärke aus extensiv erzeugtem Weizen dar. So wiesen die Kartoffelstärke-Szenarien aufgrund des geringeren Energiebedarfs der Stärke-Produktion und des hohen flächenbezogenen Stärkeertrags insbesondere bei einer energie- und flächenfokussierten Bewertung Vorteile auf, während der extensive Weizenanbau dann besonders gut abschnitt, wenn Fragen der Naturraumbeanspruchung sowie Aspekte, die mit der Verwendung mineralischer Düngemittel und synthetischer Pflanzenschutzmittel verbunden waren, in den Vordergrund rückten. So entfiel beim konventionellen Anbau der Stärke-Pflanzen rund die Hälfte des Energieaufwandes im Bereich der Landwirtschaft auf die Bereitstellung mineralischer Stickstoffdünger; die Trocknung erntefeuchter Maiskörner hatte einen vergleichbaren Energiebedarf wie deren landwirtschaftliche Erzeugung. Mit dem Wechsel zum extensiven Anbau gingen auch die ansonsten sehr hohen Einwohnerwerte zur Pflanzenschutzmittel-Menge auf null zurück. Andererseits stieg der Flächenverbrauch beim Weizenanbau mit der Extensivierung um rund ein Drittel an; aus Sicht des Naturschutzes waren diese Flächen aber höherwertiger einzustufen. Die Unterschiede innerhalb der konventionellen Anbauvarianten waren jedoch noch größer: Die Kartoffelproduktion erforderte bezogen auf die gleiche Stärke-Menge rund 40 % weniger Fläche als der konventionelle Weizen- bzw. Maisanbau. Aufgrund relativ geringer Ertragsunterschiede zum nicht untersuchten extensiven Kartoffelanbau wäre dieser in Kombination mit der umweltgünstigeren Kartoffelstärke-Produktion (Abwasserverregnung) die beste Variante.

Einfluss des Zusatzes von Polyvinylalkohol in den Stärke-loose-fill-Packmitteln

Zu Erhöhung der Abriebsfestigkeit wurde für die Herstellung der Stärke-loose-fill-Packmittel ein Anteil an Polyvinylalkohol (PVA) eingesetzt. Die PVA-Bereitstellung trug bei vielen Indikatoren deutlich über den Anteil hinaus, den dieses Additiv an den Stärke-Packmitteln hatte, zu den Ergebnissen bei. So waren knapp 13 Gew.-% PVA-Zusatz für über ein Drittel des Verbrauchs fossiler Rohstoffe verantwortlich – und damit für etwa den gleichen Anteil, der auf die Stärke-Bereitstellung entfiel.

Verwendung von Maisgrieß anstelle von Stärke zur Loose-fill-Packmittel-Produktion

Wurde anstelle von Maisstärke Maisgrieß eingesetzt und zusammen mit Polyvinylalkohol verarbeitet, so fielen die Ökobilanz-Ergebnisse relativ ähnlich aus, wobei Maisstärke minimale Vorteile aufwies. Eine andere Stärkeart (z.B. Kartoffelstärke) würde den Vorsprung jedoch vergrößern. Sollte bei Maisgrieß-Verwendung ein höherer PVA-Anteil erforderlich sein, so würden sich die Ergebnisse weiter zugunsten der Stärke-Verwendung verschieben.

6.1.3.4 Stärke-loose-fill-Packmittel: Einfluss der Entsorgungsverfahren

Maßgeblich zur Differenzierung der Stärke-Szenarien trug die Art der Entsorgung bei: Dabei schnitt der bundesdeutsche Beseitigungsmix aufgrund des hohen Deponierungsanteils knapp vor der Kompostierung am ungünstigsten ab. Der Beitrag zum Treibhauspotential war bei einer Entsorgung über den Beseitigungsmix aufgrund deponierungsbedingter Methanemissionen sowie bei der Kompostierung wegen fehlender energetischer Zusatznutzen trotz der Verwendung eines nachwachsenden Rohstoffes sehr hoch.

Sehr positiv erwies sich dagegen die energetische Verwertung des weitgehend regenerativen Energieträgers „Gebrauchte Stärke-loose-fill-Packmittel“. Dafür kamen sowohl eine Vergärung mit Biogasnutzung als auch eine Verbrennung in Frage. Hohe Standards bei der Abwasser- und Rauchgasreinigung vorausgesetzt galt, dass diese Verfahren umso besser abschnitten, je höher der Wirkungsgrad war. Die Entsorgung konnte auf diesem Wege dazu beitragen, dass der Bedarf an fossilen und nuklearen Energieträgern in den betrachteten Szenarien um rund die Hälfte abgesenkt wurde. Gerade weil sich hier größere Optimierungspotentiale eröffneten, war anzumerken, dass sowohl Vergärungs- als auch Verbrennungsanlagen mit hohem Wirkungsgrad

technisch zwar weitgehend ausgereift sind, in der Praxis bisher jedoch nur sehr geringe Bedeutung bei der Entsorgung von Stärke-loose-fill-Packmittel hatten.

6.1.3.5 Bedeutung der Nutzungsphase (Wiederverwendung und Transportentfernung)

Die Wiederverwendung der Loose-fill-Packmittel stellte materialunabhängig eine sehr wirksame Maßnahme dar, um Umweltbelastungen zu reduzieren. So führte eine zweifache Wiederverwendung nahezu bei allen Indikatoren zur Halbierung der Ergebnisse. Dies lag zum Einen daran, dass die Vertriebs- und Nutzungsphase meist nur geringen Anteil an den Ergebnissen hatte. Zum Anderen ergaben sich deutliche Einsparungen bei der Materialbereitstellung und der Loose-fill-Packmittel-Produktion. Auch der Rückgang der Abfallmengen machte sich in nahezu allen Fällen positiv bemerkbar. Positiv wirkte ebenso, dass Loose-fill-Packmittel ohne Reinigung und mit nur geringen Transportaufwendungen wiederverwendet werden konnten. Am besten schnitt dabei die direkte Wiederverwendung durch Empfänger von Waren ab. Mit nur geringem Abstand folgte die mit zusätzlichen Transporten verbundene Wiederverwendung über Wertstoffhöfe bzw. Zwischenhändler.

Wurden Loose-fill-Packmittel als Transportverpackung eingesetzt, so wirkten sich größere Transportentfernungen aufgrund des im Vergleich zum Packgut in der Regel deutlich geringeren Gewichtes nur unbedeutend auf die Ergebnisse aus, wobei sich Änderungen in erster Linie für die transportbeeinflussten Wirkungsindikatoren (vor allem Dieselpartikel- und Stickoxid-Emissionen) ergaben. Der Einfluss der Transportentfernung war bei der Stärke-Variante aufgrund der dreifach größeren Schüttdichte geringfügig erhöht.

6.1.4 Auswertung ausgewählter spezieller Ergebnisse der Ökobilanz

Nach der verbal-argumentativen Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmittel, bei der im Wesentlichen die Bedeutung einzelner Lebenswegabschnitte und die Gründe dafür diskutiert und herausgearbeitet wurden, sollen in den nachfolgenden Kapiteln 6.1.4.1 bis 6.1.4.4 die qualitativen Aussagen anhand einiger Beispielparameter quantitativ dargestellt und untermauert werden.

Aus der Vielzahl der Parameter und Szenarien, die ausgewertet wurden, werden nun näher dargestellt:

- KEA gesamt und KEA solar
- Treibhauspotential
- Ozonbildungspotential
- Naturraumbeanspruchung

Die Auswertung dieser ausgewählten speziellen Ergebnisse aus der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln erfolgt anhand der Szenarien des 2. Auswertungsschrittes (vgl. Kapitel 6.1.2.2.4). Diese Parameter wurde aus der Vielzahl der betrachteten Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien (vgl. Kapitel 6.1.2.2.2) deshalb ausgewählt, weil sie in der Diskussion über die Vor- und Nachteile des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe oder biotechnologischer Produkte und Verfahren häufig herangezogen werden. Die ausführliche Darstellung und Diskussion aller in der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmittel betrachteten Parameter findet sich im ausführlichen Bericht der Ökobilanz (Würdinger et al. 2002).

Neben der Darstellung der Brutto- und Netto-Ergebnisse zeigen die nachfolgenden Abbildungen zu den Parametern auch die Lebenswegabschnitte mit ihren absoluten Beiträgen zu den Brutto-Ergebnissen. Darüber hinaus wurde durch eine Normierung auf das Szenario mit den höchsten Netto-Ergebnissen das Optimierungspotential, das bei der entsprechenden Gestaltung der Lebenswege möglich ist, quantifiziert.

6.1.4.1 KEA gesamt

Da der kumulierte Energieverbrauch eine wichtige Größe zur Beurteilung von Produktsystemen im Allgemeinen und speziell auch biotechnologischer Produkte und Verfahren darstellt und zudem ein wichtiger Verursacher von Ressourcenverbrauch und Schadstoffemissionen ist, wird die Auswertungen zum KEA gesamt aus dem ausführlichen Bericht zur Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel in dieser Studie aufgegriffen und nachfolgend dargestellt (vgl. Würdinger et al. 2002).

Im Rahmen dieser Studie wird auf die Auswertungen des KEA gesamt für die Szenarien des zweiten Auswertungsschrittes (vgl. Kapitel 6.1.2.2.4) auch unter Berücksichtigung der in den Stärke- und EPS-loose-fill-Packmitteln gespeicherten Feedstockener-

gie Bezug genommen und es erfolgt eine sektorale Darstellung des KEA gesamt aufgeteilt nach Lebenswegabschnitten (siehe Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4). Die Feedstockenergie ist der stofflich genutzte Anteil der Energieträger. Im Falle der Stärke-loose-fill-Packmittel war dies die in der Stärke gespeicherte Energie und im Falle der EPS-loose-fill die im expandierten Polystyrol gespeicherte Energie. Die Feedstockenergie wurde bei den Stärke-Szenarien als KEA solar ausgewertet. Der KEA gesamt setzte sich deshalb bei den Stärke-Szenarien aus dem KEA fossil und dem um etwa den Faktor zehn niedrigerem KEA nuklear zusammen, zuzüglich des KEA solar, der dazu addiert wurde.

Nachfolgend wurde deshalb vor allem der Vergleich zwischen Stärke- und EPS-Szenarien thematisiert. Beim Vergleich waren zwei verschiedene Darstellungsweisen zu unterscheiden. Bei der anwendungsbezogenen Darstellung war die funktionelle Einheit 100 m^3 Loose-fill-Packmittel die Bezugsgröße für die Ergebnisse. In diesem Fall wirkte es sich ergebnisentscheidend aus, dass die Stärke-loose-fill-Packmittel mit 1.200 kg/m^3 ein dreimal so hohes spezifisches Gewicht aufwies wie die EPS-loose-fill-Packmittel mit 400 kg/m^3 (vgl. Abbildung 6-4). Die materialbezogene Darstellung hatte ein kg Stärke oder EPS als Bezugsgrößen und stand für den Fall, dass Produkte aus fossilen und nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wurden, die das gleiche spezifische Gewicht bei funktionaler Gleichwertigkeit aufwiesen (vgl. Abbildung 6-5).

6.1.4.1.1 KEA gesamt berechnet aus KEA fossil und KEA nuklear

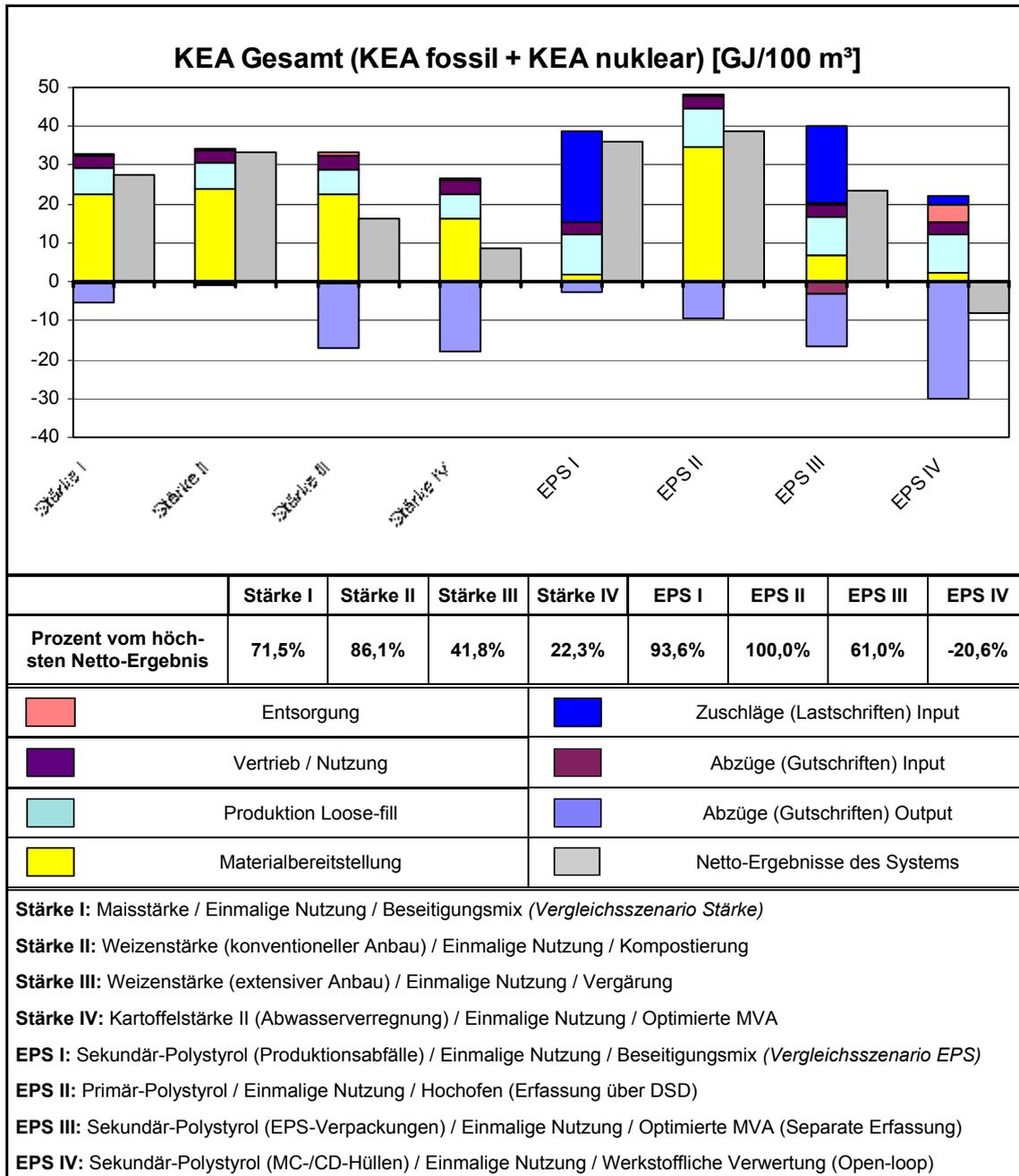


Abbildung 6-3: Beitrag zum KEA gesamt (Summe aus KEA fossil und KEA nuklear)-Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die **funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel**

Aufgrund der Dominanz des KEA fossil bei einer Betrachtung ohne KEA solar waren die Ergebnisse zum KEA gesamt praktisch identisch mit denjenigen beim KEA fossil. Die Reihenfolge der Szenarien änderte sich nicht, die Abstände zwischen den Szenarien nur geringfügig. Den höchsten Wert wies das Szenario EPS II, also die Nutzung von Primär-Polystyrol auf; den günstigsten Wert das Szenario EPS IV, also der Einsatz von MC-/CD-Hüllen. Zwar schnitten zwei EPS-Szenarien beim KEA gesamt ohne KEA solar schlechter ab als alle Stärke-Szenarien, das Szenario EPS III mit energetischer Verwertung der EPS-loose-fill-Packmittel war jedoch günstiger als die Entsorgung der Stärke-loose-fill-Packmittel im Beseitigungsmix (Stärke I) oder via Kompostierung (Stärke II). Wieder besser im Vergleich schnitt die energetische Verwertung der Stärke-loose-fill-Packmittel ab (Stärke III und IV), zu der die EPS-Szenarien nur dann gleich ziehen konnten, wenn die Loose-fill-Packmittel-Abfälle werkstofflich verwertet wurden (EPS IV). Die Unterschiede zwischen dem jeweils ungünstigsten Stärke- und EPS-Szenario betragen nur 14 %. Andererseits war aber zwischen den Stärke-Szenarien und den Szenarien EPS I und III auch ein maximales Einsparungspotential von 77,7 % möglich, was auf die Bedeutung einzelner Prozesse für die ressourcenbezogene Bewertung der Szenarien hinwies.

Die Analyse der Ergebnisse verdeutlichte die Bedeutung der Lebenswegabschnitte. Die Ergebnisse des KEA gesamt ohne KEA solar waren analog zum KEA fossil vor allem über die Aufwendungen bei der Materialbereitstellung, die eng damit verbundenen Zuschläge Input bei den Sekundär-EPS-Szenarien, über die vor allem der Wert bzw. entgangene Nutzen der im Produktsystem verwerteten Polystyrol-Abfälle quantifiziert wurden, sowie die Abzüge Output, die auf die Zusatznutzen der Entsorgung zurückzuführen waren, bestimmt. Mit rund 10 GJ/100 m³ leistete die mengenmäßig geringe Zugabe von PVA zu den Stärke-loose-fill einen deutlichen Beitrag zum KEA gesamt im Bereich der Materialbereitstellung bei den Stärke-Szenarien. Damit lag der absolute Bedarf an fossiler und nuklearer Energie für die Bereitstellung von Stärke (1039 kg) und PVA (152) trotz erheblicher Mengendifferenzen in der gleichen Größenordnung. Aus dem Rahmen fiel hier aufgrund der insgesamt damit einhergehenden Entlastung das Szenario EPS IV. Da in diesem Szenario sowohl andernfalls wenig hochwertig verwertete Polystyrol-Abfälle eingesetzt wurde als auch die Produktion eines hochwertigen Polystyrol-Regranulats angenommen wurde, wird dieser Variante in der Praxis wohl immer eine sehr nachgeordnete und unbedeutende Rolle zukommen.

Andererseits zeigte sich aber auch, dass die energetische Verwertung der Stärke-loose-fill-Packmittel entscheidend dazu beitrug, den Einsatz begrenzter fossiler und nuklearer Energieträger zu mindern – und die EPS-Szenarien nur bei einer werkstofflichen Verwertung in diesen Bereich gelangen können. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn die im Szenario EPS I, das die Hauptmaterialmenge bei der Produktion von EPS-loose-fill-Packmitteln repräsentiert, angenommene Entsorgung im Beseitigungsmix durch eine werkstoffliche Verwertung ersetzt würde: Der KEA gesamt (ohne KEA solar) würde dann mit 8,5 GJ/100 m³ praktisch identisch zum Wert für das beste Stärke-Szenario IV sein. Andererseits war hierbei auch wieder zu beachten, dass der Wert beim Szenario Stärke IV knapp unter 0 GJ/100 m³ anzusiedeln wäre, wenn kein Polyvinylalkohol zugesetzt würde.

6.1.4.1.2 KEA gesamt inklusive KEA solar

Die Abbildung 6-4 zeigt die Ergebnisse für den KEA gesamt inklusive des KEA solar also der Feedstockenergie der Stärke-Loose-fill-Packmittel. Die in den Stärke-Loose-fill-Packmitteln enthaltene und über den Heizwert quantifizierte Feedstockenergie betrug in allen Stärke-Szenarien 19,2 GJ/100 m³ und machte damit insgesamt zwischen 42,2 % und 53,7 % der in das Produktsystem eingebrachten Energie im Packmittel aus bezogen auf den KEA gesamt inklusive KEA solar. Während bei den EPS-Szenarien die Ergebnisse zum KEA gesamt identisch blieben, wenn man zusätzlich den KEA solar dazu addierte, steigerten sich die Werte bei den Stärke-Szenarien um rund 50 % bis zu 170 % (vgl. Abbildung 6-4), was durch den erhöhten Beitrag der Materialbereitstellung deutlich wurde.

Dazu gab es nun zwei Sichtweisen: In den Stärke-Szenarien wurde deutlich mehr Energie verbraucht, als sich im KEA fossil und KEA nuklear ausdrückt – oder: Ein bis zwei Drittel und damit ein großer Teil des Energieaufwandes bei den Stärke-Szenarien wurde durch rezent in Biomasse gespeicherte Sonnenenergie aufgebracht, was zur Schonung endlicher Ressourcen beiträgt bzw., wie die Ergebnisse zeigten, prinzipiell beitragen könnte. Die Stärke-Szenarien griffen damit zusätzlich zu fossilen und nuklearen Energieträgern auch auf Sonnenenergie zurück, die in menschlichen Zeiträumen gemessen unbegrenzt zur Verfügung steht. Der Verbrauch fossiler Energieträger in den EPS-Szenarien und die Freisetzung des darin enthaltenen Kohlenstoffs waren

hauptverantwortlich für die Zunahme des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre und damit entscheidend für den anthropogenen Treibhauseffekt.

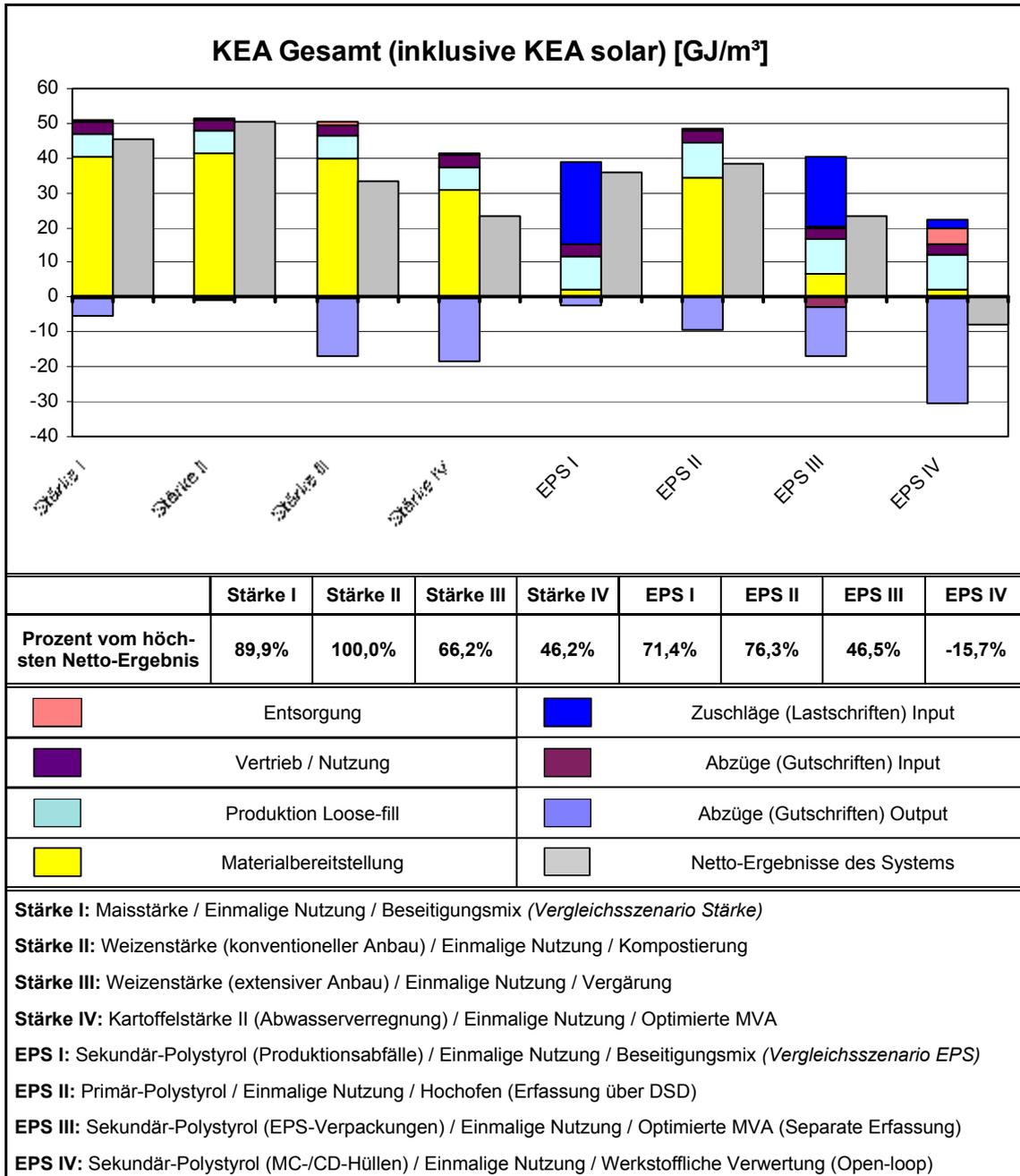


Abbildung 6-4: Beitrag zum KEA gesamt unter Berücksichtigung und Vernachlässigung der Feedstockenergie der stofflich genutzten Anteile an Stärke und Polystyrol - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel

Auch wenn in diesem Fall zwei Stärke-Szenarien ungünstiger als alle EPS-Szenarien abschnitten, zeigte sich wiederum, dass es keinen grundsätzlichen Vorsprung einer Materialvariante gab. Ganz im Gegenteil schnitten beispielsweise Stärke- und EPS-loose-fill-Packmittel nahezu identisch ab, wenn man von einer energetischen Verwertung in einer optimierten Müllverbrennungsanlage ausging. Der Unterschied bestand dann darin, dass bei den Stärke-loose-fill-Packmitteln etwas über die Hälfte des gesamten Energiebedarfs über nachwachsende Rohstoffe gedeckt wurde, während die EPS-Variante praktisch vollständig auf fossile und nukleare Energieträger angewiesen war.

6.1.4.1.3 KEA gesamt bezogen auf 1 kg Stärke bzw. Polystyrol

Die Abbildung 6-5 stellt den KEA gesamt nun nicht mehr bezogen auf Lebenswegabschnitte dar, sondern unterteilt nach den Beiträgen aus KEA fossil, KEA nuklear und KEA solar, der nur bei den Stärke-Szenarien eine Rolle spielte. Darüber hinaus war die Vergleichsgröße dieser materialbezogenen Sichtweise nicht mehr die funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel, sondern jeweils ein kg Stärke bzw. EPS-Loose-fill-Packmittel unter der Annahme, dass die Produkte aus nachwachsenden und fossilen Rohstoffen bei gleichem spezifischen Gewicht auch eine funktionale Gleichwertigkeit aufwiesen.

Da bei den EPS-Szenarien die Feedstockenergie des Polystyrols immer eingerechnet wurde, weil der KEA fossil eine endliche energetische Ressource ausdrückte, wurde der KEA gesamt bei den Stärke-Szenarien mit und ohne KEA solar dargestellt. Die im Stärke-loose-fill-Packmittel enthaltene und über den Heizwert quantifizierte Feedstockenergie betrug in allen Stärke-Szenarien 16 MJ/kg. Die Feedstockenergie in den EPS-loose-fill-Packmitteln betrug in allen Szenarien 37,0 MJ/kg.

Das ein Optimum darstellende realitätsferne Szenario EPS IV war immer noch das günstigste Szenario. In allen anderen Fällen lag der KEA gesamt der EPS-Szenarien inklusive der Feedstockenergie mindestens um rund 50 % über den Stärke-Werten, selbst wenn bei diesen der KEA solar berücksichtigt wurde. Wurde dieser in den Vergleich nicht eingezogen, so wies die energieintensivste Stärke sogar einen Vorteil von knapp 80 % gegenüber der EPS-Bereitstellung in den Szenarien EPS I und EPS II auf.

Dass dies in den Ergebnissen zum KEA gesamt bei einer anwendungsbezogenen Sichtweise (100 m³ Loose-fill-Packmittel) nicht so zum Ausdruck kam, lag an zwei Fak-

toren: Zum Einen wirkte sich doch der Zusatz von Polyvinylalkohol auf den KEA gesamt bei der Materialbereitstellung mit einem Bedarf von 10,0 GJ/100 m³ Stärke-loose-fill-Packmittel aus und zum Anderen wurde für die Stärke-loose-fill-Packmittel im Vergleich zur EPS-Variante die dreifache Materialmenge benötigt. Daraus ergab sich, dass die Stärke-Bereitstellung bezogen auf die gleiche Menge (1 kg) grundsätzlich deutlich weniger fossile Rohstoffe benötigte.

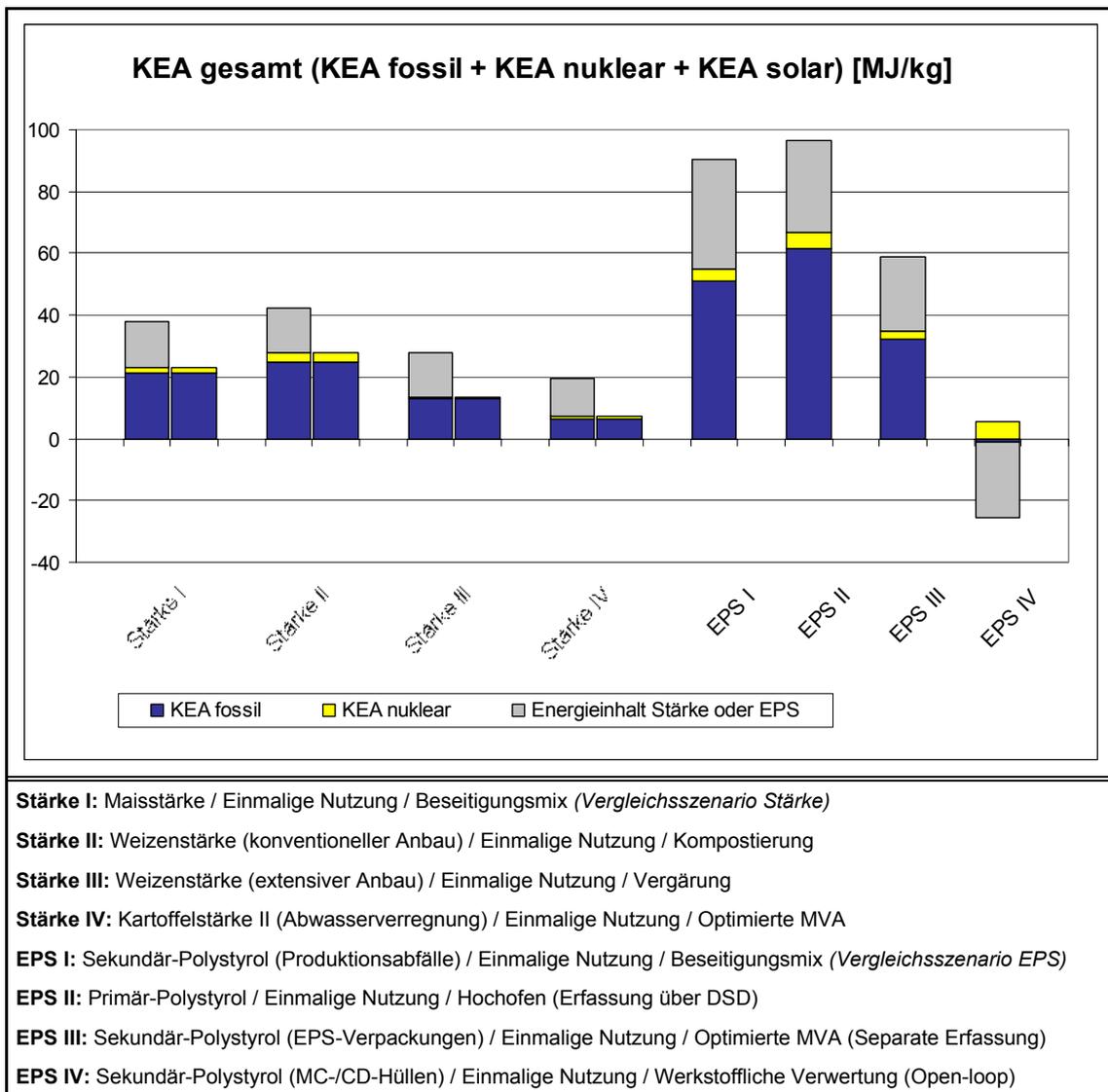


Abbildung 6-5: Beitrag zum KEA gesamt unter Berücksichtigung und Vernachlässigung der Feedstockenergie bei den Stärke Szenarien - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf 1 kg Stärke oder Polystyrol

6.1.4.2 Treibhauspotential

Da nachwachsende Rohstoffe während ihrer Wachstumsphase Kohlendioxid fixieren – und nach deren Nutzung nur diese Kohlenstoffmenge daraus wieder freigesetzt werden kann, wird häufig davon ausgegangen, dass Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen „CO₂-neutral“ seien. Dies ist als Ausdruck der Annahme zu verstehen, dass die Nutzung nachwachsender Rohstoffe anstelle von Materialien auf Basis fossiler Rohstoffe stets dazu beiträgt, die unerwünschten Auswirkungen von Treibhausgas-Emissionen, die vor allem auf fossile Rohstoffe zurückzuführen sind, u.U. bis gegen null verringern zu können.

Angesichts dieser an sich sehr plausiblen Überlegungen überraschten die in Abbildung 6-6 dargestellten Ergebnisse zum Treibhauspotential: Eindeutig am ungünstigsten schnitten zwei Szenarien ab, bei denen der nachwachsende Rohstoff Stärke verwendet wurde (Stärke I, Stärke II). Dass dies jedoch nicht am Material lag, zeigten die beiden Szenarien Stärke III und Stärke IV, die wiederum deutlich besser waren als die EPS-Szenarien I-III. Nur das Szenario EPS IV lag noch einmal günstiger, stellte aber auch das nicht verallgemeinerbare Optimum bei EPS-loose-fill-Packmitteln dar. Würde die dabei betrachtete werkstoffliche Verwertung beispielsweise mit der im Szenario EPS I modellierten Verwendung von Polystyrol-Produktionsabfällen (anstelle von MC-/CD-Hüllen) kombiniert, so läge das Netto-Ergebnis schon beinahe doppelt so hoch wie beim besten Stärke-Szenario (Stärke IV). Entscheidend für das Abschneiden der Szenarien waren insbesondere

- die Materialbereitstellung,
- die eng damit zusammenhängenden Zuschläge Input bei den Sekundär-Polystyrol-Szenarien,
- die direkten Emissionen bei der Entsorgung und
- die Abzüge Output, die sich für die Zusatznutzen aus der Entsorgung ergaben.

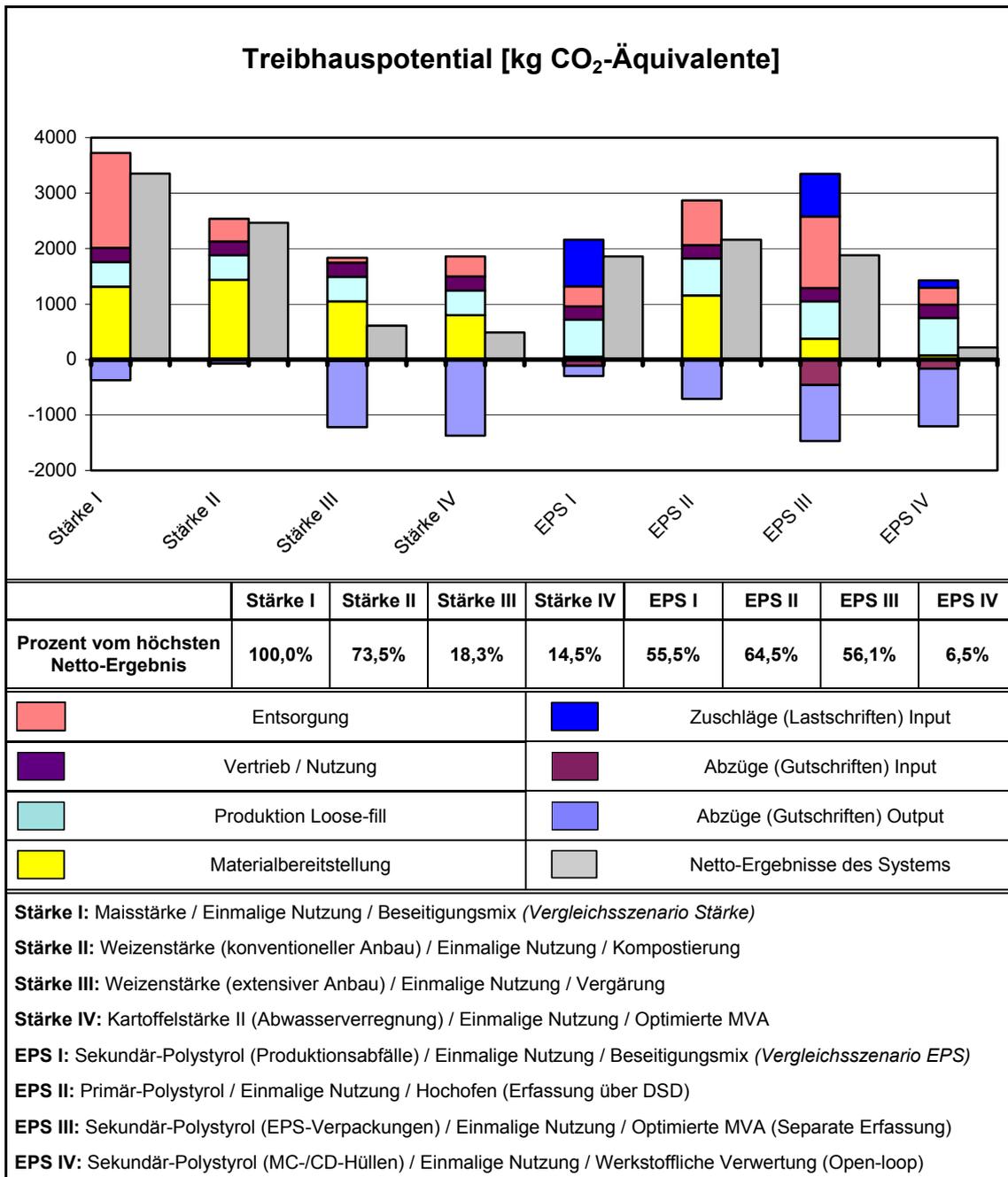


Abbildung 6-6: Beitrag zum Treibhauspotential - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel

Der Anteil der Vertriebs- und Nutzungsphase war materialunabhängig relativ gering und in allen Szenarien nahezu identisch. Der Beitrag der Produktion der Loose-fill-Packmittel fiel bei der Stärke-Variante absolut um rund ein Drittel geringer aus als bei den EPS-Szenarien. Dies war auf den wesentlich niedrigeren Verbrauch an thermi-

scher Energie bei der Produktion der Stärke-loose-fill-Packmittel zurückzuführen. Der Produktions-Anteil an den Brutto-Ergebnissen lag bei den Stärke-Szenarien zwischen 6,8 % und 13,8 %, bei den EPS-Szenarien (Brutto-Ergebnisse zuzüglich Zuschläge Input) zwischen 20,0 % und 47,1 %. Der im Vergleich zu den anderen EPS-Szenarien wesentlich höher liegende letzte Wert gehörte zum Szenario EPS IV, das aufgrund niedriger Zuschläge Input und geringer Emissionen aus der werkstofflichen Verwertung insgesamt bereits sehr gut abschnitt. Zusätzlich wirkten sich die relativ hohen Abzüge Output, die auf den Ersatz von Primär-Polystyrol zurückgehen, sehr positiv aus, sodass dieses Szenario merklich besser war als alle anderen Szenarien.

Relativ niedrig lagen aber aufgrund hoher Abzüge Output auch bereits die beiden Stärke-Szenarien mit energetischer Verwertung der gebrauchten Stärke-loose-fill-Packmittel (Stärke III und IV), wobei beim Szenario Stärke IV der aus fossilen Rohstoffen hergestellte und als Additiv zugesetzte Polyvinylalkohol bei der Abfallverbrennung zu fossilem Kohlendioxid umgewandelt wurde, während bei der Vergärung (Stärke III) davon ausgegangen wurde, dass dieser Anteil nicht abgebaut wurde und damit nicht ins Biogas gelangte. Dagegen wurde bei der energetischen und der rohstofflichen Verwertung der in den Loose-fill-Packmitteln enthaltene fossile Kohlenstoff nahezu vollständig in Kohlendioxid umgewandelt. Entsprechend ergaben sich in den Szenarien EPS II und EPS III größere Beiträge zum Treibhauspotential im Bereich der Entsorgung – und korrespondierend relativ hohe Abzüge Output für die Zusatznutzen Strom, Wärme und Reduktionspotential.

Sehr ungünstig wirkte sich dagegen die Entsorgung der Stärke-loose-fill-Packmittel im bundesdeutschen Beseitigungsmix (Stärke I) aus: Da dabei 70 Gew.% der biologisch abbaubaren Packmittel deponiert wurden, entstanden in größerem Umfang sehr treibhauswirksame Methan-Emissionen, die dazu führten, dass dieses Szenario insgesamt deutlich schlechter abschnitt als alle anderen Szenarien. An nächster Stelle folgte das Szenario Stärke II. Die darin modellierte, derzeit als Entsorgungsverfahren für biologisch abbaubare Werkstoffe (aus nachwachsenden Rohstoffen) favorisierte Kompostierung führte aufgrund in diesem Fallbeispiel fehlender Zusatznutzen dazu, dass trotz Verwendung eines nachwachsenden Rohstoffes der Beitrag zum Treibhauspotential um mindestens 13 % bis zu 25 % höher ausfiel als bei den relativ nahe beieinander liegenden EPS-Szenarien I bis III.

Auch die Materialbereitstellung - 1.200 kg bei den Stärke-Szenarien, 400 kg bei den EPS-Szenarien - trägt in erheblichem Umfang zum Treibhauspotential bei. So stammen die Einzelbeiträge zu den Brutto-Ergebnissen bei den Stärke-Szenarien zu 35,3 % bis 57,3 % aus diesem Lebenswegabschnitt, der auch die Herstellung von Polyvinylalkohol einschließt, die mit 235 kg CO₂-Äquivalenten zum Ergebnis beiträgt. Bei den EPS-Szenarien verursacht insbesondere die Bereitstellung von Primär-Polystyrol (EPS II) sowie die Regranulierung von EPS-Packmittel-Abfällen (EPS III) Freisetzungen von Treibhausgasen; beides wirkt sich in unterschiedlichem Ausmaß auch auf die relativ hohen Zuschläge Input bei den Szenarien EPS I und EPS III aus, in denen anderweitig ebenfalls hochwertig verwertete Polystyrol-Abfälle als Materialquelle genutzt werden. Gravierende Auswirkungen auf die Ergebnisse haben jedoch nur die sehr geringen Zuschläge Input, die sich für die im Szenario EPS IV verwerteten, andernfalls zu 95 Gew.-% beseitigten MC- und CD-Hüllen ergeben.

Damit ergaben sich folgende wesentliche Erkenntnisse bzw. Optimierungspotenziale aus der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln: Der Beitrag zum Treibhauseffekt war mehr von der Entsorgung als von der Rohstoffart abhängig. Hier wirkten sich zum Einen besonders die Emissionen aus, die direkt bei der Entsorgung entstanden, zum Anderen beeinflussten die bei der Entsorgung erzeugten Zusatznutzen über die dafür berechneten Abzüge Output entscheidend die Ergebnisse. Die entscheidende Reduzierung ergab sich bei den Stärke-Szenarien über die energetische Verwertung der gebrauchten Loose-fill-Packmittel. Wäre diese umgesetzt, so hätten die EPS-loose-fill-Packmittel nur dann eine Chance, vergleichbar abzuschneiden, wenn zum Einen nicht hochwertig verwertete Polystyrol-Abfälle als Sekundär-Polystyrol-Quelle genutzt würden und zum Anderen die EPS-loose-fill-Packmittel werkstofflich verwertet würden. Noch weiter abgesenkt werden könnten die Treibhausgas-Emissionen bei den Stärke-Szenarien, wenn auf den Zusatz von Additiven auf Basis fossiler Rohstoffe verzichtet wird. Dies würde ausgehend vom Szenario Stärke IV aufgrund der Rückgänge bei der Materialbereitstellung sowie der Vermeidung der Emissionen aus der Entsorgung sogar zu leicht negativen Werten führen. Die Kompostierung der Stärke-loose-fill-Packmittel verhinderte dagegen, dass der prinzipielle Vorteil des nachwachsenden Rohstoffes gegenüber EPS-loose-fill-Packmitteln wirksam wurde; eine Deponierung sollte wegen der noch einmal erheblich ungünstigeren Ergebnisse auf jeden Fall vermieden werden.

Aufgrund der dargestellten Einflüsse aus der Materialbereitstellung und Entsorgung ergaben sich bei den Netto-Ergebnissen zwischen dem schlechtesten (Stärke I) und dem besten (EPS IV) Szenario ein Unterschied von 93,5 %. Die Unterschiede zwischen den Stärke-Szenarien waren maximal 85,5 % (Stärke I zu Stärke IV). Die Unterschiede zwischen den EPS-Szenarien waren maximal 58 % (EPS III zu EPS IV). Diese Unterschiede stellen vorbehaltlich einer technischen Realisierung und der erforderlichen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen u.U. auch Umweltentlastungspotentiale dar.

6.1.4.3 Ozonbildungspotential

Anders als bei den anderen behandelten Indikatoren, bei denen wesentliche Einflüsse die Materialherstellung und Entsorgung waren, zeigten sich beim Ozonbildungspotential, in dem die Emissionen an leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffen zu Ethen-Äquivalenten zusammengefasst wurde, deutliche materialabhängige Unterschiede zwischen den Stärke- und den EPS-Szenarien.

Die Nettoergebnisse der EPS-Szenarien lagen um rund das Zehnfache höher als die Nettoergebnisse der Stärke-Szenarien.

Dabei entfielen bei den EPS-Szenarien rund 95 % des Beitrags zum Ozonbildungspotential auf die Produktion der Loose-fill-Packmittel, wobei dabei die Treibmittel-Emissionen (Pentan, Butan) eindeutig überwiegen und damit diesen Vergleich nahezu ausschließlich bestimmen. Dabei beruhte dieses Ergebnis auf der Annahme, dass die Treibmittel vollständig im Bereich der Loose-fill-Packmittel-Produktion wieder freigesetzt wurden.

Alle anderen Beiträge waren demgegenüber zu vernachlässigen. Eine Annäherung zwischen den beiden Loose-fill-Packmittel-Varianten ist folglich möglich, wenn der Beitrag der EPS-Treibmittel zum Ozonbildungspotential deutlich abgesenkt wird. Dazu kommen prinzipiell zwei Vorgehensweisen in Betracht: Der Einsatz alternativer Treibmittel, die nicht zur Ozonbildung beitragen, oder die Rückhaltung bzw. Vernichtung der als Treibmittel eingesetzten leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffe mittels einer dafür geeigneten Abgasreinigung.

Aufgrund materialbedingter Unterschiede in Produktionsprozess der Loose-fill-Packmittel lag der Unterschied und damit das Optimierungspotential zwischen allen Stärke- und allen EPS-Szenarien bei rund 91 %.

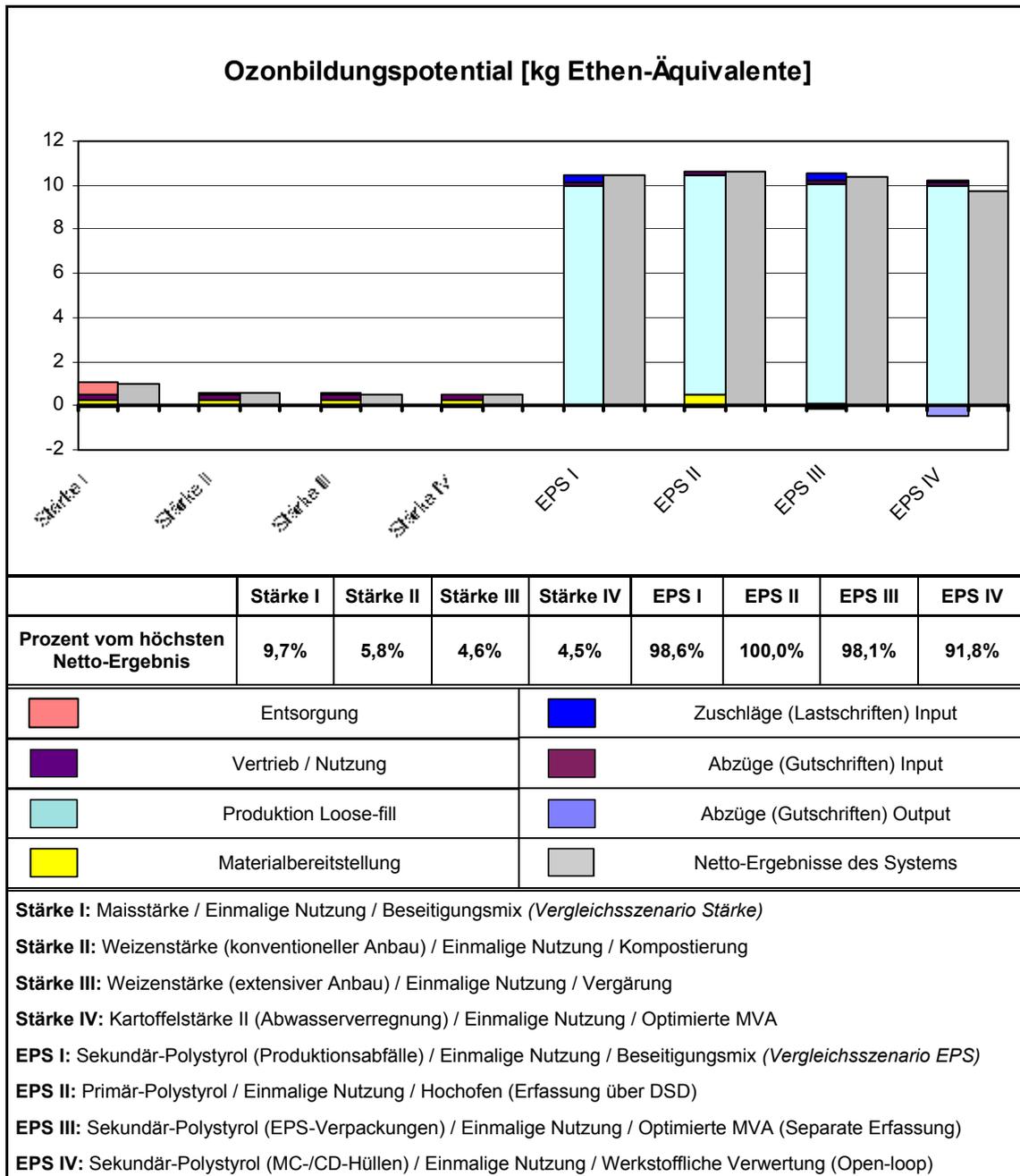


Abbildung 6-7: Beitrag zum Ozonbildungspotential - Vergleich zwischen EPS- und Stärke-Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit von 100 m³ Loose-fill-Packmittel

6.1.4.4 Naturraumbeanspruchung

Die Abbildung 6-8 fasst die Ergebnisse zur Naturraumbeanspruchung, die sich beim Vergleich von Stärke- und EPS-Szenarien ergaben, in absoluten Werten zusammen. Es wurde zwischen den Flächenkategorien IV bis VI unterschieden. Die Anbauflächen für Mais, Kartoffeln und konventionell produziertem Weizen entsprachen der Natürlichkeitsklasse VI, die der Grünbrache der Natürlichkeitsklasse V und die des extensiven Weizenanbaus der Natürlichkeitsklasse IV. In der Natürlichkeitsklasse VII fanden sich versiegelte oder sehr lange Zeit degradierte Flächen (entspricht hier Deponieflächen). Dass sich für die Grünbrache (Natürlichkeitsklasse V) durchgehend negative Werte ergaben, war darauf zurückzuführen, dass für den Anbau der Stärke-Pflanzen Flächen genutzt wurden, die andernfalls stillgelegt waren und als Grünbrache bewirtschaftet wurden. Je nach Anbauintensität wurden damit Flächen der Natürlichkeitsklasse V (Grünbrache) bei konventionellem Pflanzenbau in Flächen der Natürlichkeitsklasse VI, bei extensivem Anbau (Stärke III) in Flächen der Natürlichkeitsklasse IV umgewandelt.

Deutlich geht aus diesen beiden Tabellen noch einmal hervor, dass die Verwendung von EPS-loose-fill-Packmitteln insbesondere dann, wenn Sekundär-Polystyrol im System eingesetzt und dies mit einem Entsorgungsverfahren gekoppelt wurde, welches eine Deponierung der EPS-loose-fill-Packmittel vermied, zu Entlastungen bei der Naturraumbeanspruchung führen konnte (EPS III und EPS IV). Wurde dagegen auf den nachwachsenden Rohstoff Stärke gesetzt, so wurde absolut gesehen weit größere Flächen für die Produktion der nachwachsenden Rohstoffe benötigt.

Wie der Befund des höheren Flächenbedarfs bei den Stärke-Szenarien zu werten war, hing davon ab, wie die Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen sowie der Unterschied zwischen Flächen der Natürlichkeitsklasse VI und IV eingeschätzt wurde. Standen genügend Flächen zur Verfügung, wie dies der Fall war, wenn nur die Produktion der Stärke-loose-fill-Packmittel interessierte, so ging das Szenario Stärke III, in dem der extensive Anbau von Weizen untersucht wurde, mit einer deutlichen Aufwertung landwirtschaftlicher Flächen einher und war besser zu beurteilen als die EPS-Szenarien. Stehen landwirtschaftliche Nutzflächen beispielsweise aufgrund einer Konkurrenz unterschiedlicher nachwachsender Rohstoffe dagegen nicht ausreichend zur Verfügung, so würde diese Wertung anders ausfallen. Unabhängig von dieser Frage, die je nach Rahmenbedingungen und subjektiven Einschätzungen anders beurteilt

werden wird, sind über einen extensiven Kartoffelanbau bereits weitreichende Optimierungen möglich, da dieser kaum mehr Fläche als der konventionelle Anbau erfordert.

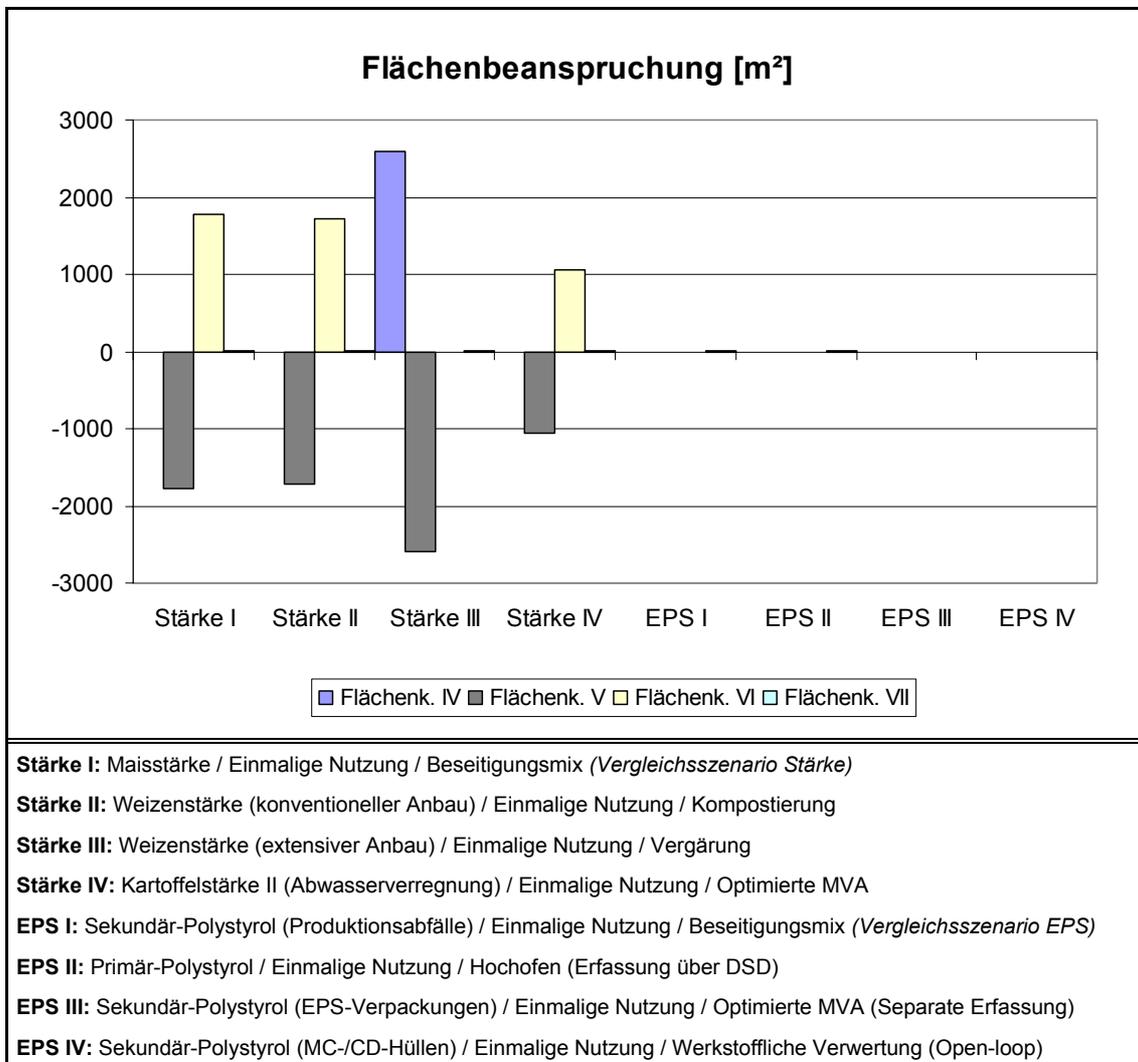


Abbildung 6-8: Flächenbeanspruchung (m²) verschiedener Flächenkategorien in den Stärke- und EPS-Szenarien

6.1.5 Schlussfolgerungen und Übertragbarkeit

Die eingangs in Kapitel 6.1.1 gestellten Fragen, unter denen die Ergebnisse der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmitteln aus Stärke bzw. Polystyrol im Rahmen dieser Studie ausgewertet wurden, wurden mithilfe ausgewählter Ergebnisse beantwortet. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse, nämlich welche Lebenswegabschnitte

ergebnisentscheidend sein können und die Ursachen für die Unterschiede zwischen nachwachsenden und fossilen Rohstoffen sind, abschließen noch mal in einem übergreifenden Vergleich aufgegriffen. Dabei wird deutlich, welchen Einfluss die konkrete Gestaltung der Lebenswege auf die Ergebnisse hat und wie diese auch von anwendungsbezogenen Besonderheiten und nicht allein durch materialspezifische Eigenschaften bestimmt werden.

Darüber hinaus geht es abschließend um die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Ökobilanz zu Loose-fill-Packmittel auf andere Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und auf die anderen Produkt- und Verfahrensvergleiche in diesem Projekt zur Verdeutlichung von Umweltentlastungspotentialen durch biotechnologische Produkte und Verfahren.

6.1.5.1 Vergleich der EPS- und Stärke-loose-fill-Packmittel-Szenarien

Obwohl die Szenarien sehr deutliche Unterschiede bezüglich der Umweltauswirkungen aufwiesen, ergaben sich weder für die Stärke- noch für die Polystyrol-Verwendung grundsätzliche Vorteile, wenn die vollständigen Ergebnisse der Ökobilanz in die Bewertung mit einbezogen werden (Würdinger et al. 2003).

Entscheidend für das umweltbezogene Abschneiden waren vor allem

- die konkrete Ausgestaltung der Materialbereitstellung,
- das Entsorgungsverfahren der Loose-fill-Packmittel,
- die von dem Entsorgungsverfahren und den zu entsorgenden Loose-fill-Packmitteln abhängenden Zusatznutzen bzw. die sich davon ableitenden Gutschriften für die Produktsysteme
- sowie spezifische anwendungsbezogene Merkmale, wie z.B. dass die Stärke-loose-fill-Packmittel bei gleichem Volumen dreimal so schwer sind wie die EPS-loose-fill-Packmittel.

Insgesamt schnitten die Stärke-Szenarien nur dann ähnlich gut ab wie die besseren EPS-Szenarien, wenn die Packmittel nach Gebrauch energetisch (Vergärung mit Biogasnutzung; Verbrennung mit hohem Wirkungsgrad) verwertet wurden. Ein extensiver Anbau, die Wahl einer Stärkepflanze mit sehr hoher flächenbezogener Stärkeausbeute (z.B. Kartoffeln) kombiniert mit einer optimierten Stärke-Produktion verbesserten die

Ergebnisse weiter. Die Entsorgung über den bundesdeutschen Beseitigungsmix oder mittels Kompostierung führten dagegen dazu, dass die Stärke-Szenarien keine nennenswerten Vorteile gegenüber den EPS-Szenarien aufwiesen – und sogar mit höheren Treibhausgas-Emissionen verbunden waren. Die Bereitstellung derselben Stärke-Masse benötigte erheblich weniger fossile Energieträger als die Polystyrol-Bereitstellung, die dreifach höhere Schüttdichte der Stärke-loose-fill-Packmittel sowie der Zusatz eines aus fossilen Rohstoffen hergestellten Additivs relativierten diesen Vorteil jedoch deutlich. Die Stärke-Szenarien würden deshalb von einer Reduzierung der Schüttdichte wesentlich profitieren. Als grundsätzlicher Unterschied zu den EPS-Szenarien verblieb stets die deutlich größere Naturrauminanspruchnahme, deren Wertung je nach Einschätzung der Sachlage unterschiedlich ausfallen wird. Analog galt dies auch für den Pflanzenschutzmittel-Einsatz bei konventionellem Stärkepflanzen-Anbau.

Positiv wirkte sich bei den EPS-Szenarien aus, wenn für die Packmittel-Herstellung Polystyrol-Abfälle genutzt wurden, die andernfalls nicht verwertet würden. Nur in diesem Fall war es möglich, mittels einer rohstofflichen oder energetischen Verwertung der Packmittelabfälle in den Bereich zu kommen, den die besten Stärke-Szenarien einnehmen. Werden dagegen bereits bisher hochwertig verwertete Polystyrol-Abfälle eingesetzt, so war es nur noch über eine werkstoffliche Verwertung der Packmittelabfälle möglich, dass diese ähnlich gut abschnitten wie die besten Stärke-Szenarien. Wurde der Einsatz ansonsten nicht verwerteter Polystyrol-Abfälle mit einer werkstofflichen Verwertung der EPS-Packmittel kombiniert - zwar eine optimale Gestaltung des Lebensweges, jedoch aus heutiger Sicht ziemlich realitätsfern -, so wäre diese Variante besser als die Stärke-Szenarien.

6.1.5.2 Übertragbarkeit auf andere Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Aus den Ergebnissen der Ökobilanz ließen sich aus Sicht der Autoren viele Hinweise gewinnen, welche Kriterien bei der Entwicklung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen und daraus hergestellten Produkten insgesamt beachtet werden sollten (Würdinger et al. 2003):

Die Vorgehensweise im Projekt war für die Untersuchung verwandter Fragestellung sehr gut geeignet und aufgrund dieser Vorarbeiten auch wesentlich einfacher darauf zu übertragen.

- Ab Entwicklungsbeginn sollte möglichst sichergestellt werden, dass der Bedarf an fossilen Rohstoffen für die Materialbereitstellung gegenüber etablierten Kunststoffen niedrig liegt.
- Als Rohstoffquelle sollten soweit möglich Pflanzen mit hohem Flächenertrag und guter Eignung für extensiven Anbau verwendet werden.
- Werden Kunststoff-Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt, so sollte der Materialbedarf nicht wesentlich höher als bei einem Kunststoff aus fossilen Rohstoffen sein.
- Umweltbelastungen durch eventuell notwendige Additive sind zu beachten und zu minimieren.
- Die biologische Abbaubarkeit spielt nur dann eine positive Rolle, wenn diese einen Produktnutzen darstellt bzw. explizit eine biologische Verwertung mittels Vergärung vorgesehen ist.
- Ist eine werkstoffliche Abfallverwertung nicht möglich, sollte energetisch verwertet werden.
- Möglichkeiten zur Umweltentlastung bei der Stromerzeugung, den Transporten und der Entsorgung sollten soweit möglich realisiert werden, da diese stets der Umwelt zugute kommen.

Angesichts der Ergebnisse der Ökobilanz wurde auch die Frage aufgeworfen, ob es nicht ein lohnendes Ziel wäre, Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zu entwickeln, die eben nicht biologisch abbaubar, sondern langlebig und damit mehrfach verwendbar sind und die dann auch werkstofflich sowie am Ende energetisch verwertet werden können.

Abschließend muss noch darauf hingewiesen werden, dass sich bei den Stärke-Szenarien erhebliche Verbesserungen der Ergebnisse erzielen ließen, wenn es gelänge, eine weitreichende Nutzung der Biomassen zu realisieren, aus denen die Stärke gewonnen wird. Bisher fallen beim Anbau der meisten Stärke-Pflanzen große Mengen an Biomasseresten an, die bislang nicht gezielt genutzt werden. Deshalb werden die

Aufwendungen für die Biomasseherstellung insgesamt jeweils auf die erzeugte Stärkemenge bezogen. Könnten weitere Biomasseanteile einer Nutzung zugeführt werden, würden die auf die Stärke entfallenden Anteile der Aufwendungen entsprechend absinken. Die Nutzungseffizienz der erzeugten Biomassen bietet somit noch erhebliche, bislang nicht erschlossenen Optimierungspotentiale.

6.2 Produktvergleich 2 - Tierproduktion unter Einsatz von Probiotika und Seltenen Erden

6.2.1 Basisinformationen

6.2.1.1 Wirtschaftliche Aspekte

Trotz fortschreitendem Strukturwandel in der Landwirtschaft und rückläufigen Bestandszahlen in der Nutztierhaltung, ist die tierische Veredlungswirtschaft nach wie vor von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Der Nutztierbestand lag nach den statistischen Angaben aus dem Jahr 2003 bei rd. 13,6 Mio. Rindern, 26,5 Mio. Schweinen, 2,6 Mio. Schafen und 122 Mio. Geflügeltieren. Die Erzeugung tierischer Produkte in Deutschland erreicht dabei einen Wert von 18,9 Mrd. Euro (Statistisches Bundesamt, 2004). Für die Nutztierhaltung in Deutschland werden jährlich etwa 68 Mio. Mg Getreideeinheiten benötigt, von denen im Jahr 2001 19 Mio. Mg als Mischfutter im Gesamtwert von 4,25 Mrd. Euro zugekauft wurden (DVT, 2003).

Da etwa 40 bis 60 Prozent der Produktionskosten in der Tierhaltung auf die Tierernährung entfallen, kommt dieser eine entscheidende Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit dieses Betriebszweiges zu (Menke u. Huss, 1980).

Vor diesem Hintergrund wird die wirtschaftliche Bedeutung von Leistungsförderern deutlich. Die Produktivität der Erzeugung tierischer Lebensmittel wird bei deren Einsatz gesteigert (Losand, 2000). Leistungsförderer sollen den Futtermittelverbrauch verringern, die täglichen Zunahmen verbessern, die Tierverluste senken und die Kosten mindern, die zur Gesunderhaltung der Tiere notwendig sind¹. Ein weiterer Effekt ist die unter den heutigen gesellschaftlichen Bedingungen bedeutsame deutlich geringere Belastung der Umwelt mit Schadstoffen (vor allem N und P) je Produkteinheit infolge der besseren Nährstoffausnutzung (Losand, 2000).

Bereits im Jahr 1946 wurde bekannt, dass die Verfütterung von Antibiotika in subtherapeutischen Dosen eine erhöhte Gewichtszunahme und einen verminderten Futterauf-

¹ Nach einer Definition von Freitag et al. (1998) werden unter dem Begriff Leistungsförderer Futterzusatzstoffe zusammengefasst, die die Leistung von klinisch gesunden Tieren bei ausreichender Versorgung

wand zur Folge hat (Moore et al., 1946). Hauptsächlich aus Gründen der möglichen Resistenzbildung sind zurzeit nur noch vier antibiotische Leistungsförderer zugelassen. Da auch deren Zulassung im Januar 2006 endet, hat das Interesse an alternativen Methoden und Substanzen zur Leistungssteigerung stark zugenommen (Schuller et al., 2002). Als Alternativen zu antibiotischen Leistungsförderern stehen zurzeit Probiotika, Prebiotika, organische Säuren, Enzyme, Kupfer, Kräuter und deren Extrakte sowie Seltene Erden zur Verfügung.

6.2.1.2 Wirkungsweise und Leistungspotential marktrelevanter Leistungsförderer

Mit Unterstützung der Fachverbände (BfT - Bundesverband für Tiergesundheit e.V., FEDESA - Fédération Européenne de la Santé Animale, IFAH - International Federation for Animal Health) erfolgten Recherchen zu geeigneten Leistungsförderern, deren Wirkungsweise, Leistungspotential und Herstellungsweise. Das Ergebnis der Recherchen ist im Anhang (Leistungsförderer im Überblick) zusammengefasst.

6.2.2 Aufgabenstellung

Der Projektzielsetzung entsprechend sollte am Beispiel des Einsatzes leistungssteigernder Substanzen in der Tierernährung dargestellt werden, inwieweit Umweltentlastungseffekte durch den Einsatz biotechnisch gewonnener Produkte anstelle von chemisch-technisch erzeugten Leistungsförderern erzielt werden können.

Im ersten ursprünglichen Ansatz sollte einem auf biotechnischem Weg hergestellten Probiotikum ein chemisch-technisch erzeugter antibiotischer Leistungsförderer gegenübergestellt werden. Es stellte sich heraus, dass – nach dem Stand der Recherchen – mit Ausnahme von zwei Produkten alle anderen antibiotischen Leistungsförderer fermentativ produziert werden. Den beiden chemisch-technisch erzeugten Produkten wurde jedoch bereits im Jahr 1999 in Europa die Zulassung entzogen, sodass sie seitdem in Europa nicht mehr hergestellt und vertrieben werden.

Die für einen Vergleich notwendigen Daten der Herstellungsprozesse zu eruieren, scheiterten trotz intensiver Bemühungen. Die ehemaligen Hersteller in

mit allen lebensnotwendigen Stoffen verbessern und darüber hinaus eine gesundheitsprophylaktische Wirkung haben.

Deutschland verfügen ihren Angaben zufolge nicht mehr über die Herstellungsdetails. Literatur- und Patentrecherchen lieferten Daten nur in unzureichendem Umfang und ausländische Hersteller, die heute diese Produkte noch herstellen, reagierten nicht auf entsprechende Anfragen. Vor dem Hintergrund der unzureichenden Datenverfügbarkeit wurde der Ansatz, antibiotische Leistungsförderer in den Produktvergleich einzubeziehen, verworfen.

Der darauf folgende zweite Ansatz sah vor, dem Probiotikum organische Säuren und deren Salze, die chemisch-technisch produziert werden, gegenüberzustellen. Einem geeigneten Produkt eines deutschen Chemieunternehmens wurde im Juli 2001 von der EU-Kommission die Zulassung erteilt und es galt damit als erste sichere Alternative zu Fütterungsantibiotika für Schweine. Auf Entscheidung des Unternehmens wurden aber die Daten zur Herstellung des Produktes diesem Vorhaben nicht zur Verfügung gestellt, sodass es in den Verfahrensvergleich ebenfalls nicht einbezogen werden konnte.

Im dritten und letztlich realisierten Ansatz wurden ebenfalls zur Leistungssteigerung in der Tierernährung eingesetzte so genannte „Seltene Erden“ zum Produktvergleich herangezogen, über deren Leistungspotential in der Vergangenheit hauptsächlich aus China berichtet wurde. Dort seit langem mit Erfolg eingesetzt, sind in letzter Zeit auch in Deutschland und Europa Bestrebungen im Gange, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, diese Produkte auf dem Markt zu etablieren. Aufgrund des Leistungspotentials und dem Stand der Entwicklungen ist zu erwarten, dass die vorläufige Zulassung, die in der Schweiz bereits besteht, auch auf andere europäische Länder ausgeweitet wird. Die durchgeführten Recherchen ergaben eine ausreichende Datenlage, um die Stoffströme bei der Herstellung und Anwendung sowie bei der Entsorgung von Abprodukten darzustellen.

Auswahl der Handelsprodukte zum Produktvergleich

Bei dem untersuchten biotechnisch (fermentativ) hergestellten Probiotikum handelt es sich um das Handelsprodukt „Oralin[®]“ der Fa. Chevita aus Pfaffenhofen. Oralin[®] ist kein Leistungsförderer im herkömmlichen Sinn (antibiotischer Leistungsförderer), sondern ein mikrobieller Futterzusatzstoff, der die Darmflora stabilisiert und damit gesundheitsfördernd wirkt. Als Sekundäreffekt tritt eine Steigerung tierischer Leistungen auf. Oralin[®] wird nach der EU-Richtlinie EG Nr. 1831/2003 (N.N., 2003b) in der Kategorie

„Zootechnische Zusatzstoffe“, Unterkategorie „Darmflorastabilisator“ aufgeführt (Siebenlist, 2004).

Wie bereits beschrieben, war es nicht möglich, ausreichend belastbare Daten für ein chemisch-technisches Fütterungsantibiotikum bzw. für einen Leistungsförderer aufbauend auf organischen Säuren und deren Salze zu recherchieren. Prebiotika sind am Markt nach eigener Einschätzung relativ irrelevant, sodass die marktwirtschaftliche Bedeutung fehlt. Enzyme kommen als Vergleichsprodukt zu Probiotika nicht in Betracht, weil diese so wie die Probiotika auch, biotechnisch durch Fermentation von Pilzkulturen gewonnen werden. Für Kräuter und deren Extrakte ist die leistungssteigernde Wirkung nicht sicher belegt. Weiterhin erfolgt deren Herstellung nicht chemisch-technisch im engeren Sinn. Zink- und Kupferpräparate werden aufgrund des nur begrenzt möglichen Einsatzes durch die Vorgaben der Futtermittelverordnung (Grenzwerte) nicht zum Produktvergleich herangezogen.

Für den Produktvergleich wurde deshalb ein Seltene Erden-Präparat mit dem Markennamen „Lancer[®]“ herangezogen. Lancer[®] ist eine Futtermittelvormischung zur Leistungssteigerung bei Ferkeln und Mastschweinen. Für das Produkt ist zurzeit in der Schweiz eine vorläufig befristete Zulassung für den Einsatz bei Ferkeln und Mastschweinen erteilt. Eine EU-weite Zulassung wird angestrebt und ist in Vorbereitung, sodass davon auszugehen ist, dass sich eine Marktrelevanz insbesondere ab dem Jahr 2006 ergeben wird, wenn die antibiotischen Leistungsförderer ihre Zulassung europaweit verlieren werden.

Der Hersteller des Produktes Lancer[®] strebt eine Zulassung nach der EU-Richtlinie EG Nr. 1831/2003 (N.N., 2003b) in der Kategorie „Zootechnische Zusatzstoffe“ an (Zehentmayer, 2004).

Die Gewinnung Seltener Erden erfolgt durch bergmännischen Abbau und anschließende Aufbereitung mit physikalischen, thermischen und chemischen Methoden.

6.2.3 Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien

6.2.3.1 Szenario Probiotika

Das Szenario PROBIOTIKA beinhaltet die Verfütterung einer Futtermischung unter Zusatz des Handelsproduktes Oralin®.

Das Probiotikum Oralin® wird von der Fa. Chevita seit 1989 fermentativ hergestellt und dient der Stabilisierung der Darmflora für Kälber, Ferkel, Masthühner, Hunde und Katzen. Es enthält vermehrungsfähige Milchsäure bildende Bakterien vom Stamm *Enterococcus faecium* (DSM 10663 NCIMB 10415), einem Bestandteil der natürlichen Darmflora von Mensch und Tier. Das Produkt ist damit unbedenklich für Mensch, Tier und Umwelt (N.N., 2003a).

Entsprechend den Zulassungsbestimmungen darf das Produkt z.B. bei Schweinen bis zum Alter von 12 Wochen eingesetzt werden (Siebenlist, 2004), woraus folgende Vorteile im Hygiene- und Gesundheitsstatus resultieren:

- Die Häufigkeit von Durchfallerkrankungen bei neugeborenen Tieren wird reduziert.
- Eventuell auftretenden Darmstörungen werden im Verlauf gemildert und in der Dauer verkürzt.
- Durchfallfördernde Stresssituationen, wie Futterumstellung, Ein- und Umstellung (Milieuwechsel), Transporte werden besser überbrückt.
- Therapeutische Maßnahmen werden erleichtert.
- Die nach Antibiotikaverabreichung oft gestörte Darmflora wird restabilisiert.
- Die Rückfallhäufigkeit wird vermindert.
- Wachstumsstörungen infolge von Durchfallerkrankungen werden ausgeglichen.

Insgesamt wirkt sich die gesundheitsfördernde Wirkung positiv auf Vitalität und Wohlbefinden der Tiere aus. Die Wirksamkeit des Produkts wurde in wissenschaftlich kontrollierten Studien nachgewiesen. Bei Verabreichung des Produkts resultieren quasi als Sekundäreffekte höhere Gewichtszunahmen und eine verbesserte Futtermittelnutzung.

Insgesamt werden die Gewichtsmerkmale einer Gruppe verbessert, d. h., die Tiere entwickeln sich einheitlicher (AWT, 1999; Siebenlist, 2004).

Das Leistungssteigerungspotential von Oralin[®] liegt entsprechend den Nachweisen in den Zulassungsunterlagen bei einer um etwa 4 Prozent verbesserten Lebendmassenzunahme, bei 5 Prozent weniger Futtermittelverbrauch und bei einer um 5 Prozent verbesserten Futtermittelverwertung (Siebenlist, 2004).

Abbildung 6-11 stellt den Herstellungsprozess von Oralin[®] schematisch dar.

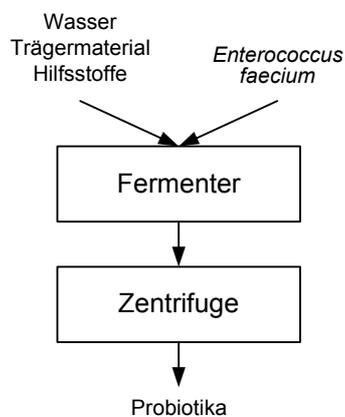


Abbildung 6-9: Schema des Herstellungsprozesses für Oralin[®]

Die Herstellung erfolgt fermentativ in einem etwa 150 Liter fassenden Reaktor im Batchverfahren unter anaeroben Bedingungen. Neben den Impfkulturen (master seed) werden weiterhin Wasser sowie verschiedene Nähr-, Zusatz- und Trägerstoffe für die Herstellung benötigt. Impfkulturen und Zusatzstoffe werden in den sterilen Fermenter dosiert.

Der Prozess läuft im mesophilen Temperaturbereich ab. Alle maßgeblichen Parameter in der Prozesskontrolle werden permanent überwacht. Je nach der benötigten Bakterienmasse wird der Produktionsprozess bis zu mehreren Tagen am Laufen gehalten, bevor die gesamte Produktionsanlage gereinigt, sterilisiert und für die nächste Produktionscharge vorbereitet wird.

Die erzeugte Biomasse ist das eigentliche Produkt, das auf Trägermaterialien fixiert wird, um eine fachgerechte Dosierung zu ermöglichen. Die Beaufschlagung der Trägermaterialien erfolgt in einer Wirbelschicht, indem die Biomasse als Aerosol auf die

Trägermaterialien gesprüht und angetrocknet wird. Die Bakterienbiomasse trägt quantitativ zum eigentlichen Produkt Oralin nur wenig bei, da die Trägersubstanz mehr als 99 % des Produktes ausmacht. In der Regel wird der gesamte Feststoffanteil der Fermentation zum Produkt aufbereitet, d. h., es ergeben sich so gut wie keine Reststoffe bei gleichzeitig sehr hohen Produktausbeuten. Pro 1.000 kg Mischfutter werden 30 g Oralin[®] zugesetzt.

Abbildung 6-10 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell für das Szenario PROBIOTIKA. Der Aufbau des Umberto-Modells wurde dem Herstellungsprozess angepasst, sodass die Auswertung der Ergebnisse differenziert nach der Herstellung des Futtermittels, der Ausgangsstoffe für die Leistungsförderer und dem Leistungsförderer selbst sowie der Verwertung der anfallenden Gülle erfolgen konnte. Die Teilsysteme sind in Abschnitt 6.2.6 beschrieben.

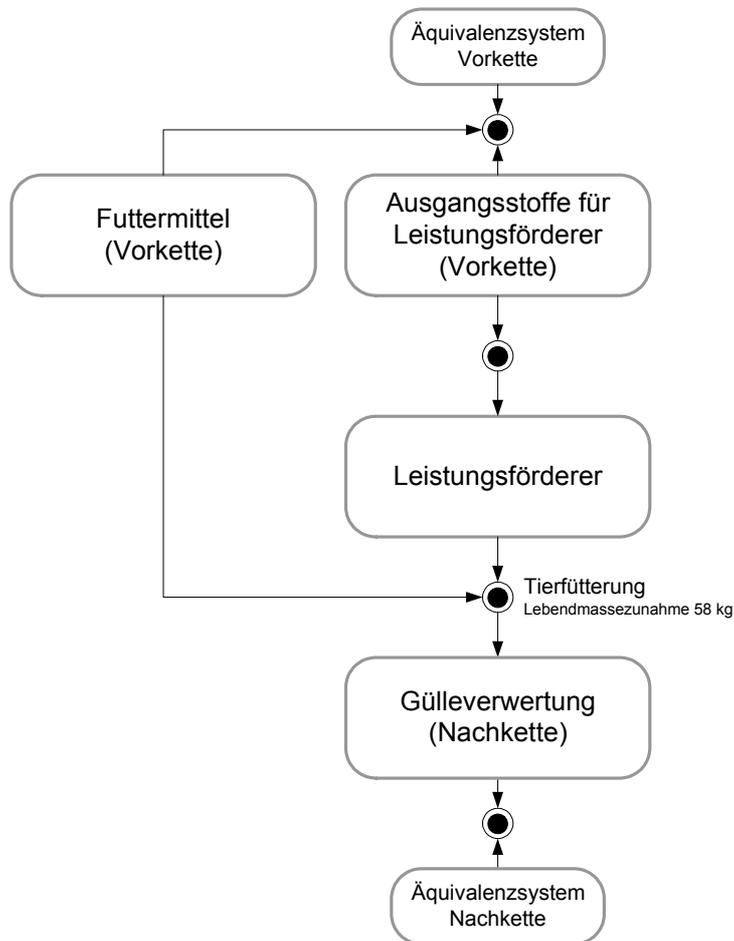


Abbildung 6-10: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario PROBIOTIKA

6.2.3.2 Szenario Seltene Erden

Das Szenario SELTENE ERDEN beschreibt die Verfütterung einer Futtermischung unter Zusatz des Handelsproduktes Lancer®.

Die Hauptanwendungsfelder von Seltenen Erden liegen in technischen Bereichen. Das derzeitige Einsatzspektrum umfasst die Herstellung von Katalysatoren, Stahladditiven, Magnetwerkstoffen, Farbpigmenten, elektronische Verwendungen sowie die Produktion von Zusatzstoffen und Poliermitteln für die Glas- und Keramikindustrie (Heid u. Wetzig, 2000). Die Statistiken zeigen einen Anstieg der Weltproduktion von 6.000 Mg/a Seltenerd-Oxid (SEO) im Jahre 1963 auf 85.500 Mg SEO/a im Jahre 2002 (Di Francesco u. Hedrick, 2002), wovon ca. 88 % aus der VR China kommen (Hedrick, 2003).

Von den in China produzierten SE-Salzen werden schätzungsweise 3.000 Mg/a in der Landwirtschaft eingesetzt (Richter, 2003b). Haupteinsatzbereich ist dabei die Düngung, die oft in Kombination mit Mineraldüngern erfolgt (N.N., 1998). Bereits seit Jahrzehnten werden die Salze Seltener Erden in China wegen ihrer leistungssteigernden Wirkung auch in der Tierproduktion eingesetzt, währenddessen diese Möglichkeit in Europa lange unbeachtet blieb (Richter, 2003b). Verwendet werden hierzu vielfältige Zubereitungen wie SE-Salze von Aminosäuren, Ascorbinsäure, SE-Chloride im Gemisch mit anderen Spurenelementsalzen, Vitaminen, Mineralstoffgemischen/Futterphosphat, Chitin u. a. (N.N., 1998).

Über den Wirkungsmechanismus der Seltenen Erden in der Tierernährung ist wenig bekannt. Die Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) geht nach ihren Versuchen davon aus, dass die leistungsverbessernde Wirksamkeit nicht auf einer Steigerung der Nährstoffverdaulichkeit beruht, sondern eine höhere Ausnutzung der umsetzbaren Energie erfolgen kann (Böhme et al., 2002).

Als wesentliche Vorteile des Einsatzes sind zu nennen:

- leistungssteigernde Effekte aufgrund mikrobieller Wirkungen (Henning, 2003)
- geringe Anfälligkeit der Tiere gegen Krankheiten (Henning, 2003); Seltene Erden hemmen das Wachstum von Bakterien, Pilzen und Hefen, wobei der Effekt auf gramnegative Bakterien am größten ist (Muroma, 1958)
- verbessertes Wachstum (Henning, 2003)

Aus China wird teilweise von spektakulären Ergebnissen berichtet, die sich bei Verfütterung von Seltene Erden-Produkten ergaben. Zum Beispiel berichtet Chen (1997) von Steigerungen der Wachstumsleistungen bei Schwein und Huhn bis zu 30 % bei geringen Dosierungen von SE-Salzen zum Futter. Aufgrund der verschiedenen Verbindungen und Reinheitsgrade der eingesetzten Gemische sind die unterschiedlichen Studien aber nur bedingt vergleichbar (Eisele, 2003).

Da die Wirkung von Leistungsförderern mitunter nur unter suboptimalen Bedingungen erzielt wird (Riedel-Caspari, 1988) und in direktem Zusammenhang mit Fütterungs-, Haltungs- und Hygienebedingungen steht (Greife und Berschauer, 1988), ist eine di-

rekte Übertragung der Ergebnisse aus chinesischen Studien auf westliche Verhältnisse nicht möglich. Zudem ist von tierartspezifischen Unterschieden auszugehen.

Bei Fütterungsversuchen mit verschiedenen SE-Produkten in unterschiedlichen Dosagen an Geflügel ergaben sich teils Verbesserungen der Mastleistungen (Halle et al., 2002), teilweise wurden keine positiven Effekte auf Wachstum und Produktivität beobachtet (Schuller, 2001; Schuller et al., 2002). Auch beim Einsatz in der Ferkelfütterung bzw. Schweinemast ergaben sich divergierende Ergebnisse. Vielfach wurden, auch in Feldversuchen, leistungssteigernde Effekte bei reduziertem Futterverbrauch festgestellt (Rambeck et al., 1999; He u. Rambeck, 2000; He et al., 2001; Borger, 2003; Eisele, 2003). Dem gegenüber stehen aber auch Versuchsergebnisse, die keine oder nur geringe Einflüsse durch die Verfütterung Seltener Erden dokumentieren (Böhme et al., 2002; Eisele, 2003).

Die unterschiedlichen Versuchsergebnisse machen deutlich, dass das Ausmaß der leistungssteigernden Effekte von einer Vielzahl von Faktoren abhängt. Die besten Ergebnisse werden offenbar erreicht, wenn die Seltenen Erden an organische Säuren gebunden sind (Böhme et al., 2002).

In Abstimmung mit Fachkreisen (Rambeck und Wehr, 2004) und in Anlehnung an aktuelle Fütterungsversuche wurde das Leistungssteigerungspotential unter Praxisbedingungen abgeschätzt. Bei Einsatz von Lancer[®] ist von einer Steigerung der Lebendmassezunahme von 8 Prozent und einer verbesserten Futterverwertung von 6 Prozent, einhergehend mit einem um ca. 6 Prozent verringerten Futterverbrauch auszugehen.

In Abbildung 6-11 ist der Herstellungsprozess für eine SE-Mischung in Citratform, wie sie im Handelsprodukt Lancer[®] verwendet wird, schematisch dargestellt.

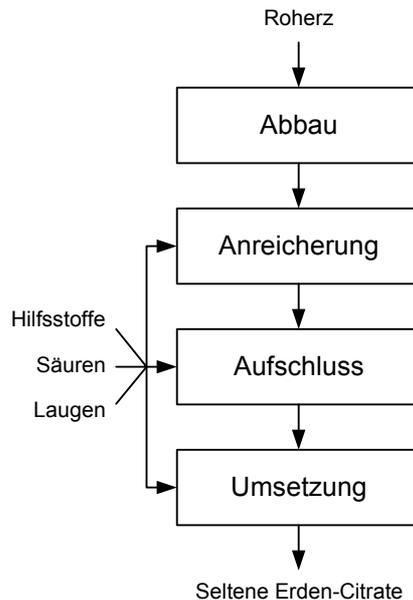


Abbildung 6-11: Schema des Herstellungsprozesses von Seltenen Erden-Citrate

Seltene Erden werden bergmännisch im Tagebau abgebaut, wobei zwischen dem Abbau zur gezielten Gewinnung Seltener Erden und der Gewinnung Seltener Erden als Beiprodukt der Eisenerzgewinnung zu unterscheiden ist (Hedrick, 1999; Richter, 2003a).

Die in den Erzen enthaltenen Seltenen Erden werden durch physikalische Verfahren angereichert. Es erfolgt zunächst eine Vermahlung der Roherze. Anschließend werden stufenweise Magnetabscheidung, Flotation oder Kombinationen beider Verfahren angewandt. Durch weitere Flotationen können SE-Konzentrate > 68 % SE_2O_3 produziert werden.

Nach basischem oder saurem Aufschluss der SE-Konzentrate erfolgt eine Calcinierung im Drehrohrofen. Anschließend wird das Produkt aus dem Drehrohrofen gelaugt, so dass am Ende des Prozessschrittes eine SE-Sulfat-Lösung vorliegt.

Die Umsetzung der SE-Sulfate in die Citrat-Form erfolgt zweistufig. Im ersten Schritt werden SE-Chloride hergestellt, wofür es verschiedene Verfahren gibt. In der verwendeten Flüssig-Flüssig-Extraktion wird die Sulfat-Lösung mit Natronlauge oder Natriumsulfat zu Na-SE-Doppelsulfaten gefällt, um anschließend mit Natronlauge zu Hydroxiden umgesetzt zu werden. Die SE-Hydroxide werden nachfolgend mit Salzsäure zu

SE-Chloriden umgesetzt (zusammengefasst aus Richter, 2003b). Der zweite Schritt beinhaltet die chemische Umwandlung des SE-Chlorids in SE-Citrat. Dabei werden die Chloride in Zitronensäure gelöst, was eine Neutralisation der so entstandenen SE-Citrate im Anschluss erforderlich macht.

Das aus China importierte SE-Produkt, aus dem das Handelsprodukt „Lancer[®]“ hergestellt wird, ist eine Mischung verschiedener Seltener Erden in Citrat-Form. Es enthält 150 – 250 ppm SE-Citrat oder umgerechnet 40 – 68 ppm SE (als Element gerechnet). Der Transport nach Europa erfolgt per LKW und Schiff. Für das Handelsprodukt Lancer wird das SE-Citrat im Verhältnis 50:50 dem Trägerstoff Weizenstärke (Einzelfuttermittel) zugesetzt. Pro 1.000 kg Mischfutter werden 200 g SE-Citrat bzw. 400 g Vormischung (Lancer[®]) zugesetzt.

Abbildung 6-12 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell für das Szenario SELTENE ERDEN. Der Aufbau des Umberto-Modells wurde dem Herstellungsprozess angepasst, sodass die Auswertung der Ergebnisse differenziert nach der Herstellung des Futtermittels, der Ausgangsstoffe für die Leistungsförderer (inkl. des Trägermaterials Weizenstärke) und dem Leistungsförderer selbst sowie der Verwertung der anfallenden Gülle erfolgen konnte. Die Teilsysteme sind in Abschnitt 6.2.6 beschrieben.

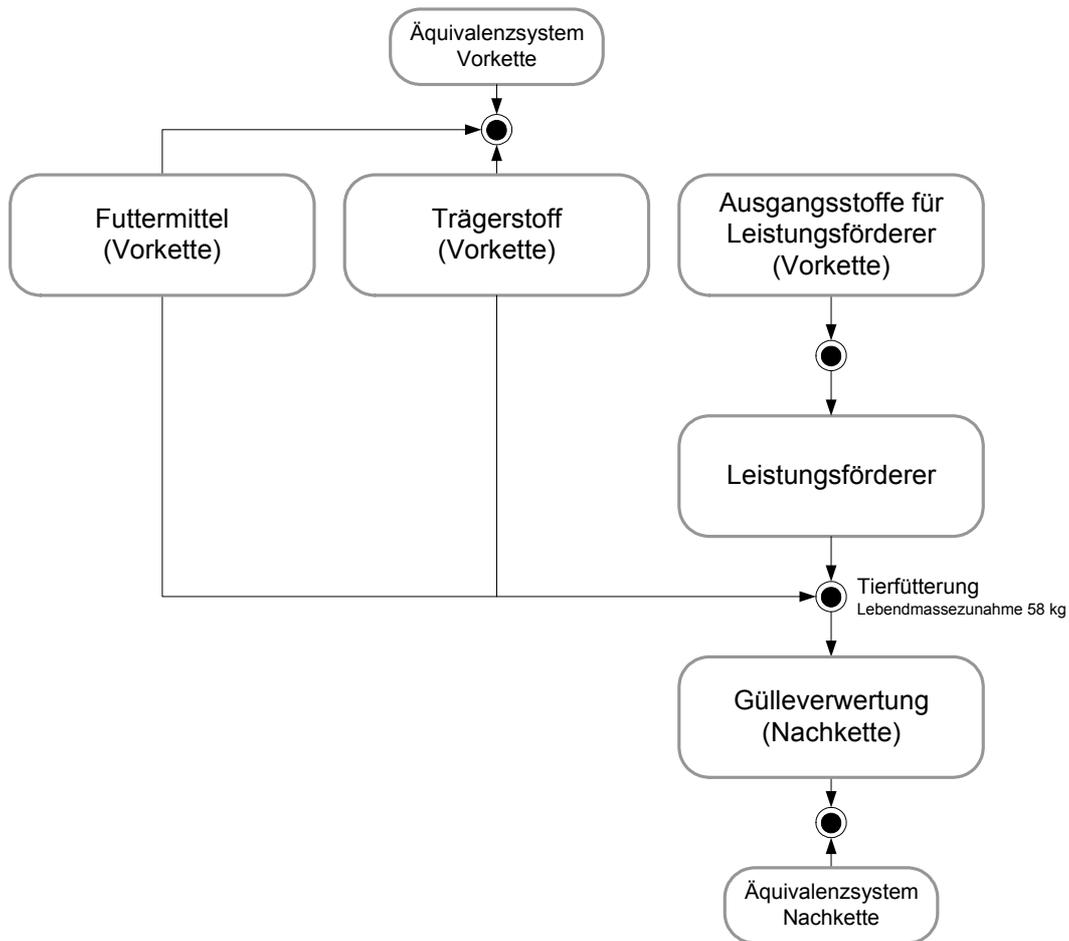


Abbildung 6-12: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario SELTENE ERDEN

6.2.3.3 Szenario ohne Zusatz

Im Szenario OHNE ZUSATZ wurde zum Abrunden des Produktvergleichs die Verfütterung einer Futtermischung ohne leistungssteigernde Zusätze untersucht. Abbildung 6-12 zeigt schematisch die Teilsysteme im zugehörigen Bilanzierungsmodell. Der Inhalt der Teilsysteme entspricht dem der äquivalenten Teilsysteme der beiden anderen Szenarien.

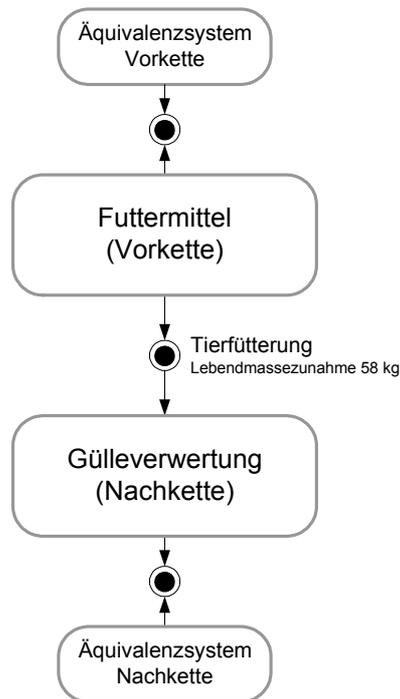


Abbildung 6-13: Teilsysteme des Bilanzierungsmodells für das Szenario OHNE ZUSATZ

6.2.4 Funktionelle Einheit

Der anzustellende Leistungsvergleich von Ferkeln bzw. Schweinen bezieht sich auf die frühe Mastphase (9. - 20. Lebenswoche, im Gewichtsbereich von 18 – 76 kg), da nach dem Stand der Erkenntnisse in dieser Phase die höchsten ergotropen Effekte am Tier zu erwarten sind. Entsprechend zu den Versuchsbeschreibungen ist davon auszugehen, dass die leistungssteigernden Produkte nur während der genannten Mastphase appliziert wurden.

Als funktionelle Einheit wurde die **Lebendmassezunahme der Tiere (58 kg)** sowie die weiteren Mastleistungsparameter Futtermittelverbrauch bzw. Futtermittelverwertung herangezogen.

6.2.5 Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze

Im Abschnitt 4 sind die übergreifenden, auf alle Modelle zutreffenden Systemgrenzen und Annahmen, Detailgrenzen vor- und nachgelagerter Prozesse sowie die Vorge-

hensweise bei der Behebung von Datenlücken und Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen beschrieben. Im Folgenden wurden die wichtigsten spezifischen Anmerkungen zur Systemgrenze dieses Produktvergleichs zusammengefasst.

Die Systemgrenze umfasst bei allen Szenarien:

- den Gewinnungs- und Herstellungsprozess der zu vergleichenden Produkte bis hin zur Erzeugung der Vormischungen (Prämixe),
- die Produktnutzung sowie
- die Behandlung und Verwertung des anfallenden Hauptabfallstromes Gülle.

Die Arbeitsschritte im Mischfutterwerk und die weitere Distribution der Handelsfuttermittel blieben unberücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass diese Vorgänge bei allen zu beschreibenden Varianten in gleicher Weise und unter gleichen Stoffverbräuchen ablaufen.

Datenlücken und Annahmen

Bei der Bilanzierung des Herstellungsprozesses des Seltenen-Erden-Präparates Lancer[®] wurden bei der Möglichkeit, zwischen verschiedenen Ausgangsmaterialien oder Herstellungsprozessen zu wählen, jeweils eine Variante ausgewählt. Die anderen möglichen Herstellungsvarianten blieben unberücksichtigt. Trotz intensiver Literaturrecherchen sowie Firmen- und Expertenbefragungen konnten hinsichtlich der Stoff- und Energieströme bei der Herstellung der Seltenen Erden nicht alle Teilprozesse quantitativ beschrieben werden, sodass in diesen Fällen die Modellierung nur näherungsweise erfolgte.

Die Modellierung des Herstellungsprozesses des Probiotikums Oralin[®] erfolgte nach den detaillierten Angaben des Herstellers.

Bei Prozessen, bei denen keine ausreichenden Sachbilanzdaten zur Verfügung standen, wurden die Datenlücken und Unsicherheiten durch Annahmen geschlossen. Besonders gilt dies für die in China angewandten Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Umwandlungsprozesse der Seltenen Erden. Die getroffenen Annahmen sind im Anhang (Datenherkunft und -qualität) beschrieben.

Geografischer und zeitlicher Bezug

Für die Szenarien OHNE ZUSATZ und PROBIOTIKA wurde der geografische Bezugsraum mit den politischen Grenzen der Bundesrepublik Deutschland gleichgesetzt. Allerdings finden die Bereitstellung einzelner (Roh-)Stoffe, wie z.B. Rohöl oder verschiedene Produktionsprozesse nicht immer bzw. nicht ausschließlich in Deutschland statt. Es wurde versucht, den Bezugsraum dann an die jeweiligen Länder anzupassen. War dies nicht möglich, wurde auch der Bezugsraum Deutschland gewählt.

Auch für das Szenario SELTENE ERDEN wurde der Bezugsraum Deutschland angenommen, da es nicht möglich war, Prozessdaten aus China, dem Herkunftsland der Seltenen Erden, zu bekommen.

Beim zeitlichen Bezug wurde die jeweils aktuellsten, im Bearbeitungszeitraum verfügbaren Daten verwendet, die über eigne Recherchen bzw. Datenbankauswertungen ermittelt wurden. Details zur Datenherkunft sind im Anhang dokumentiert.

6.2.6 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle

Die Bilanzierungsmodelle wurden in Teilsysteme unterteilt (vgl. Abbildung 6-10, Abbildung 6-9 und Abbildung 6-13). was eine differenziertere Auswertung der Ergebnisse möglich machte. In diesem Abschnitt werden die Teilsysteme grafisch vorgestellt sowie bei Bedarf näher beschrieben.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Abbildungen wurden:

- Basismodule für die Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie, Bereitstellung von Energieträgern, Bereitstellung von Hilfsstoffen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung sowie
- In- und Outputströme an Roh- und Betriebsstoffen, Ausgangsstoffen unterhalb der Abschneidekriterien, Energieströme, Emissionen, Abfälle und Abwasser

nur dann dargestellt, wenn sie für das Verständnis erforderlich waren. Die vollständigen Bilanzierungsmodelle mit allen Teilsystemen und Basismodulen sind im Anhang dargestellt.

Die in den Abbildungen verwendeten grafischen Elemente sind in Tabelle 4-1 erläutert, die Module bzgl. Datenherkunft, Literaturquellen, Bezugsjahr, Repräsentativität, Kurzbeschreibungen, Annahmen und Vorketten sowie die Transporte bzgl. Entfernung, Auslastung, Nutzlast und Fahrbahnanteile sind im Anhang (*Datenherkunft und -qualität* sowie *Überblick Transporte*) dokumentiert.

6.2.6.1 Futtermittel (Vorkette)

Abbildung 6-14 zeigt die Module und Transporte im Teilsystem *Futtermittel* sowie die Verknüpfungen untereinander. Das Teilsystem ist für alle Szenarien identisch. Es umfasst die Herstellung der Hauptbestandteile des Futtermittels, das aus Weizen (40 %), Gerste (35 %) und Soja (25 %) besteht.

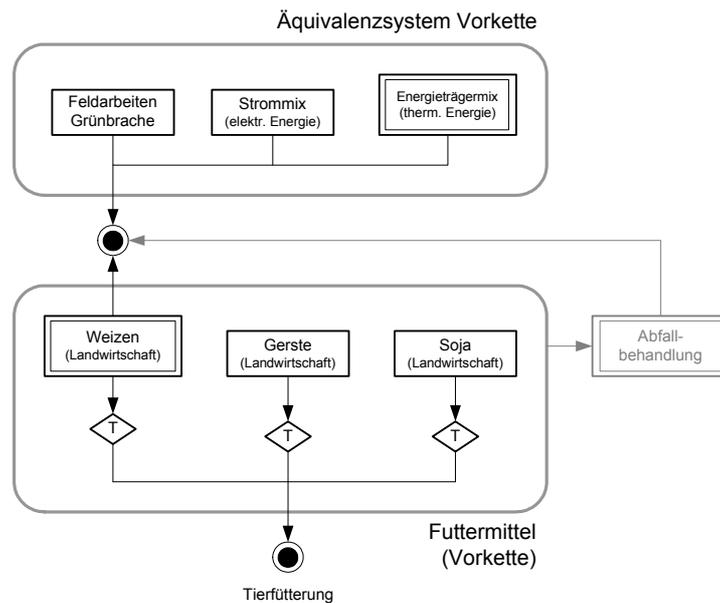


Abbildung 6-14: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Futtermittel* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

6.2.6.2 Ausgangsstoffe für Leistungsförderer (Vorkette)

In Abbildung 6-15 und Abbildung 6-16 sind die Module und Transporte im Teilsystem *Ausgangsstoffe für Leistungsförderer* sowie die Verknüpfungen untereinander dargestellt.

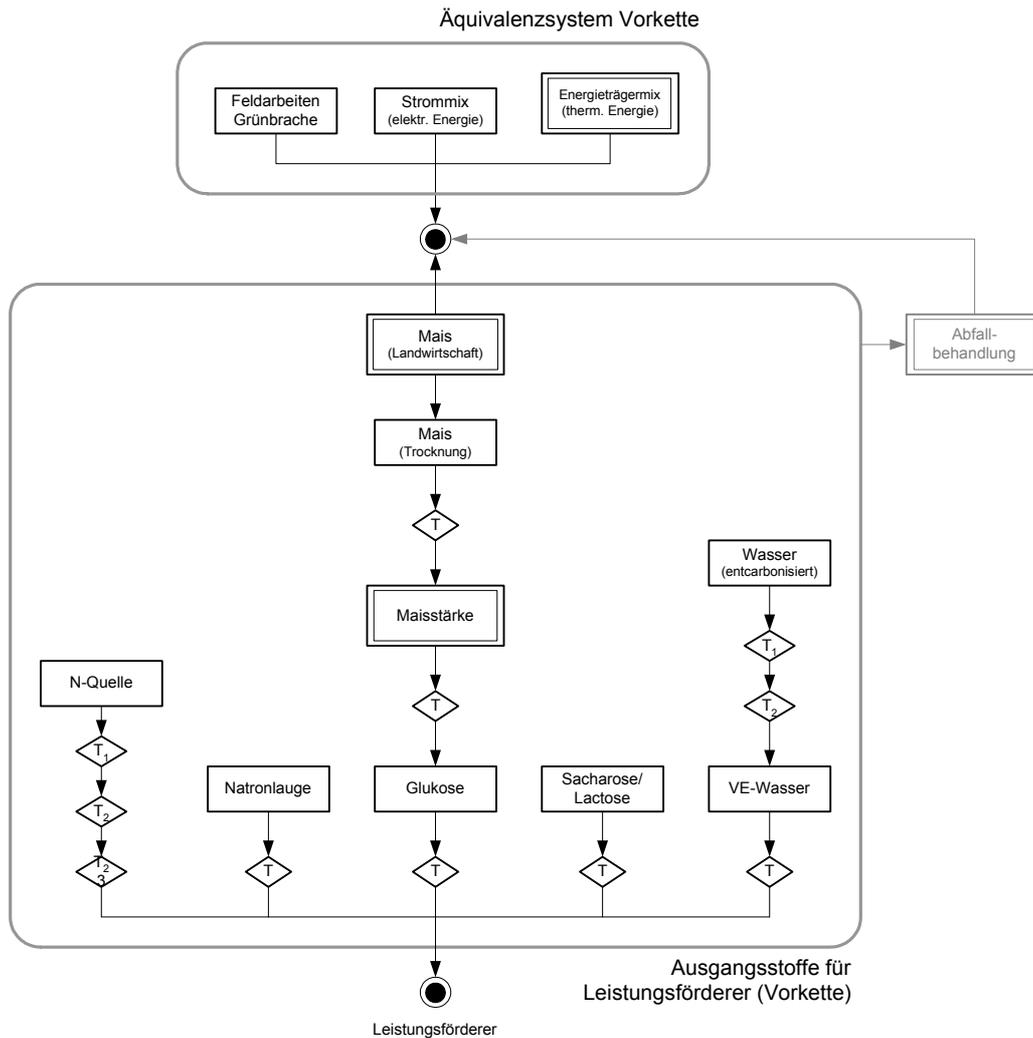


Abbildung 6-15: Szenario PROBIOTIKA - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Ausgangsstoffe für Leistungsförderer* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

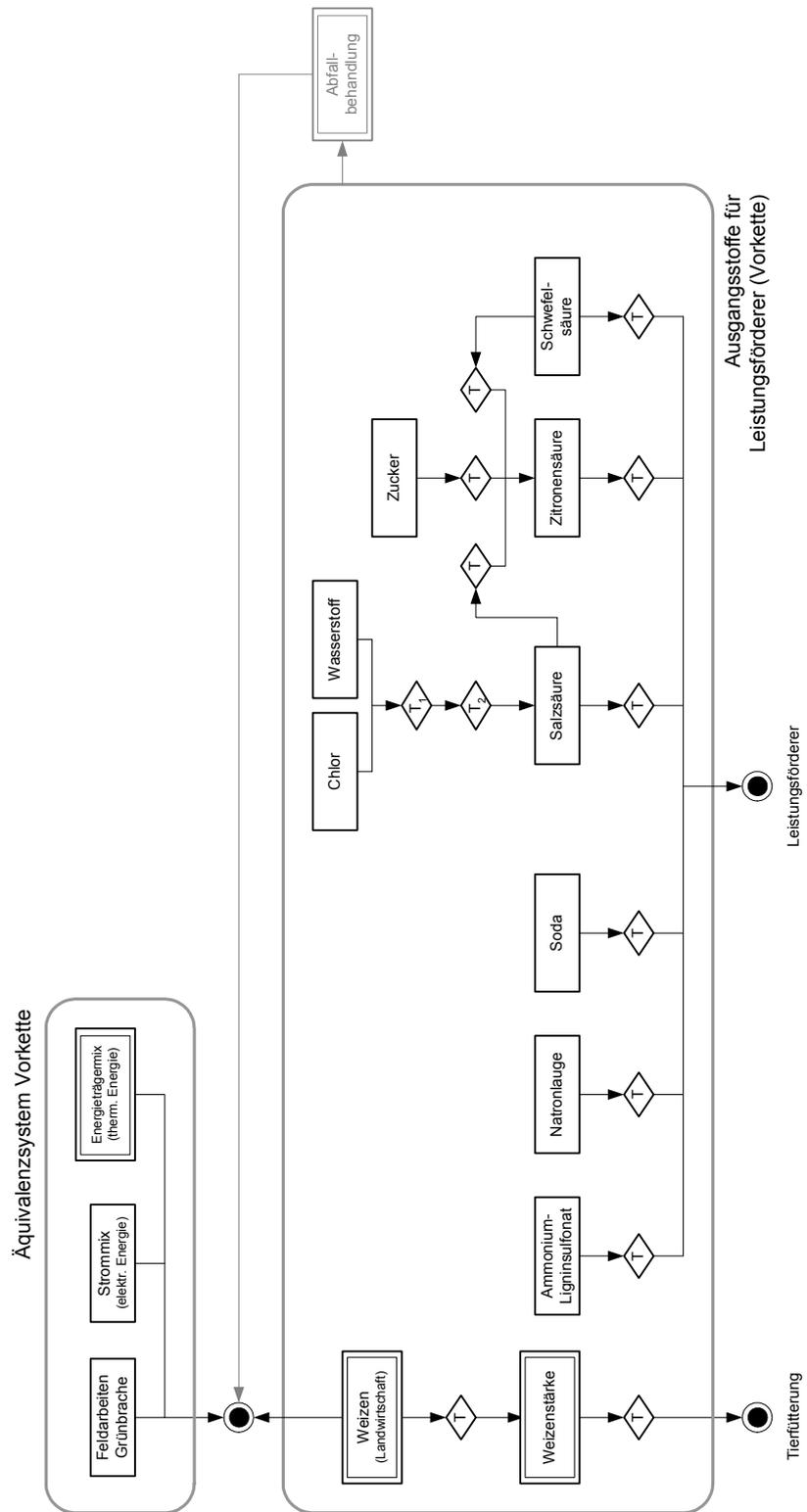


Abbildung 6-16: Szenario SELTENE ERDEN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Ausgangsstoffe für Leistungsförderer* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

6.2.6.3 Leistungsförderer

Die Daten zur Herstellung des Probiotikums Oralin[®] wurden von der Firma Chevita zur Verfügung gestellt.

Allerdings konnte aus Wettbewerbsgründen die verwendete N-Quelle, ein Eiweißhydrolysat, nicht näher definiert werden. Da die N-Quelle aufgrund der eingesetzten Menge jedoch nicht vernachlässigbar war, mussten zur Verfügung stehende Module und Datensätze näherungsweise für eine Bilanzierung herangezogen werden. Dabei erschien am ehesten ein Herstellungsprozess für Frischkäse (Deutschland) geeignet.

Abbildung 6-17 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzierungsmodells des in Abbildung 6-9 dargestellten Herstellungsprozesses von Oralin[®]. Eine Verfahrensbeschreibung enthält der Abschnitt 6.2.3.1.

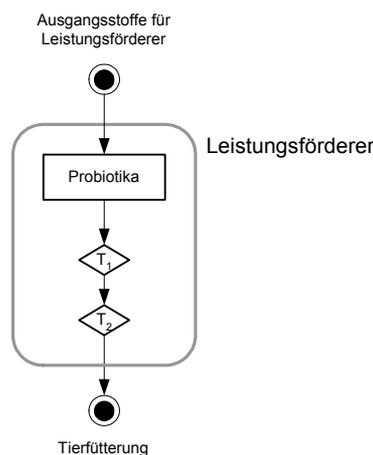


Abbildung 6-17: Szenario PROBIOTIKA - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Leistungsförderer*

Die Herstellung von Seltenen Erden-Produkte kann in Teilschritten variieren. Über die Details, insbesondere zu quantitativen Angaben, liegen nur wenig Informationen vor. In diesem Zusammenhang erwies sich die Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Herfried Richter aus Wittenberg als sehr nützlich. Dr. Richter beschäftigte sich bereits in den sechziger Jahren mit der Gewinnung und Anwendung Seltener Erden. Er unterstützte das Projekt mit Literaturhinweisen, Empfehlungen und spezifischem Know-how, was letztendlich erst eine Bilanzierung ermöglichte (Richter, 2003a; Richter, 2003b).

In Bezug auf die Herstellungsweise wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Gewinnung der Seltenen Erden erfolgt als Nebenprodukt des Eisenerzabbaues im Tagebau.
- Der Energieaufwand für den Magnetabscheider wurde mit 50 bis 100 kWh angesetzt.
- Die Stoffverbräuche für die Aufbereitung der SE-Gemische durch Flotation wurden in Anlehnung an den Molycorp-Prozess¹ modelliert.
- Der Aufschluss der SE-Konzentrate vor der Calcinierung im Drehrohfen erfolgt mit Schwefelsäure (saurer Aufschluss).

Darüber hinaus standen für einen Teil der modellierten Prozesse nur Stoffverbräuche, aber keine Informationen zu Energiebedarf, Luft- und Wasseremissionen, Abfälle oder Abwässer, zur Verfügung.

Abbildung 6-18 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzierungsmodells des in Abbildung 6-11 dargestellten Herstellungsprozesses von Seltenen Erden-Citrat.

¹ Herstellungsprozess des Unternehmens Molycorp Inc., White Plains, NY, USA

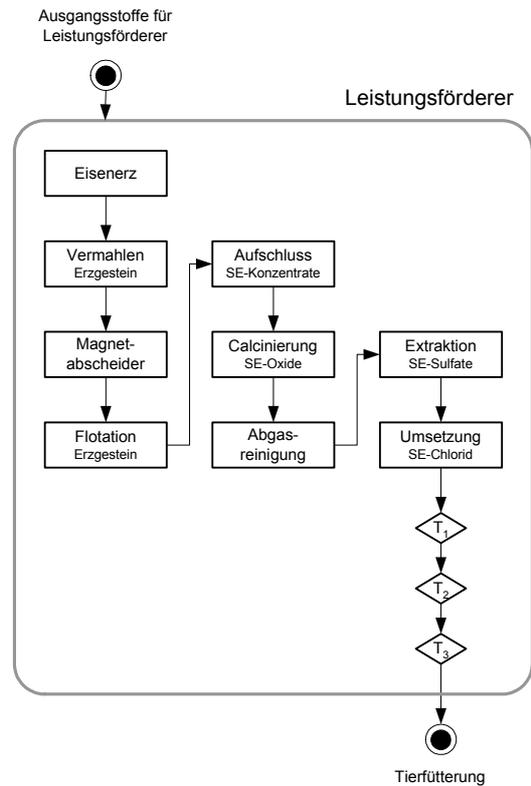


Abbildung 6-18: Szenario SELTENE ERDEN - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Leistungsförderer*

In Abbildung 6-19 und Abbildung 6-20 sind die für die Modellierung der beiden Herstellungsprozesse erhobenen Ausgangsdaten (Stoff- und Energieflüsse) zusammengefasst. Wie nach der beschriebenen Datenbeschaffung erwartet werden konnte, war die Datenbasis für das Szenario PROBIOTIKA sowohl in- als auch outputseitig deutlich umfangreicher.

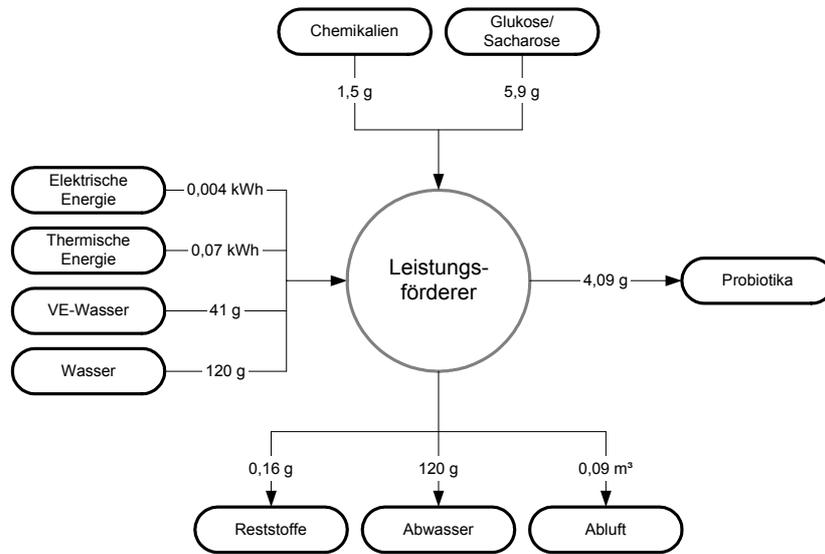


Abbildung 6-19: In-/Output-Diagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten zur Herstellung des Probiotikum Oralin[®] bezogen auf die Lebendmassezunahme von 58 kg eines Mastschweins in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche

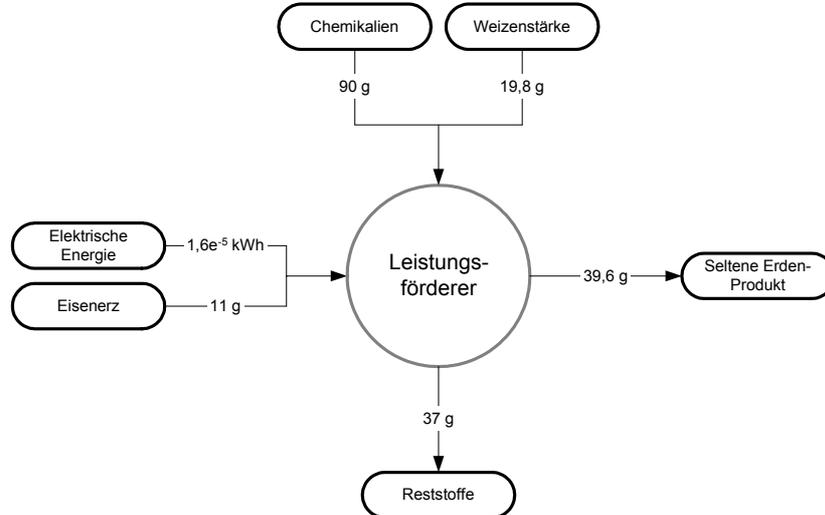


Abbildung 6-20: In-/Output-Diagramme mit den recherchierten Ausgangsdaten zur Herstellung des Seltene Erden-Produktes Lancer[®] bezogen auf die Lebendmassezunahme von 58 kg eines Mastschweins in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche

6.2.6.4 Tierfütterung

In der Stelle Tierfütterung der Modellierungen werden die in Tabelle 6-5 dargestellten Futtermittel- und Güllemengen mit den Bilanzierungsmodellen verknüpft.

Tabelle 6-5: Futtermittel- und Güllemengen bezogen auf die funktionelle Einheit

Parameter	Einheit	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA (Oralin [®])	SELTENE ERDEN (Lancer [®])
Futtermittel ¹⁾	kg	147,5	140,5	138,7
Leistungsförderer ²⁾	g	-	4,09	19,8
Trägermaterial	kg	-	-	19,8
Gülle ³⁾	L	504	486	468

¹⁾ Futtermittelmenge in Anlehnung an Fütterungsversuche (Borger, 2003) unter Berücksichtigung der angenommenen Leistungssteigerungspotentiale von Oralin[®] und Lancer[®]

²⁾ Einsatz der Leistungsförderer in empfohlenen/vorgeschriebenen Dosagen

³⁾ Gülleanfall berechnet nach Standardmengen und jeweiliger Mastdauer bis zum Erreichen des Endgewichtes im Mastabschnitt; hierbei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Futterverbrauch und Gülleanfall angenommen;

Infolge des unterschiedlichen Leistungspotentials der Leistungsförderer wird bei deren Einsatz, bezogen auf die Lebendmassezunahme (tägliches Zuwachs bzw. Lebendmassezuwachs während der gesamten Mastperiode) Tierfutter eingespart. Dieser verringerte Futterverbrauch führt zu Umweltentlastungseffekten durch verringerte Aufwendungen für deren Herstellung und geringeren Nährstoffausscheidungen (vgl. Abbildung 6-21).

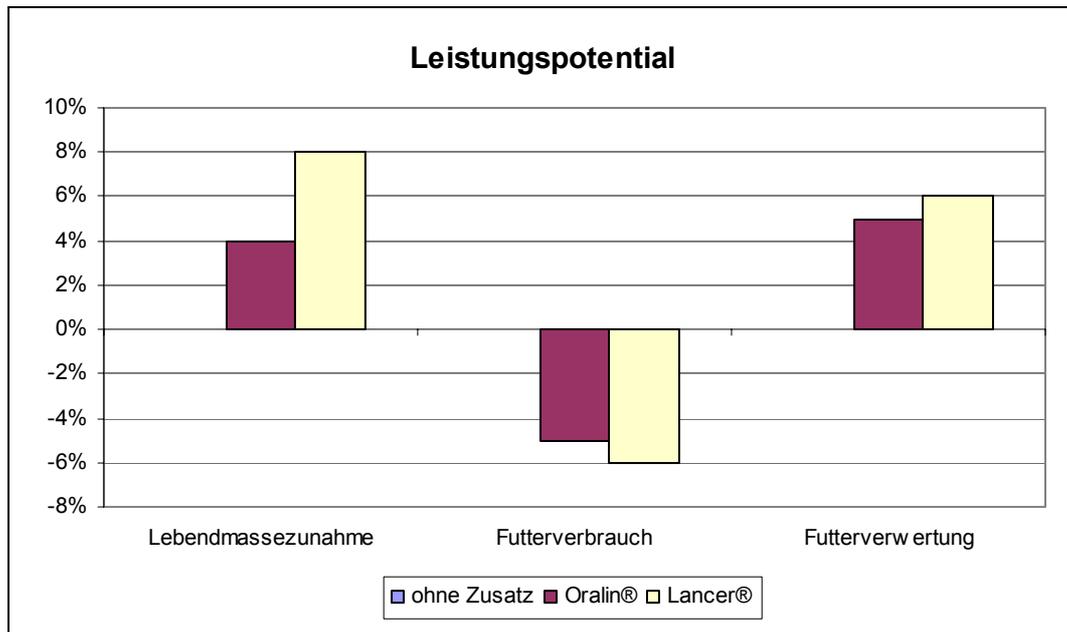


Abbildung 6-21: Leistungspotential von Oralin® und Lancer® gegenüber einem Futtermittel ohne leistungssteigernde Zusätze

Das jeweilige Leistungspotential der zu betrachtenden Handelsprodukte wurde unter Auswertung von Literaturangaben, Firmenunterlagen und in Abstimmung mit Fachleuten der Branchen festgelegt. Hierbei wurde eher der untere Leistungsbereich angegeben, der unter praktischen Gesichtspunkten mit Bestimmtheit zu erreichen ist, durchaus aber auch in höherem Bereich angesiedelt sein kann. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die unterschiedlichen Ergebnisse entsprechender Fütterungsversuche hingewiesen (vgl. 6.2.2). Insbesondere bei dem Einsatz Seltener Erden-Produkte liegt das Leistungssteigerungspotential in einem weit schwankenden Bereich von 0 bis 25 %. Unter Realbedingungen ist davon auszugehen, dass das Leistungssteigerungspotential in gleicher Größenordnung wie das bei Fütterungsantibiotika liegt und teilweise auch Ergebnisse erzielt werden, die darüber liegen (Rambeck, 2004).

6.2.6.5 Gülleverwertung (Nachkette)

Für die bei der Tierhaltung anfallende Gülle wurde als Verwertungsverfahren die derzeitige Situation der Gülleverwertung in Deutschland angenommen. Ein entsprechendes Modell wurde der Studie „Entsorgungsalternativen für Rinder- und Schweinegülle“, die im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Um-

weltfragen erstellt wurde, entnommen (Wagner et al., 2001). Das Modell geht davon aus, dass 95 % der Gülle ohne Vorbehandlung direkt zur Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen ausgebracht wird, während die restlichen 5 % einer Vergärung (Biogasgewinnung) zugeführt werden. Der verbleibende Gärrest wird anschließend ebenfalls zur Düngung eingesetzt.

Abbildung 6-14 zeigt die Module und Transporte im Teilsystem *Gülleverarbeitung* sowie die Verknüpfungen untereinander. Das Teilsystem ist für alle Szenarien identisch.

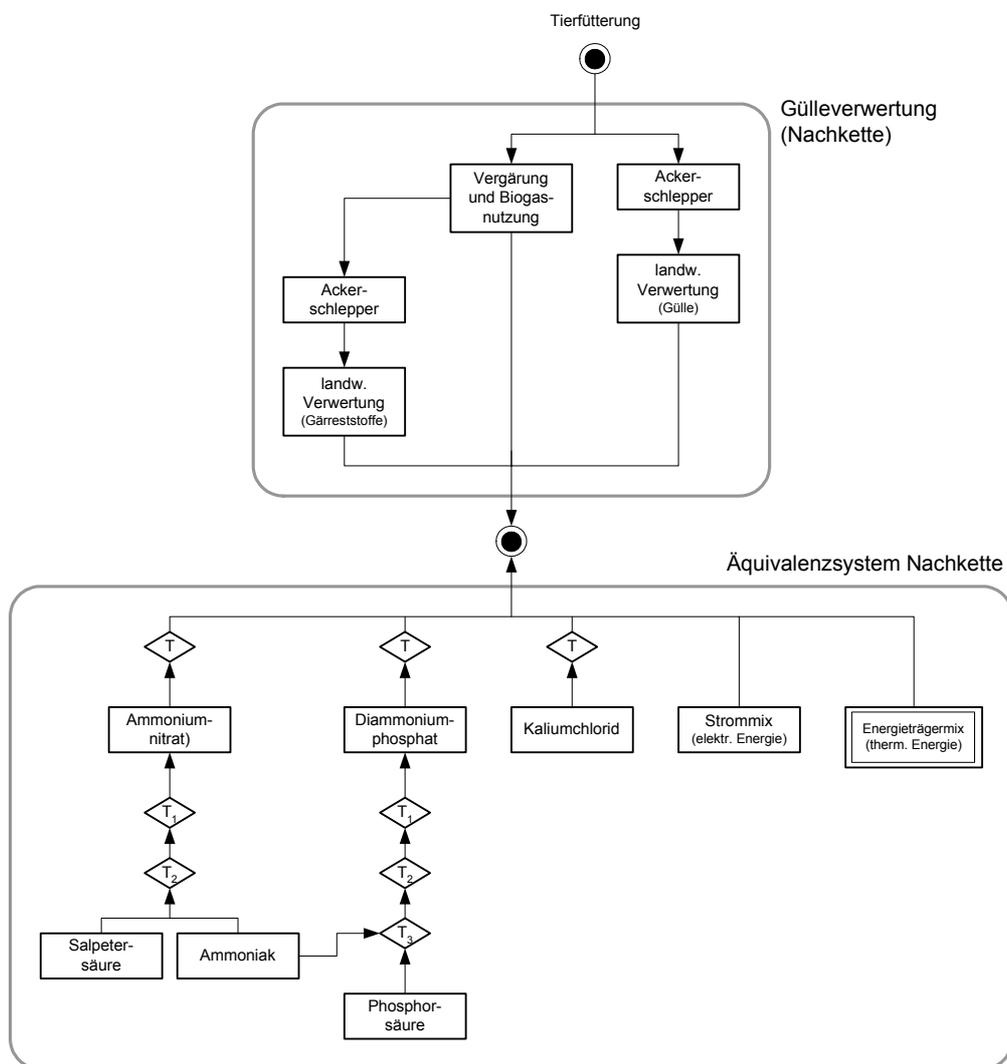


Abbildung 6-22: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Gülleverarbeitung* inklusive des nachgelagerten Äquivalenzmodells

Die in der Gülle enthaltenen Nährstoffe werden als Systemnutzen angesehen und in einem Äquivalenzsystem verrechnet, indem synthetisch hergestellte Düngemittel (Handelsdünger) substituiert werden. Der Nährstoffgehalt der Schweinegülle nach Standardwerten ist in Tabelle 6-6 zusammengefasst.

Tabelle 6-6: Nährstoffgehalte in gelagerter Schweinegülle mit 6 % TS (nach Standardwerten)

Nährstoff	Gehalt in kg/Mg
N	4,0
NH ₄	2,0
P	1,0
P ₂ O ₅	2,2
K	1,7
K ₂ O	2,1
Mg	0,7
MgO	1,1

Als Vergärungsverfahren wurde eine Nassvergärungsanlage angenommen. Die Nutzung des entstehenden Biogases erfolgte in einem nachgeschalteten Blockheizkraftwerk mit einem Otto-Gas-Motor. Die nach Abzug des Eigenbedarfs verbleibende elektrische Energie wird dem Strommix Deutschland und die verbleibende thermische Energie dem thermischen Energieträgermix gutgeschrieben und entsprechend verrechnet.

Für den bei der Vergärung anfallenden Gärrest wurde angenommen, dass er der Gülle vergleichbare Nährstoffgehalte besitzt und ebenfalls zur Düngung ausgebracht wird., woraus ein Systemnutzen resultiert.

6.2.6.6 Äquivalenzsysteme

In Tabelle 6-7 sind die Zusatznutzen aus den drei Szenarien sowie die dadurch substituierten Materialien und Endenergien aus Primärrohstoffen zusammengefasst. Die konventionellen Herstellungs- bzw. Produktionsprozesse zu den aufgeführten Zusatznutzen sind im Anhang (Datenherkunft und -qualität) dokumentiert.

Tabelle 6-7: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen

Zusatznutzen aus allen Szenarien	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Nährstoff K ₂ O aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gülle und der Gärreststoffe ¹⁾	Kaliumchlorid (K-Dünger)	1,0
Nährstoff P ₂ O ₅ aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gülle und der Gärreststoffe ¹⁾	Diammoniumphosphat (P-Dünger)	1,0
Nährstoff N aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gülle und der Gärreststoffe ¹⁾	Ammoniumnitrat (N-Dünger)	1,0
Landwirtschaftliche Fläche für Weizenanbau ²⁾	Feldarbeiten Grünbrache	1 Einheit pro 10000 m ² Fläche
Elektrische und thermische Energie aus der Abfallbehandlung ²⁾ sowie der Biogasnutzung ¹⁾	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschland, thermische Energie aus dem Energieträgermix Deutschland	1,0
Zusatznutzen nur aus dem Szenario PROBIOTIKA	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Landwirtschaftliche Fläche aus der Herstellung von Maisstärke ³⁾	Feldarbeiten Grünbrache	1 Einheit pro 10000 m ² Fläche
Zusatznutzen nur aus dem Szenario SELTENE ERDEN	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Landwirtschaftliche Fläche aus der Landwirtschaft Weizen ³⁾	Feldarbeiten Grünbrache	1 Einheit pro 10000 m ² Fläche
Elektrische und thermische Energie aus der Herstellung von Weizenstärke ³⁾	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschland, thermische Energie aus dem Energieträgermix Deutschland	1,0

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Futtermittel)

³⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Ausgangsdaten für Leistungsförderer)

6.2.7 Vergleich der Bilanzierungsergebnisse

6.2.7.1 Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle inputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 6-8 neben dem Wasserbedarf die Stoff- und Energieeinsätze zusammengefasst, die für die Auswertung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten inputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Tabelle 6-8: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN
<i>Kumulierter Energieaufwand</i>				
KEA fossil	MJ	172	163	166
KEA regenerativ	MJ	- 0,34	- 0,32	- 0,28
KEA Kernkraft	MJ	- 8,75	- 8,40	- 7,09
KEA Wasserkraft	MJ	0,62	0,58	0,65
KEA sonstige	MJ	0,45	0,43	0,57
KEA solar	GJ	902	859	848
<i>Fossile Energieträger</i>				
Erdöl	kg	2,13	2,03	2,02
Erdgas	kg	1,86	1,75	1,79
Steinkohle	kg	0,68	0,65	0,69
Braunkohle	kg	-1,22	-1,17	-1,08
<i>Mineralische Rohstoffe und Erze</i>				
Kalkstein	kg	0,90	0,86	0,85
Kalziumhydroxid	kg	0,059	0,057	0,057
Mineralien, un spez.	kg	10,7	10,2	10,1
Natriumchlorid	kg	0,018	0,017	0,074
Rohkali	kg	3,72	3,54	3,50
Rohphosphat	kg	- 1,44	- 1,41	- 1,32
Schwefel	kg	- 0,37	- 0,35	- 0,34
Eisenerz	kg	-	-	0,062
Erze, un spez.	kg	0,03	0,029	0,039
<i>Wasserbedarf</i>				
Kühlwasser	kg	- 704	- 675	- 648
Wasser (Kesselspeise)	kg	- 175	- 167	- 161
Wasser (Prozess)	kg	0,34	0,33	0,42
Wasser, unspezifisch	kg	514	490	485
Grundwasser	kg	-	-	0,09
<i>Naturraum</i>				
Fläche K5	m ²	-8,9	-8,47	-8,37
Fläche K6	m ²	88,8	84,6	83,6
Fläche K7	m ²	0,0004	0,00038	0,00038

Negative Werte entsprechen „Einsparung“ durch die Verrechnung von Gutschriften

Die Werte der Tabelle zeigen, dass die Aufwendungen der drei Szenarien bis auf wenige Ausnahmen eng beieinander liegen. In den Abweichungen spiegeln sich die ge-

ringen Unterschiede im Futtermiteinsatz und Gülleanfall (Nährstoffausscheidungen) wieder, wogegen die unterschiedlichen Einsatzmengen der Leistungsförderer kaum ins Gewicht fallen.

Im folgenden Abschnitt wird näher auf den Energiebedarf (KEA gesamt) eingegangen. Es sind die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend wurden die signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnisse wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

6.2.7.2 KEA gesamt

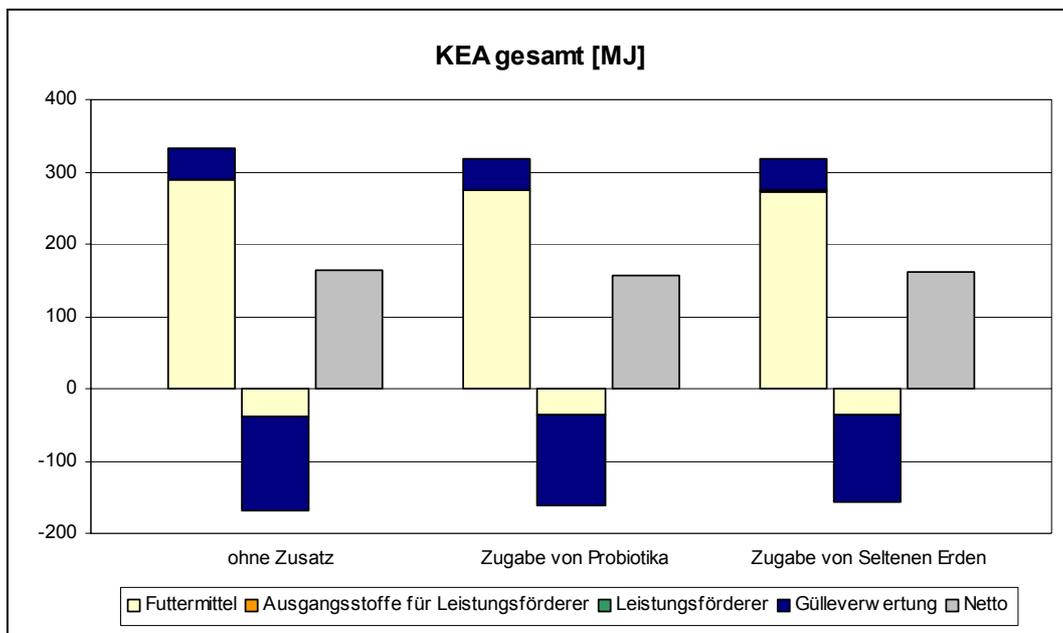


Abbildung 6-23: KEA gesamt¹ - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-23 zeigt, dass der Energiebedarf der drei Szenarien in ähnlicher Größenordnung berechnet wurde. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt 9 %.

¹ ohne Berücksichtigung von KEA solar

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse werden überwiegend vom Energiebedarf zur Herstellung der Futtermittelbestandteile sowie vom Energieverbrauch des Ackerschleppers bei der landwirtschaftlichen Gülleverwertung bestimmt. Aufwendungen zur Herstellung der Ausgangsstoffe für die Leistungsförderer sowie der Leistungsförderer selbst sind so gut wie nicht sichtbar. Lediglich beim Szenario SELTENE ERDEN wird 2 % des Energiebedarfs für die beiden Teilsysteme verwendet.

Tabelle 6-9: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Weizen ¹⁾	115 MJ	110 MJ	108 MJ	34 - 35 %
Gerste ¹⁾	95 MJ	90 MJ	89 MJ	28 %
Soja ¹⁾	57 MJ	54 MJ	53 MJ	17 %
Ackerschlepper ²⁾	36 MJ	35 MJ	34 MJ	11 %

¹⁾ Teilsystem Futtermittel

²⁾ Teilsystem Gülleverwertung

Gutschriften

Der größere Teil der Gutschriften fällt durch Äquivalenzprozesse, die sich aus der Gülleverwertung ergeben, an. Zum Einen wird durch die Vergärung von Gülle Biogas und damit Energie erzeugt, wodurch der Bedarf an Primärenergieträgern zur Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie reduziert wird. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Gülleverwertung synthetische Düngemittel substituiert. Hauptsächlich vermindern sich damit Aufwendungen für die Herstellung von Ammoniak, Salpetersäure und Phosphorsäure. Der kleinere Teil der Gutschriften stammt aus dem Äquivalenzsystem zur Futtermittelherstellung. Diese Gutschriften resultieren überwiegend aus der Energie, die bei der Behandlung von Abfällen aus der Futtermittelherstellung erzeugt wird, sowie dem Weizenanbau, da keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig sind.

Tabelle 6-10: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des KEA gesamt

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Strommix - elektrische Energie Energieträgermix - therm. Energie ¹⁾	39 MJ	38 MJ	37 MJ	23 %
Ammoniak ¹⁾	38 MJ	36 MJ	35 MJ	22 %
Salpetersäure ¹⁾	29 MJ	28 MJ	27 MJ	17 %
Strommix - elektrische Energie Energieträgermix - therm. Energie ²⁾	25 MJ	23 MJ	23 MJ	14 - 15 %
Phosphorsäure ¹⁾	14 MJ	14 MJ	13 MJ	8 %
Feldarbeiten Grünbrache ²⁾	13 MJ	12 MJ	12 MJ	8 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Futtermittel)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um 49 % bis 51 % auf einen KEA gesamt von

- 164 MJ für das Szenario OHNE ZUSATZ,
- 156 MJ für das Szenario PROBIOTIKA und
- 160 MJ für das Szenario SELTENE ERDEN.

Wie in Tabelle 6-8 zu sehen ist, werden die Netto-Ergebnisse bei allen Szenarien fast ausschließlich durch den KEA fossil bestimmt. Eine sichtbare, wenn auch geringe, Umweltentlastung gibt es für den KEA Kernkraft, da für diesen Parameter die Energieeinsparung durch Gutschriften größer ist, als der Energiebedarf im Bruttosystem.

Fazit: Für die Lebendmassezunahme von 58 kg eines Mastschweins in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche ist der Energiebedarf beim Szenario PROBIOTIKA um ca. 3 % niedriger als beim Szenario SELTENE ERDEN. Gegenüber diesen beiden Szenarien weist das Szenario OHNE ZUSATZ einen um 3 % bzw. 5 % höheren Energiebedarf auf.

6.2.7.3 Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle outputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 6-11 neben dem Abfall- und Abwasseraufkommen die Luft- und Wasseremissionen zusammengefasst, die für die Auswertung der UBA-Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Ozonbildung sowie Humantoxikologie und Ökotoxikologie notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten outputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Die Werte der Tabelle zeigen, dass die Emissionswerte der drei Szenarien bis auf wenige Ausnahmen eng beieinander liegen. Wie bei den inputseitigen Sachbilanzparametern spiegeln sich auch hier in den Abweichungen die geringen Unterschiede im Futtermiteinsatz und Gülleanfall (Nährstoffausscheidungen) wieder, wogegen die unterschiedlichen Einsatzmengen der Leistungsförderer kaum ins Gewicht fallen.

Von den aufgeführten Luftparametern geht von keinem der drei Szenarien eine Umweltbelastung durch Benzo(a)pyren aus. Gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ weisen die beiden Szenarien mit der Zugabe von Leistungsförderern für fast alle anderen Parameter geringere Emissionswerte auf. Der Vergleich der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN untereinander bringt ein ausgeglichenes Ergebnis.

Bezogen auf den Stoffeintrag ins Wasser geht für acht der aufgeführten Wasserparameter von keinem der drei Szenarien eine Umweltbelastung aus. Bei fast allen verbleibenden Parametern weisen die beiden Szenarien unter Zugabe von Leistungsförderern gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ geringere Emissionswerte auf. Der Vergleich der beiden Szenarien unter Verwendung leistungsfördernder Zusätze untereinander zeigt, dass für die meisten verbleibenden Abwasserparameter das Szenario PROBIOTIKA höhere Emissionen verursacht.

Tabelle 6-11: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter

Sachbilanzparameter	Einheit	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN
<i>Emissionen in die Luft</i>				
Ammoniak	mg	385.869	371.034	359.429
Benzo(a)pyren	mg	-0,0045	-0,0044	-0,0041
Benzol	mg	210	201	198
Blei	mg	0,28	0,27	0,28
Cadmium	mg	0,12	0,12	0,11
Chlorwasserstoff	mg	385	364	389
Dieselpartikel	mg	4.245	4.076	3.976
Distickstoffmonoxid	mg	134.062	127.803	126.012
Fluorwasserstoff	mg	54,0	51,5	51,8
Formaldehyd	mg	862	827	807
Kohlendioxid, fossil und unspezifisch	mg	17.783.810	16.908.794	17.132.521
Kohlenmonoxid	mg	164.925	157.258	156.674
Methan	mg	1.100.699	1.057.393	1.031.909
NMVOC	mg	11.586	11.113	10.856
NOx	mg	96.171	91.627	91.691
PAH	mg	6,6	6,37	6,13
Perfluormethan	mg	0,0091	0,0087	0,009
Schwefeldioxid	mg	10.932	10.184	11.853
Schwefelwasserstoff	mg	108	103	103
Staub	mg	9.404	8.948	9.148
VOC	mg	650	630	1.044
<i>Emissionen ins Wasser</i>				
Ammonium	mg	268	259	252
AOX	mg	0,22	0,22	0,21
Blei	mg	- 21,1	- 20,4	- 19,6
Chlorid	mg	- 128.495	- 123.880	- 116.966
Chrom	mg	- 23,2	- 22,3	- 21,5
CSB	mg	9.505	9.154	8.858
Fluorid	mg	- 0,39	- 0,37	- 0,36
Kohlenwasserstoffe, halog.	ng	0,012	0,011	0,011
Kohlenwasserstoffe, sonst.	mg	0,76	0,73	0,77
Nitrat	mg	16.861	16.260	15.658
P als P2O5	mg	-	-	0,02
PAH	ng	0,026	0,025	0,024
Phosphat	mg	- 57,2	- 55,2	- 53,1

Sachbilanzparameter	Einheit	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN
Phosphorverb. als P	mg	76,5	73,8	71,1
Stickstoffverb. als N	mg	124	120	116
Stickstoffverb., unspezifisch	mg	0,042	0,041	0,041
Sulfid	mg	- 0,0026	- 0,0025	- 0,0024
Zink	mg	- 19,4	- 18,7	- 18
Zinn	ng	- 0,13	- 0,12	- 0,12
<i>Abfallmenge</i>				
Abfälle zur Beseitigung	kg	- 4,53	- 4,37	- 4,18
Abfälle zur Verwertung	kg	10,5	10	10,1
Abfälle ohne Zuordnung	kg	- 0,0062	- 0,006	- 0,0058
Abraum	kg	- 6,05	- 5,83	- 4,57
<i>Abwassermenge</i>				
Abwasser (Kesselschlammung)	kg	- 174	- 167	- 161
Abwasser (Kühlwasser)	kg	- 249	- 239	- 229
Abwasser (Prozess)	kg	- 0,032	- 0,031	- 0,012
Abwasser geklärt	kg	345	329	326
Abwasser sonstige	kg	459	443	426
Wasserdampf	kg	- 433	- 414	- 398

Negative Werte entsprechen „Einsparung“ durch die Verrechnung von Gutschriften

In den folgenden Abschnitten wurde näher auf die oben genannten Wirkungskategorien eingegangen. Es wurden die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend hinsichtlich signifikanter Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

6.2.7.4 Treibhauseffekt

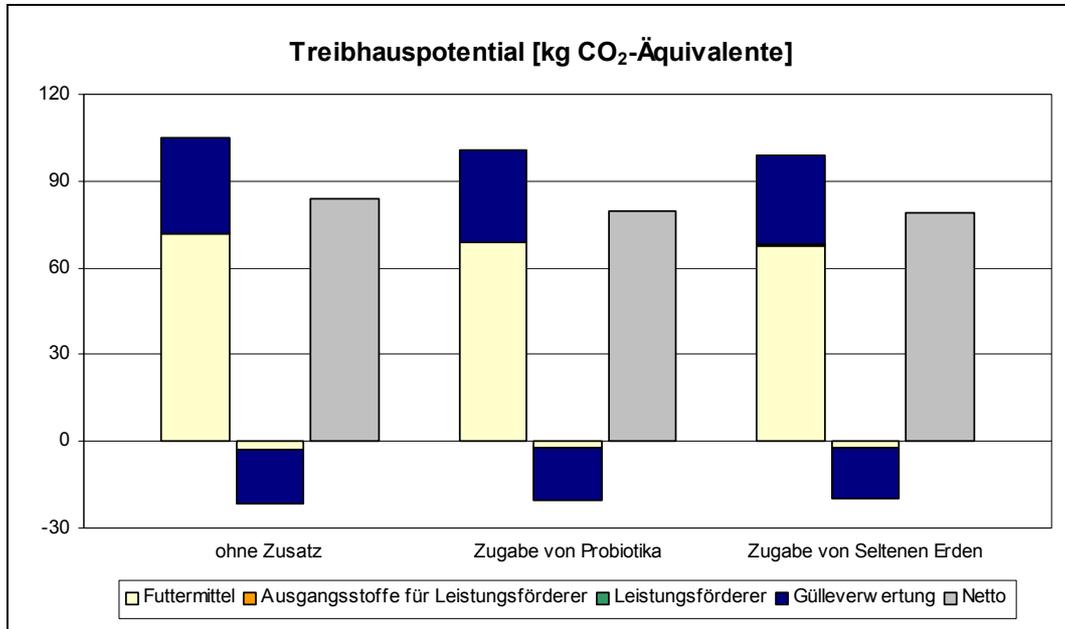


Abbildung 6-24: Treibhauseffekt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-24 zeigt, dass in den drei Szenarien treibhausrelevante Emissionen in ähnlicher Größenordnung berechnet wurden. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt 6 %.

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse werden im Wesentlichen durch Emissionen aus der Herstellung der Futtermittelbestandteile und der Behandlung der dabei anfallenden Abfälle sowie aus der landwirtschaftlichen Verwertung der Gülle bestimmt (vgl. Tabelle 6-12). Emissionen aus den Teilsystemen Ausgangsstoffe für Leistungsförderer sowie Leistungsförderer haben so gut wie keinen Einfluss auf das Treibhauspotential.

Tabelle 6-12: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
landw. Gülleverwertung ¹⁾	28 kg CO ₂	28 kg CO ₂	27 kg CO ₂	26 %
Weizen ²⁾	23 kg CO ₂	22 kg CO ₂	22 kg CO ₂	22 %
Gerste ²⁾	23 kg CO ₂	22 kg CO ₂	22 kg CO ₂	22 %
Soja ²⁾	15 kg CO ₂	14 kg CO ₂	14 kg CO ₂	14 %
Abfallbehandlung ²⁾	9 kg CO ₂	9 kg CO ₂	9 kg CO ₂	9 %

¹⁾ Teilsystem Gülleverwertung

²⁾ Teilsystem Futtermittel

Gutschriften

Der größere Teil der Gutschriften fällt durch Äquivalenzprozesse, die sich aus der Gülleverwertung ergeben, an. Zum Einen wird durch die Vergärung von Gülle Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Gülleverwertung synthetische Düngemittel substituiert. Hauptsächlich vermindern sich damit Emissionen aus der Herstellung von Salpetersäure und Ammoniak (vgl. Tabelle 6-13). Gutschriften aus dem Äquivalenzsystem zur Futtermittelherstellung spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 6-13: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Treibhauspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Salpetersäure ¹⁾	12 kg CO ₂	11 kg CO ₂	11 kg CO ₂	55 %
Strommix - elektrische Energie Energieträgermix - therm. Energie ¹⁾	2,8 kg CO ₂	2,5 kg CO ₂	2,6 kg CO ₂	13 %
Ammoniak ¹⁾	2,3 kg CO ₂	2,3 kg CO ₂	2,2 kg CO ₂	11 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um jeweils 20 % auf ein Treibhauspotential von

- 84 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario OHNE ZUSATZ,
- 80 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario PROBIOTIKA und
- 79 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario SELTENE ERDEN.

Die CO₂-Äquivalente werden bei allen Szenarien zur Hälfte durch Distickstoffmonoxidemissionen verursacht. Die andere Hälfte stammt zu ähnlichen Anteilen aus Methan- und Kohlendioxidemissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Lebendmassezunahme eines Mastschweins von 58 kg in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche ist die Emission an CO₂-Äquivalenten beim Szenario PROBIOTIKA um ca. 1 % höher als beim Szenario SELTENE ERDEN. Gegenüber diesen beiden Szenarien weist das Szenario OHNE ZUSATZ ca. 5 % bzw. 6 % höhere CO₂-Äquivalente auf.

6.2.7.5 Versauerung

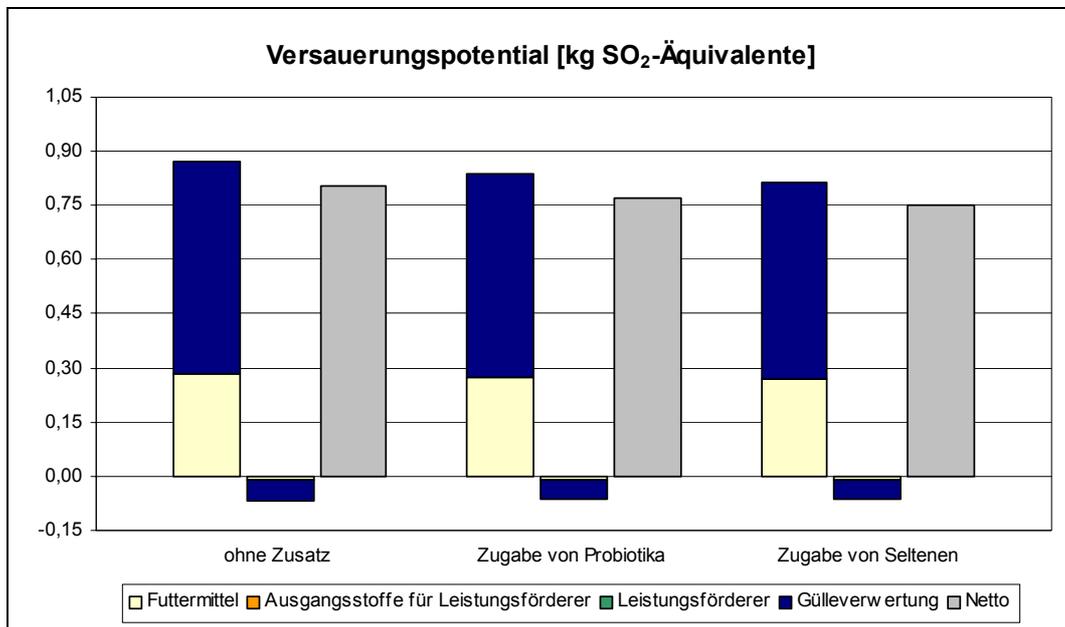


Abbildung 6-25: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-25 zeigt, dass das Versauerungspotential der drei Szenarien in ähnlicher Größenordnung berechnet wurde. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt 6 %.

Brutto-Ergebnis

Zu den Brutto-Ergebnissen tragen mit über 60 % Emissionen aus der landwirtschaftlichen Verwertung sowie der Nassvergärung der Gülle bei. Die restlichen SO₂-Äquivalente resultieren überwiegend aus Emissionen, die bei der Herstellung der Futtermittelbestandteile Weizen und Gerste anfallen (vgl. Tabelle 6-14). Kaum nennenswerte Beiträge zum Versauerungspotential sind dagegen bei der Herstellung der Ausgangsstoffe für die Leistungsförderer sowie der Leistungsförderer selbst zu verzeichnen.

Tabelle 6-14: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
landw. Gülleverwertung ¹⁾	0,49 kg SO ₂	0,48 kg SO ₂	0,46 kg SO ₂	56 - 57 %
Weizen ²⁾	0,18 kg SO ₂	0,17 kg SO ₂	0,17 kg SO ₂	20 %
Gerste ²⁾	0,09 kg SO ₂	0,08 kg SO ₂	0,08 kg SO ₂	10 %
Nassvergärung ¹⁾	0,06 kg SO ₂	0,06 kg SO ₂	0,06 kg SO ₂	7 %

¹⁾ Teilsystem Gülleverwertung

²⁾ Teilsystem Futtermittel

Gutschriften

Gutschriften fallen zum größten Teil durch die Äquivalenzprozesse, die sich aus der Gülleverwertung ergeben, an. Zum Einen wird durch die Vergärung von Gülle Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Gülleverwertung synthetische Düngemittel substituiert. Hauptsächlich vermindern sich damit Emissionen aus der Herstellung von Salpetersäure, Phosphorsäure und Ammoniak. Ein kleiner Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Futtermittelherstellung und dort überwiegend aus dem Weizenanbau, da keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig sind.

Tabelle 6-15: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des Versauerungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Salpetersäure ¹⁾	18 g SO ₂	17 g SO ₂	17 g SO ₂	27 %
Phosphorsäure ¹⁾	13 g SO ₂	12 g SO ₂	12 g SO ₂	19 %
Ammoniak ¹⁾	8 g SO ₂	8 g SO ₂	7 g SO ₂	12 %
Strommix - elektrische Energie Energieträgermix - therm. Energie ¹⁾	7 g SO ₂	6 g SO ₂	6 g SO ₂	10 %
Feldarbeiten Grünbrache ²⁾	6 g SO ₂	6 g SO ₂	5 g SO ₂	8 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Futtermittel)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung von Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um jeweils 8 % auf ein Versauerungspotential von

- 0,8 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario OHNE ZUSATZ,
- 0,77 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario PROBIOTIKA und
- 0,75 kg SO₂-Äquivalente für das Szenario SELTENE ERDEN.

Die SO₂-Äquivalente werden bei allen Szenarien zu ca. 90 % aus Ammoniakemissionen gebildet. Darüber hinaus weisen nur noch Stickoxidemissionen mit 8 bis 9 % einen größeren Beitrag zum Versauerungspotential auf (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Lebendmassezunahme eines Mastschweins von 58 kg in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche ist die Emission an SO₂-Äquivalenten beim Szenario PROBIOTIKA um ca. 3 % höher als beim Szenario SELTENE ERDEN. Gegenüber diesen beiden Szenarien weist das Szenario OHNE ZUSATZ ca. 4 % bzw. 6 % höhere SO₂-Äquivalente auf.

6.2.7.6 Terrestrische Eutrophierung

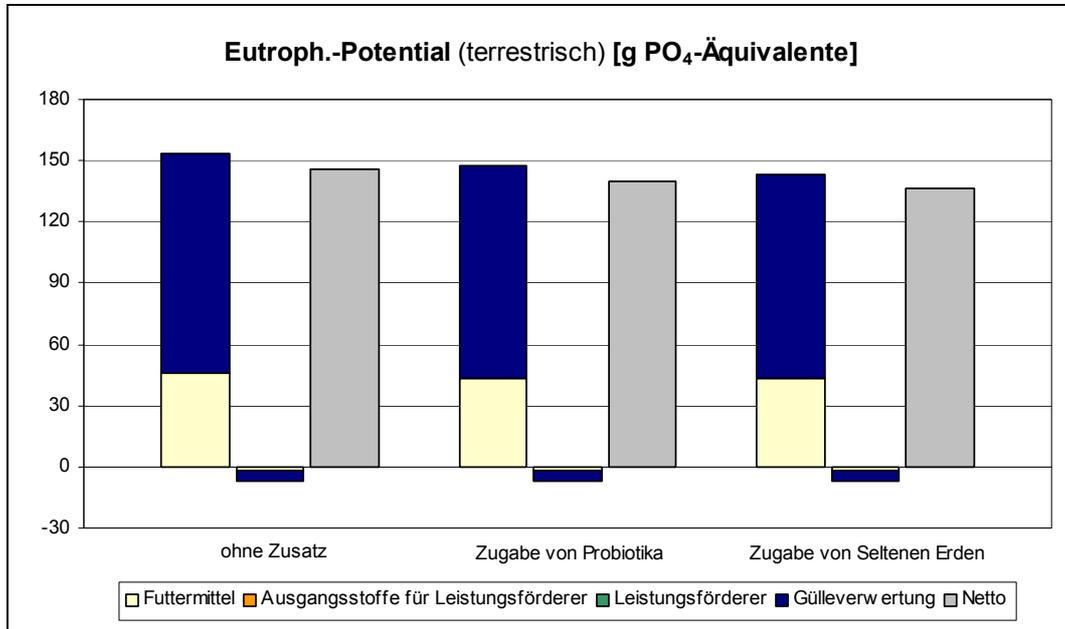


Abbildung 6-26: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-26 zeigt, dass das terrestrische Eutrophierungspotential der drei Szenarien in ähnlicher Größenordnung berechnet wurde. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt 7 %.

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse werden zu fast 70 % durch Emissionen aus der landwirtschaftlichen Verwertung sowie der Nassvergärung der Gülle bestimmt. Die verbleibenden PO₄-Äquivalenten gehen größtenteils auf die Herstellung der Futtermittelbestandteile Weizen und Gerste zurück. Kaum nennenswerte Beiträge zum Eutrophierungspotential entstehen dagegen bei der Herstellung der Ausgangsstoffe für die Leistungsförderer sowie der Leistungsförderer selbst.

Tabelle 6-16: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
landw. Gülleverwertung ¹⁾	91 g PO ₄	88 g PO ₄	84 g PO ₄	59 %
Weizen ²⁾	30 g PO ₄	28 g PO ₄	28 g PO ₄	19 %
Gerste ²⁾	13 g PO ₄	12 g PO ₄	12 g PO ₄	8 %
Nassvergärung ¹⁾	12 g PO ₄	11 g PO ₄	11 g PO ₄	8 %

¹⁾ Teilsystem Gülleverwertung

²⁾ Teilsystem Futtermittel

Gutschriften

Im Wesentlichen fallen Gutschriften durch die Äquivalenzprozesse, die sich aus der Gülleverwertung ergeben, an. Zum Einen wird durch die Vergärung von Gülle Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Gülleverwertung synthetische Düngemittel substituiert, wodurch sich hauptsächlich Emissionen aus der Herstellung von Salpetersäure und Ammoniak vermindern. Ein kleinerer Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Futtermittelherstellung und dort überwiegend aus dem Weizenanbau, da keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig sind.

Tabelle 6-17: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des terrestrischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Salpetersäure ¹⁾	2,75 g PO ₄	2,64 g PO ₄	2,56 g PO ₄	37 %
Feldarbeiten Grünbrache ²⁾	1,26 g PO ₄	1,23 g PO ₄	1,19 g PO ₄	17 %
Ammoniak ¹⁾	0,71 g PO ₄	0,68 g PO ₄	0,66 g PO ₄	10 %
Strommix - elektrische Energie Energieträgermix - therm. Energie ¹⁾	0,53 g PO ₄	0,51 g PO ₄	0,49 g PO ₄	7 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

²⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Futtermittel)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung von Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um jeweils 5 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von

- 0,146 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario OHNE ZUSATZ,
- 0,14 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario PROBIOTIKA und
- 0,136 kg PO₄-Äquivalente für das Szenario SELTENE ERDEN.

Die PO₄-Äquivalente werden bei allen Szenarien zu über 90 % durch Ammoniakemissionen verursacht. Die restlichen PO₄-Äquivalente stammen aus Stickoxidemissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Lebendmassezunahme eines Mastschweins von 58 kg eines in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche ist das terrestrische Eutrophierungspotential für das Szenario PROBIOTIKA um ca. 3 % größer als für das Szenario SELTENE ERDEN. Gegenüber diesen beiden Szenarien weist das Szenario OHNE ZUSATZ ca. 4 % bzw. 7 % höhere PO₂-Äquivalente auf.

6.2.7.7 Aquatische Eutrophierung

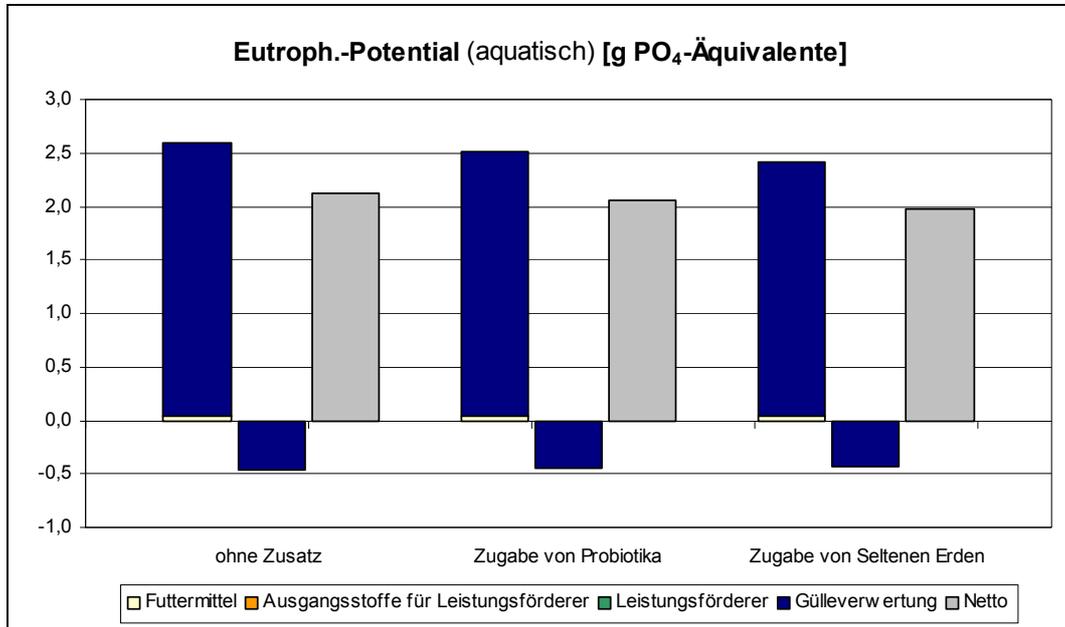


Abbildung 6-27: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-27 zeigt, dass das aquatische Eutrophierungspotential der drei Szenarien in ähnlicher Größenordnung berechnet wurde. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt 7 %.

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse resultieren fast ausschließlich (99 %) aus Emissionen, die durch die Nassvergärung der Gülle verursacht werden. Die restlichen PO₄-Äquivalente sind dem Teilsystem Futtermittel zuzuschreiben.

Gutschriften

Gutschriften stammen ausschließlich aus den Äquivalenzprozessen, die sich aus der Gülleverwertung ergeben. Durch die landwirtschaftliche Gülleverwertung wird der Bedarf an den synthetischen Düngemitteln Ammoniumnitrat und Diammoniumphosphat reduziert, wodurch Emissionen bei deren Herstellung vermieden werden.

Tabelle 6-18: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften des aquatischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Ammoniumnitrat ¹⁾	0,41 g PO ₄	0,40 g PO ₄	0,40 g PO ₄	88 %
Diammoniumphosphat ¹⁾	0,06 g PO ₄	0,06 g PO ₄	0,06 g PO ₄	12 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung von Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um jeweils 18 % auf ein aquatisches Eutrophierungspotential von

- 2,13 g PO₄-Äquivalente für das Szenario OHNE ZUSATZ,
- 2,05 g PO₄-Äquivalente für das Szenario PROBIOTIKA
- 1,98 g PO₄-Äquivalente für das Szenario SELTENE ERDEN.

Die PO₄-Äquivalente setzen sich zu ca. 75 % aus Nitratemissionen sowie zu ca. 10 % aus Emissionen von Phosphatverbindungen bzw. aus dem CSB zusammen. Eine geringe Umweltentlastung ergibt sich für Phosphatemissionen, da für diesen Parameter die Emissionseinsparungen aus den Gutschriften größer sind als die Emissionen aus dem Bruttosystem (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Lebendmassezunahme eines Mastschweins von 58 kg eines in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche ist das aquatische Eutrophierungspotential für das Szenario PROBIOTIKA um ca. 4 % größer als für das Szenario SELTENE ERDEN. Gegenüber diesen beiden Szenarien weist das Szenario OHNE ZUSATZ ca. 4 % bzw. 7 % höhere PO₂-Äquivalente auf.

6.2.7.8 Ozonbildung

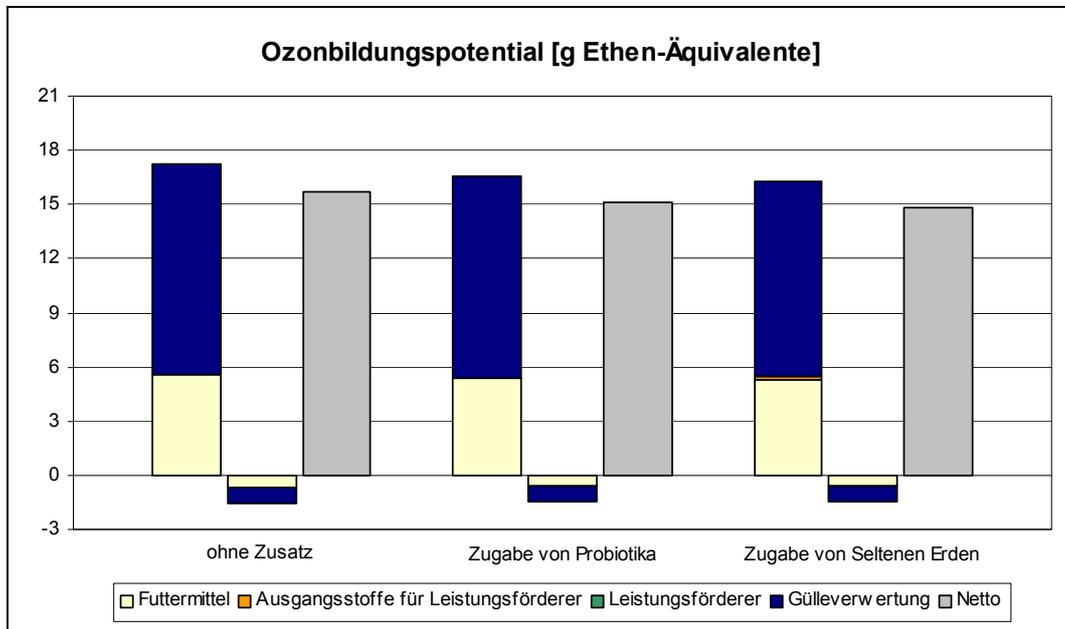


Abbildung 6-28: Ozonbildung - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-28 zeigt, dass das Ozonbildungspotential der drei Szenarien in ähnlicher Größenordnung berechnet wurde. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt 5 %.

Brutto-Ergebnis

Zu den Brutto-Ergebnissen tragen hauptsächlich Emissionen aus der landwirtschaftlichen Gülleverwertung und vom dazu notwendigen Ackerschlepper sowie aus der Herstellung des Futtermittelbestandteils Weizen und der Behandlung von Abfällen aus der Futtermittelherstellung bei (vgl. Tabelle 6-12). Emissionen aus den Teilsystemen Ausgangsstoffe für Leistungsförderer sowie die Leistungsförderer selbst haben so gut wie keinen Einfluss auf die Ozonbildung.

Tabelle 6-19: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis der Ozonbildung

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
landw. Gülleverwertung ¹⁾	5,2 g Ethen	5,0 g Ethen	4,9 g Ethen	30 %
Ackerschlepper ¹⁾	5,2 g Ethen	5,0 g Ethen	4,8 g Ethen	29- 30 %
Abfallbehandlung ²⁾	2,3 g Ethen	2,2 g Ethen	2,2 g Ethen	13 - 14 %
Weizen ¹⁾	1,6 g Ethen	1,5 g Ethen	1,5 g Ethen	9 %

¹⁾ Teilsystem Gülleverwertung

²⁾ Teilsystem Futtermittel

Gutschriften

Der etwas größere Teil der Gutschriften fällt durch die Äquivalenzprozesse, die sich aus der Gülleverwertung ergeben, an. Zum Einen wird durch die Vergärung von Gülle Biogas und damit Energie erzeugt. Dadurch werden konventionelle Prozesse zur Energieerzeugung ersetzt und die mit dem Verbrennen fossiler Energieträger verbundenen Emissionen vermieden. Zum Anderen werden durch die landwirtschaftliche Gülleverwertung synthetische Düngemittel substituiert, wodurch sich hauptsächlich Emissionen aus dem Bahntransport des synthetischen Düngemittels Ammoniumnitrat sowie Emissionen aus der Herstellung von Ammoniak vermindern. Der kleinere Teil der Gutschriften resultiert auch aus dem Äquivalenzsystem zur Futtermittelherstellung und dort hauptsächlich aus dem Weizenanbau, da keine Feldarbeiten für entsprechende Grünbrachen notwendig sind.

Tabelle 6-20: Beitragsanalyse aus den Äquivalenzsystemen zu den Gutschriften der Ozonbildung

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil absolut			Anteil prozentual
	OHNE ZUSATZ	PROBIOTIKA	SELTENE ERDEN	
Feldarbeiten Grünbrache ¹⁾	0,56 kg CH ₄	0,53 kg CH ₄	0,52 kg CH ₄	36 - 37 %
Strommix - elektrische Energie Energieträgermix - therm. Energie ²⁾	0,15 kg CH ₄	0,14 kg CH ₄	0,14 kg CH ₄	10 %
Bahntransport Ammoniumnitrat ²⁾	0,14 kg CH ₄	0,14 kg CH ₄	0,13 kg CH ₄	9 %
Ammoniak ²⁾	0,12 kg CH ₄	0,12 kg CH ₄	0,12 kg CH ₄	8 %

¹⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Futtermittel)

²⁾ Äquivalenzsystem Nachkette (Teilsystem Gülleverwertung)

Netto-Ergebnisse

Die Verrechnung von Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um jeweils 9 % auf ein Ozonbildungspotential von

- 0,016 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario OHNE ZUSATZ,
- 0,015 kg Ethen-Äquivalente für das Szenario PROBIOTIKA und
- 0,015 Kg Ethen-Äquivalente für das Szenario SELTENE ERDEN.

Die Ethen-Äquivalente werden bei allen Szenarien zu ca. 50 % aus Methanemissionen sowie zu ca. 45 % aus NMVOC-Emissionen gebildet. Die restlichen Ethen-Äquivalente stammen aus Formaldehyd- und VOC-Emissionen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für die Lebendmassezunahme eines Mastschweins von 58 kg in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche ist die Emission an Ethen-Äquivalenten beim Szenario PROBIOTIKA um ca. 2 % höher als beim Szenario SELTENE ERDEN. Gegenüber diesen beiden Szenarien weist das Szenario OHNE ZUSATZ ca. 4 % bzw. 5 % höhere Ethen-Äquivalente auf.

6.2.7.9 Humantoxizität

Stellvertretend für die ausgewählten humantoxisch eingestuft Parameter sind in Abbildung 6-29 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Cadmium und Schwefeldioxid dargestellt.

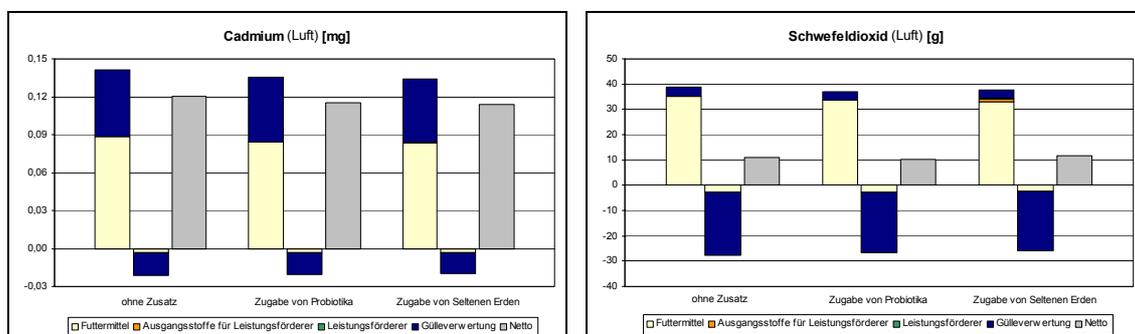


Abbildung 6-29: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-29 zeigt, dass in den drei Szenarien für die beiden dargestellten Parameter Emissionen in ähnlicher Größenordnung berechnet wurden. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt bei Cadmium 5 % und bei Schwefeldioxid 16 %.

Brutto-Ergebnisse

Für die untersuchten Parameter Benzo(a)pyren, Blei, Cadmium, Schwefeldioxid, Staub werden die Brutto-Ergebnisse überwiegend (zwischen 62 % und 99 %) durch Emissionen aus der Futtermittelherstellung bestimmt. Emissionen aus der Gülleverwertung tragen hauptsächlich bei Blei (38 %) zum Brutto-Ergebnis bei. Emissionen aus den Teilsystemen Ausgangsstoffe für Leistungsförderer sowie Leistungsförderer haben dagegen nur einen geringen Einfluss. Bei Staub (2 %), Blei (3 %) und Schwefeldioxid (3 %) sind sichtbare aber nur geringe Beiträge zu verzeichnen.

Gutschriften

Der größte Teil der Gutschriften fällt bei allen fünf untersuchten Parametern durch Äquivalenzprozesse, die sich aus der Gülleverwertung ergeben, an. Während bei Benzo(a)pyren und Blei ein kleinerer Teil der Gutschriften auch aus der Futtermittelherstellung resultiert, spielen diese bei den anderen Parametern nur eine untergeordnete Rolle.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse der drei Szenarien sind in Tabelle 6-11 dargestellt. Diese zeigen, dass von Benzo(a)pyren bei keinem der drei Szenarien eine Umweltbelastung ausgeht. Die anderen Parameter werden in Tabelle 6-21 und Tabelle 6-22 miteinander verglichen.

Tabelle 6-21: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
<i>Umweltbeitrag des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ</i>			
Blei	Entlastung	- 0,01 mg	- 5 %
Cadmium	Entlastung	- 0,005 mg	- 4 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 0,7 g	- 7 %
Staub	Entlastung	- 0,46 g	- 5 %
<i>Umweltbeitrag des Szenarios SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ</i>			
Blei	Entlastung	- 0,007 mg	- 2 %
Cadmium	Entlastung	- 0,006 mg	- 5 %
Schwefeldioxid	Belastung	+ 0,9 g	+ 8 %
Staub	Entlastung	- 0,26 g	- 3 %

Tabelle 6-22: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
<i>Umweltbeitrag des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN</i>			
Blei	Entlastung	- 0,007 mg	- 2 %
Cadmium	Belastung	+ 0,001 mg	+ 1 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 1,7 g	- 14 %
Staub	Entlastung	- 0,2 g	- 2 %

Fazit: Von den humantoxisch eingestufteten Parametern geht für Benzo(a)pyren von keinem der drei Szenarien eine Umweltbelastung aus. Im Szenario PROBIOTIKA wurden für Blei, Schwefeldioxid und Staub niedrigere bzw. für Cadmium höhere Emissionswerte als im Szenario SELTENE ERDEN berechnet. Für die meisten Parameter fallen die Mehr-/Minderemissionen mit $\pm 2\%$ aber gering aus. Gegenüber den Szenarien mit leistungsfördernden Zusätzen weist das Szenario OHNE ZUSATZ für alle Parameter, mit der Ausnahme von Schwefeldioxid für das Szenario SELTENE ERDEN, höhere Emissionswerte auf, wobei aber auch hier ein Teil der Mehremissionen mit max. $+ 2\%$ gering ausfällt.

6.2.7.10 Ökotoxizität

6.2.7.10.1 Luftemissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuft Parameter sind in Abbildung 6-30 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Ammoniak und Stickoxide dargestellt.

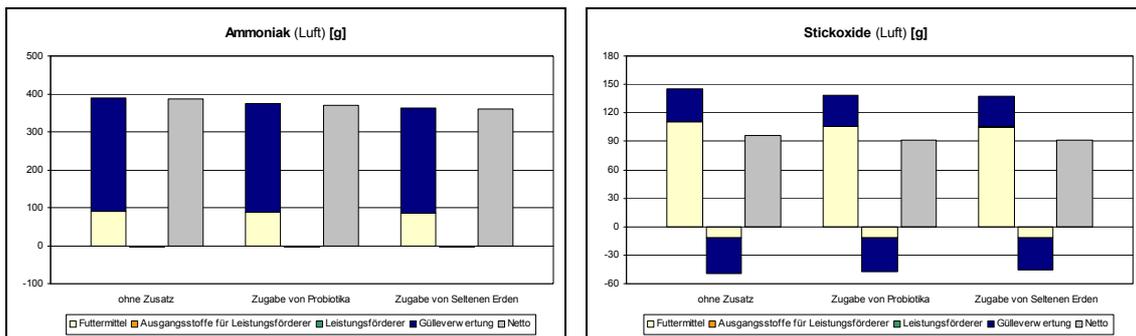


Abbildung 6-30: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxide - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-30 zeigt, dass in den drei Szenarien für die beiden dargestellten Parameter Emissionen in ähnlicher Größenordnung berechnet wurden. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt bei Ammoniak 7 % und bei den Stickoxiden 5 %.

Brutto-Ergebnisse

Bis auf Ammoniak werden die Brutto-Ergebnisse der untersuchten Parameter Ammoniak Fluorwasserstoff, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Stickoxide überwiegend (zwischen 75 % und 91 %) durch Emissionen aus der Futtermittelherstellung bestimmt. Emissionen aus der Gülleverwertung tragen zwischen 9 % und 25 % zu den Brutto-Ergebnissen bei. Bei Ammoniak dagegen stammt der größte Teil der Emissionen (77 %) aus der Gülleverwertung und der Rest aus der Futtermittelherstellung. Emissionen aus den Teilsystemen Ausgangsstoffe für Leistungsförderer sowie Leistungsförderer haben so gut wie keinen Einfluss auf die Brutto-Ergebnisse. Lediglich bei Schwefeldioxid (3 %) ist ein sichtbarer aber geringer Beitrag zu erkennen.

Tabelle 6-23: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
<i>Umweltbeitrag des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ</i>			
Ammoniak	Entlastung	- 15 g	- 4 %
Fluorwasserstoff	Entlastung	- 2,5 mg	- 5 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 0,7 g	- 7 %
Schwefelwasserstoff	Entlastung	- 5 mg	- 5 %
Stickoxide	Entlastung	- 4,5 g	- 5 %
<i>Umweltbeitrag des Szenarios SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ</i>			
Ammoniak	Entlastung	- 26 g	- 7 %
Fluorwasserstoff	Entlastung	- 2,2 mg	- 4 %
Schwefeldioxid	Belastung	+ 0,9 g	+ 8 %
Schwefelwasserstoff	Entlastung	- 5 mg	- 5 %
Stickoxide	Entlastung	- 4,5 g	- 5 %

Gutschriften

Für Ammoniak und Schwefelwasserstoff sind die anfallenden Gutschriften vernachlässigbar. Die Gutschriften der anderen drei Parameter stammen hauptsächlich aus Äquivalenzprozessen, die sich aus der Gülleverwertung ergeben. Während bei Fluorwasserstoff und Stickoxiden auch ein kleinerer Teil der Gutschriften aus der Futtermittelherstellung resultiert, spielen diese bei Schwefeldioxid nur eine untergeordnete Rolle.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse der drei Szenarien sind in Tabelle 6-11 dargestellt. In Tabelle 6-23 und Tabelle 6-24 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 6-24: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
<i>Umweltbeitrag des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN</i>			
Ammoniak	Belastung	+ 12 g	+ 3 %
Fluorwasserstoff	Entlastung	- 0,32 mg	- 1 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 1,7 g	- 14 %
Schwefelwasserstoff	Belastung	+ 0,09 mg	+ 0,1 %
Stickoxide	Entlastung	- 0,1 g	- 0,1 %

Fazit: Im Szenario PROBIOTIKA wurden für die als ökotoxikologisch relevant eingestufte Parameter (Luftemissionen) Fluorwasserstoff, Schwefeldioxid und Stickoxide niedrigere bzw. für Ammoniak und Schwefelwasserstoff höhere Emissionswerte als im Szenario SELTENE ERDEN berechnet, wobei für die meisten Parameter die Mehr-/Minderemission mit $\pm 2 \%$ nur gering ausfallen. Gegenüber den Szenarien mit leistungsfördernden Zusätzen weist das Szenario OHNE ZUSATZ für alle Parameter, mit der Ausnahme von Schwefeldioxid im Szenario SELTENE ERDEN, höhere Emissionswerte auf.

6.2.7.10.2 Wasseremissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestufte Parameter sind in Abbildung 6-31 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Ammonium und Chlorid dargestellt.

Abbildung 6-31 zeigt, dass in den drei Szenarien für die beiden dargestellten Parameter Emissionen in ähnlicher Größenordnung berechnet wurden. Die größte Abweichung in den Netto-Ergebnissen beträgt bei Ammonium 6 % und bei Chlorid - 9 %.

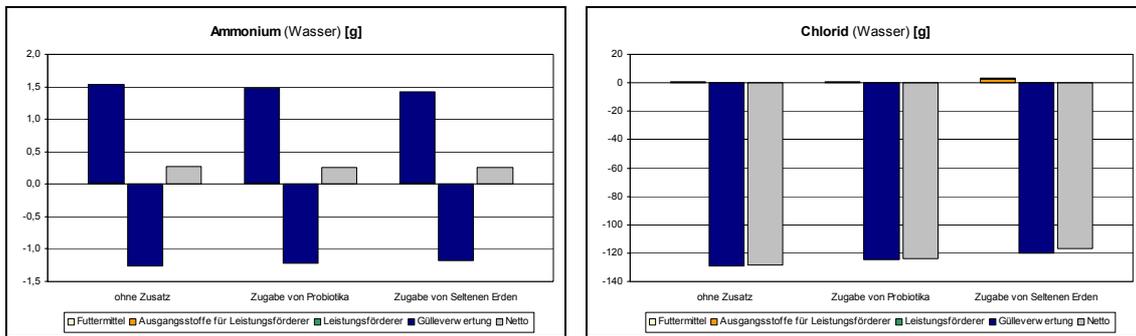


Abbildung 6-31: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Brutto-Ergebnisse

Bis auf Chlorid beim Szenario SELTENE ERDEN werden die Brutto-Ergebnisse der untersuchten Parameter Ammonium, AOX, Chlorid und Kohlenwasserstoffe zum größten Teil (zwischen 80 % und 99 %) durch Emissionen aus der Gülleverwertung bestimmt. Bei der erwähnten Ausnahme stammen die Emissionen hauptsächlich (76 %) aus der Herstellung der Ausgangsstoffe für die Leistungsförderer. Emissionen aus der Futtermittelherstellung tragen bei AOX und Chlorid signifikant (zwischen 17 % und 20 %) zum Brutto-Ergebnis bei. Emissionen aus den Teilsystemen Ausgangsstoffe für Leistungsförderer sowie Leistungsförderer leisten neben Chlorid im Szenario SELTENE ERDEN auch für AOX und Chlorid im Szenario PROBIOTIKA (2 % bzw. 3 %) sowie für Kohlenwasserstoffe im Szenario SELTENE ERDEN (9 %) kleinere Beiträge zu den Brutto-Ergebnissen.

Gutschriften

Für AOX und Kohlenwasserstoffe sind die anfallenden Gutschriften vernachlässigbar. Die Gutschriften für Ammonium und Chlorid stammen fast ausschließlich aus Äquivalenzprozessen, die sich aus der Gülleverwertung ergeben.

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse der drei Szenarien sind in Tabelle 6-11 dargestellt. Diese zeigen, dass von Chlorid bei keinem der drei Szenarien eine Umweltbelastung ausgeht. Die anderen Parameter werden in Tabelle 6-25 und Tabelle 6-26 miteinander verglichen.

Tabelle 6-25: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages der Szenarien PROBIOTIKA und SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
<i>Umweltbeitrag des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ</i>			
Ammonium	Entlastung	- 8 mg	- 3 %
AOX	Entlastung	- 0,003 mg	- 1 %
Kohlenwasserstoffe	Entlastung	- 0,03 mg	- 4 %
<i>Umweltbeitrag des Szenarios SELTENE ERDEN gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ</i>			
Ammonium	Entlastung	- 16 mg	- 6 %
AOX	Entlastung	- 0,01 mg	- 7 %
Kohlenwasserstoffe	Belastung	+ 0,03 mg	+ 2 %

Tabelle 6-26: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
<i>Umweltbeitrag des Szenarios PROBIOTIKA gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN</i>			
Ammonium	Belastung	+ 8 mg	+ 3 %
AOX	Belastung	+ 0,01 mg	+ 6 %
Kohlenwasserstoffe	Entlastung	- 0,04 mg	- 6 %

Fazit: Von den als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parametern (Wasseremissionen) geht für den Parameter Chlorid von keinem der drei Szenarien eine Umweltbelastung aus. Im Szenario PROBIOTIKA wurden für Kohlenwasserstoffe niedrigere bzw. für Ammonium und Chlorid höhere Emissionswerte als im Szenario SELTENE ERDEN berechnet. Gegenüber den Szenarien mit leistungsfördernden Zusätzen weist das Szenario OHNE ZUSATZ für alle Parameter, mit der Ausnahme der Kohlenwasserstoffe im Szenario SELTENE ERDEN, höhere Emissionswerte auf, wobei aber ein Teil der Mehr-/Minderemissionen mit max. ± 2 % gering ausfällt.

6.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Vergleich der Tierproduktion unter Einsatz eines

- Futtermittels ohne Zugabe von Leistungsförderer (Szenario OHNE ZUSATZ)
- Futtermittels mit Zugabe eines biotechnisch (fermentativ) hergestellten Probiotikums (Szenario PROBIOTIKA) sowie
- Futtermittels mit Zugabe eines chemisch-technisch hergestellten Seltenen Erden-Produktes (Szenario SELTENE ERDEN)

sind in Tabelle 6-27 noch einmal zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte für die hier betrachtete funktionelle Einheit (**Lebendmassezunahme eines Mastschweins von 58 kg in der Mastphase zwischen der 8. und 20. Lebenswoche**) berechnet und bei der nachfolgenden Diskussion berücksichtigt. Hierbei ist zu beachten, dass alle Daten der Einwohnerwerte (EWW) mit Faktor 100.000 multipliziert wurden, um die Lesbarkeit der Zahlen zu erleichtern.

Die Ergebnisse der drei Szenarien liegen für alle betrachteten Wirkungskategorien und Einzelparameter sehr eng beieinander. Ursache dafür sind die ergebnisentscheidenden Teilsysteme Futtermittel und Gülleverwertung. Die geringen Abweichungen in den eingesetzten Mengen an Futtermittel bzw. den anfallenden Mengen an Gülle, die beide abhängig vom festgelegten Leistungspotential der Leistungsförderer definiert wurden, sind für die geringen Abweichungen der Ergebnisse der Szenarien verantwortlich. Die signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien, d.h. die Teilsysteme Ausgangsstoffe für Leistungsförderer sowie Leistungsförderer, hatten so gut wie keinen Einfluss auf die Wirkungsabschätzung und damit auf das Ergebnis des Produktvergleichs.

Die Tabelle verdeutlicht:

- Das Szenario PROBIOTIKA wies gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ Umweltentlastungspotentiale für alle betrachteten Wirkungskategorien und Einzelparameter auf.

Tabelle 6-27: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

	Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Differenz (Probiotika – ohne Zusatz) 10 ⁻⁵ EWW	Differenz (Seltene Erden – ohne Zusatz) 10 ⁻⁵ EWW
Einheit	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW
Wirkungskategorien, aggregiert											
KEA	GJ	0,16	0,16	0,16	89,3	91,8	94,2	89,3	91,8	-4,95	-2,37
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq.	83,7	79,9	79,0	677	669	709	677	669	-31,9	-39,6
Versauerungspot.	kg SO ₂ -Äq.	0,80	0,77	0,75	1897	1848	1976	1897	1848	-78,2	-128
Eutroph.-pot. (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	0,15	0,14	0,14	2691	2615	2801	2691	2615	-110	-187
Eutroph.-pot. (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	0,0021	0,0021	0,0020	36,9	35,6	38,2	36,9	35,6	-1,36	-2,69
Ozonbild.- pot. (POCP)	kg Eth-Äq.	0,016	0,015	0,015	175	172	182	175	172	-7,11	-9,76
Humantoxische Einzelstoffe											
Benzo(a)pyren (L)	mg	-0,0045	-0,0044	-0,0041	-2,71	-2,44	-2,71	-2,65	-2,44	0,06	0,27
Blei (L)	mg	0,28	0,27	0,28	3,49	3,58	3,67	3,49	3,58	-0,17	-0,09
Cadmium (L)	mg	0,120	0,115	0,114	86,0	85,2	90,0	86,0	85,2	-3,92	-4,72
Schwefeldioxid (L)	g	11	10	12	105	123	113	105	123	-7,74	9,52
Staub (L)	g	9,4	8,9	9,1	284	291	299	284	291	-14,5	-8,12
Ökotoxische Einzelstoffe											
Ammoniak (L)	kg	0,39	0,37	0,36	4891	4738	5086	4891	4738	-196	-348
Fluorwasserstoff (L)	g	0,054	0,052	0,052	3,42	3,44	3,58	3,42	3,44	-0,16	-0,14
Schwefeldioxid (L)	kg	0,011	0,010	0,012	105	123	113	105	123	-7,74	9,52
Schwefelw.- stoff (L)	g	0,108	0,103	0,103	--	--	--	--	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	0,096	0,092	0,092	471	471	494	471	471	-23,4	-23,0
Ammonium (W)	g	0,27	0,26	0,25	9,27	8,99	9,56	9,27	8,99	-0,30	-0,58
AOX (W)	mg	0,22	0,22	0,21	0,41	0,39	0,42	0,41	0,39	-0,01	-0,03
Chlorid (W)	kg	-0,13	-0,12	-0,12	--	--	--	--	--	--	--
Kohlenw.-stoffe (W)	mg	0,76	0,73	0,77	1,40	1,49	1,45	1,40	1,49	-0,05	0,03

- Das Szenario SELTENE ERDEN wies gegenüber dem Szenario OHNE ZUSATZ Umweltentlastungspotentiale für alle betrachteten Wirkungskategorien und Einzelparameter, ausgenommen Benzo(a)pyren (L), Schwefeldioxid (L) und Kohlenwasserstoffe (W) auf. Für diese Parameter führte das Szenario SELTENE ERDEN zu einer höheren Belastung der Umwelt als das Szenario OHNE ZUSATZ.
- Das Szenario PROBIOTIKA wies gegenüber dem Szenario SELTENE ERDEN relevante Umweltentlastungspotentiale auf für den kumulierten Energieaufwand sowie die Einzelparameter Schwefeldioxid (L) und Staub (L) auf. Für die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, terrestrische und aquatische Eutrophierung und Ozonbildung sowie die Einzelparameter Ammoniak (L) führte das Szenario SELTENE ERDEN zu einer relevanten Umweltentlastung im Vergleich zum Szenario PROBIOTIKA.

6.3 Produktvergleich 3 – Enzymeinsatz in Vollwaschmitteln

6.3.1 Basisinformationen

6.3.1.1 Grundlagen der Textilwäsche

Wäscheschmutz lässt sich am besten als „Materie am falschen Ort“ beschreiben, die im Rahmen des Waschprozesses vom Textil wieder entfernt werden soll. Vereinfacht sind beim Waschen 4 Faktoren zu berücksichtigen, die anschaulich im Waschkreis nach Sinner¹ zusammengefasst werden können (Abbildung 6-32).

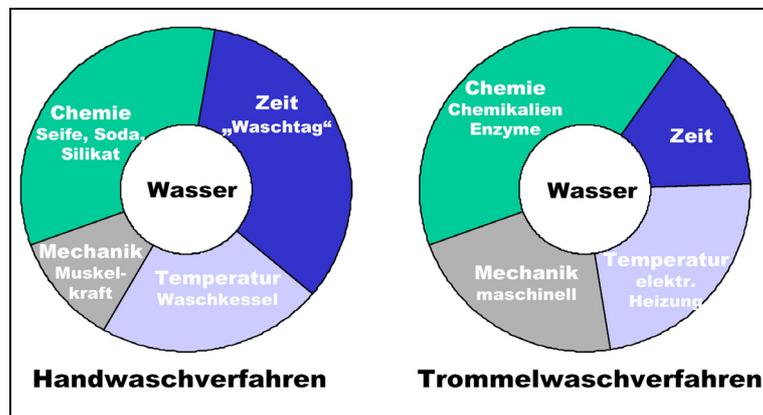


Abbildung 6-32: Waschkreis nach Sinner zur Darstellung der Einflussfaktoren auf den Waschprozess bei der traditionellen Handwäsche und der heutigen Maschinenwäsche (n. Stache u. Großmann, 1985, verändert)

Ursprünglich musste Wäsche von Hand gewaschen werden, wobei dem Wasser verschiedene Waschhilfsmittel (in erster Linie Seife und Lauge) zugesetzt wurden, deren Effektivität durch die Einwirkung höherer Temperaturen verbessert wurde. Der Handwaschprozess war jedoch sehr zeitaufwendig, erforderte den Einsatz von Muskelkraft und war ressourcenintensiv (hoher Wasser- und Energiebedarf).

Der Zeitbedarf für die heutige Wäsche ist vergleichsweise gering, da die meisten Arbeitsschritte maschinell durchgeführt werden. Die verkürzten Einwirkzeiten der Wasch-

¹ Dr. Sinner war Tensid-Chemiker bei Henkel

flotte auf das Waschgut werden durch erhöhte mechanische Einwirkung und optimierte Waschmittel kompensiert.

Der Erfolg des Waschprozesses wird maßgeblich durch die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Waschflotte und die Art der Verschmutzung bestimmt. Wäscheschmutz wird häufig hinsichtlich seiner Wascheigenschaften unterteilt in:

- wasserlöslichen Schmutz (z.B. Salze, Schweiß, Zucker)
- nicht wasserlöslichen Schmutz
- waschbarer Schmutz
- Pigmentschmutz (z.B. Metalloxide, Staub, Erde)
- Fettschmutz (z.B. Hautfett, Speisefette, Mineralöle)
- Eiweißschmutz (z.B. Blut, Ei, Milch, Kakao)
- Kohlenhydratschmutz (z.B. Mehl, Stärke)
- nicht waschbarer = bleichbarer Schmutz (z.B. Obstsäfte, Rotwein, Tee, Kaffee)

In der Praxis hat man es meist mit Mischungen der oben genannten Schmutztypen zu tun. Der Schmutzanteil bei normal verschmutzter Wäsche beträgt 1,8 – 4 % des Wäschegewichts. Nur ein geringer Teil des Schmutzes (20 – 25 %) ist wasserlöslich und könnte grundsätzlich auch ohne Waschmittel von den Textilfasern entfernt werden (Wagner, 1993). Die Elimination des nicht wasserlöslichen Schmutzes erfordert den Einsatz von Waschmitteln. Diese erhöhen die Wasserlöslichkeit des Schmutzes durch physikalisch-chemische Vorgänge und chemische bzw. biochemische Veränderung der Schmutzstoffe. Nicht wasserlöslicher und nicht waschbarer Schmutz soll durch Bleichmittel so verändert werden, dass er im Textil nicht mehr sichtbar ist.

Anfangs waren für die Wäsche mehrere zeitaufwendige Arbeitsgänge für die Entfernung der Verschmutzungen notwendig (Vorbehandlung, Wäsche, Bleiche). Bei der modernen Wäsche werden alle entfernbaren Schmutzstoffe in einem einzigen Waschgang bearbeitet. Gängige moderne Pulverwaschmittel enthalten hierzu im Wesentlichen folgende Wirkstoffgruppen (Lehmann, 1973; Stache u. Großmann, 1985; Smulders, 2002):

- Tenside, die vor allem öl- und fetthaltigen Schmutz lösen (z.B. anionische Tenside wie Seife, LAS, TPS; nichtionische Tenside wie z.B. Alkylpolyglykolether u.a.)
- Wasserenthärter und Gerüststoffe (Builder), die das Wasser weicher machen und die volle Entfaltung der Waschkraft des Waschmittels ermöglichen (z.B. Soda, Natriumsilikate, Tri-Phosphate, Zeolithe)
- Bleichmittel für die Fleckentfernung (z.B. Perborate) sowie Bleich-Aktivatoren (z.B. TAED)
- Waschmittelenzyme zur biokatalytischen Zersetzung ausgewählter Schmutzinhaltsstoffe (z.B. Proteasen, Amylasen, Lipasen, Cellulasen)
- Optische Aufheller (z.B. Stilben-disulfonsäure-Derivate)
- Schaumregulatoren (z.B. Silikonöl)
- Vergrauungs- und Verfärbungsinhibitoren (z.B. Carboxymethyl-Cellulose)
- Duftstoffe
- Korrosionsinhibitoren (z.B. Magnesiumsilikate)
- Stellmittel (z.B. Natriumsulfat)

6.3.1.2 Entwicklung der Zusammensetzung pulverförmiger Vollwaschmittel

Die heute noch sehr weit verbreiteten Pulverwaschmittel wurden erstmals vor rd. 100 Jahren am Markt eingeführt und seitdem beständig weiterentwickelt (Manneck, 1956; Berth, 1970; Lehmann, 1973; Berth et al., 1980; Krings u. Sandkühler, 2003; Smulders, 2002). Bis 1987 dominierten die klassischen pulverförmigen Waschmittel den europäischen Markt. Inzwischen ist ihr Marktanteil auf rd. 66 % zugunsten der sog. „Liquids“ und der Tabletten abgesunken (Krings u. Sandkühler, 2003).

Die Vielfalt und Innovationskraft des Wasch- und Reinigungsmittelsektors verdeutlichen Daten des Umweltbundesamtes: Bis Ende 2000 lagen Mitteilungen über insgesamt etwa 54.000 Wasch- und Reinigungsmittel von rund 4.500 Firmen auf dem deutschen Markt vor. Im Jahr 2000 wurden in Deutschland über 5.600 neue Wasch- und Reinigungsmittel oder neue Zusammensetzungen bestehender Marken in den Verkehr gebracht (UBA, 2003).

Tabelle 6-28 verdeutlicht am Beispiel des Waschmittels Persil den grundlegenden Wandel der Waschmittelrezeptur, die in erster Linie auf technische Weiterentwicklungen, Veränderungen der Rohstoffpreise, veränderte ökologische Anforderungen sowie veränderte Konsumgewohnheiten zurückzuführen sind.

Tabelle 6-28: Entwicklung der Rezeptur von Persil; Zusammensetzung von 1987 typisch für marktführende P-freie Waschmittel um 1990 (Wagner, 1993)

	Massenanteil in %								
	1907	1925	1953	1959	1964	1970	1973	1983	1987
Seife	32,0	44,0	44,0	--	3,5	3,5	3,0	3,0	1,5
Soda	24,0	16,0	12,0	--	--	--	--	--	10,0
Natriumsilicat (Korrosionsinhibitor)	3,0	3,0	7,0	4,5	4,0	3,0	3,0	4,5	3,5
Magnesiumsilicat (Stabilisator)	--	--	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	0,5	--
Natriumperborat-Tetrahydrat	9,0	9,0	6,0	7,0	16,0	27,0	25,0	22,0	20,0
Natriumsulfat (Füllstoff)	--	--	3,5	38,0	4,5	4,0	3,5	4,0	4,5
Natriumdiphosphat	--	--	10,0	23,0	--	--	--	--	--
Pentanatriumphosphat	--	--	--	--	43,0	40,0	39,0	24,0	--
Zeolith A - Sasil	--	--	--	--	--	--	--	18,0	25,0
Tetrapropylbenzolsulfonat - TPS	--	--	--	13,0	--	--	--	--	--
Lineares Alkylbenzolsulfonat - LAS	--	--	--	--	14,0	6,5	6,0	8,0	7,0
Fettalkoholsulfat - FAS	--	--	--	2,0	--	--	--	--	--
Nichtionische Tenside	--	--	--	--	2,5	2,5	3,0	3,0	5,0
Ethylendiamintetraacetat - EDTA	--	--	--	--	--	0,2	0,2	--	--
Phosphonate (Stabilisatoren)	--	--	--	--	--	--	--	0,2	0,2
Optische Aufheller	--	--	+	+	+	+	+	+	+
Cellulosederivate (Vergrauungsinhib.)	--	--	--	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0
Polycarboxylate	--	--	--	--	--	--	--	1,0	4,0
TAED (Bleichaktivator)	--	--	--	--	--	--	--	1,5	2,0
Duftstoffe	--	--	--	--	+	+	+	+	+
Enzyme	--	--	--	--	--	+	--	+	+
Wasser	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest

+ in geringen Mengen enthalten: -- nicht enthalten

Das 1907 als erstes Vollwaschmittel auf den Markt gekommene Persil enthielt neben Seifenpulver als waschaktiver Substanz Natriumperborat als Bleichmittel und Natriumsilicat als Stabilisator und ermöglichte es, den Wasch- und Bleichprozess in einem Arbeitsgang durchzuführen. Erst 1950 setzten größere Veränderungen des Waschprozesses ein: Die maschinelle Wäsche ersetzte die bislang noch weit verbreitete Handwäsche und synthetische Tenside verdrängten die Seife als waschaktive Substanz, die nunmehr nur noch als Schaumregulator bei der Maschinenwäsche dient.

Im wasserarmen Jahr 1959 zeigte sich jedoch ein Nachteil der damals eingesetzten synthetischen Tenside: Insbesondere das damals dominierende Tensid Tetrapropylenbenzolsulfonat (TPS) wurde in den Kläranlagen nur unzureichend abgebaut, sodass auf vielen Gewässern störende Schaumberge auftraten. Das erste deutsche Detergenziengesetz von 1961 trat 1964 in Kraft und bewirkte, dass TPS gegen besser bioabbaubare Tenside wie dem LAS ersetzt wurde. In den sechziger Jahren wurden weitere Rohstoffe der Waschmittelrezeptur hinzugefügt: Nichtionische Tenside mit hohem Fettlösevermögen und Proteasen kamen verstärkt zum Einsatz, doch brach der Enzymeinsatz vorübergehend wieder ein, nachdem enzymhaltige Waschmittelstäube mit gesundheitlichen Problemen in Verbindung gebracht wurden. Durch die Einführung der Enzymprills und vergleichbarer Entwicklungen wurde das Auftreten enzymhaltiger Stäube vermieden, sodass der Ausweitung des Enzymeinsatzes in Waschmitteln keine gesundheitlichen Bedenken mehr im Wege standen.

Anfang der siebziger Jahre trat ein weiteres Umweltproblem auf, zu dem die Waschmittel beitrugen: Die erhöhten Einträge an Pflanzennährstoffen hatten eine Eutrophierung vieler Gewässer bewirkt, die ein störendes Algenwachstum und daraus resultierende Gewässerverschmutzungen ermöglichten. Diese Probleme führte zur Entwicklung phosphatfreier Waschmittel, bei denen die komplexierende Wirkung der Phosphate durch Zeolithe übernommen wird. Eine weitere wichtige Entwicklung war die aktivierte Bleiche, bei der durch den Einsatz des Bleichaktivators TAED ein optimales Bleichergebnis bereits bei 60 °C ermöglicht wird. Da der Energieverbrauch für die Wäsche mit der Temperatur überproportional ansteigt, werden durch die Reduktion der Waschttemperaturen hohe Energieeinsparpotentiale erschlossen.

In den neunziger Jahren wurden die Waschmittelrezepturen weiter verändert: Mit Percarbonaten wurden noch wirksamere Bleichmittel entwickelt. Außerdem wurden neben

Proteasen und Amylasen nunmehr auch Lipasen und Cellulasen in die Waschmittelrezepturen integriert und dadurch z.T. neuartige Wascheigenschaften ermöglicht.

Im Verlauf der Entwicklung der Pulverwaschmittel wurde deren Effektivität laufend verbessert (s. Abbildung 6-33): In den letzten 50 Jahren ist der Bedarf an Waschpulver für einen Waschgang von 409 g im Jahr 1953 auf 109 g gesunken. Durch veränderte Waschmittelherstellungsverfahren wurden zudem Kompakt- und Superkompaktwaschmittel sowie flüssige Universalwaschmittel entwickelt, von denen pro Waschgang noch geringere Mengen dosiert werden müssen.

Neben den Waschmittelrezepturen haben sich in den letzten 50 Jahren auch die Waschmaschinen beständig fortentwickelt. Erste Waschvollautomaten wurden in Deutschland in den 50er Jahren auf den Markt gebracht. Moderne Waschmaschinen sind wesentlich Textil schonender, verbrauchen weniger Wasser, Waschmittel und Energie und sind leiser. Aktuelle Anforderungen an moderne Waschmaschinen sind von der EG (1999) festgelegt worden. Standardisierte Anwendungsprüfungen für Waschmaschinen (und Waschmittel) beschreibt eine aktuelle DIN-Norm (DIN - 60456, 2003).

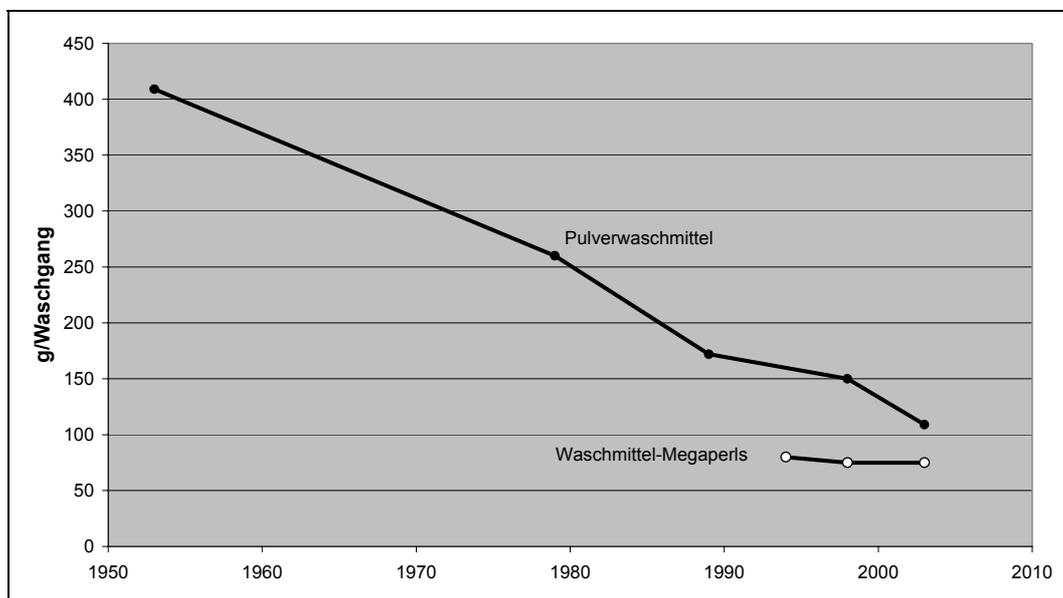


Abbildung 6-33: Veränderung der Waschmitteleinsatzmenge pro Waschgang am Beispiel des Produktes Persil als Pulver bzw. als Megaperls (Daten: Henkel)

6.3.1.3 Bedeutung von Waschmittelenzymen

Ausgehend von der ersten Patentanmeldung von Otto Röhm für enzymhaltige Waschmittel im Jahr 1913 dauerte es noch rund 50 Jahre, bis enzymhaltige Waschmittelformulierungen in Europa einen relevanten Marktanteil von über 10 % erreichten. Der rasante Anstieg enzymhaltiger Waschmittelformulierungen wurde jedoch Anfang der siebziger Jahre unterbrochen, als gesundheitliche Beeinträchtigungen durch den Kontakt mit enzymhaltigen Waschmittelstäuben beobachtet wurden. Veränderte Enzymkonfektionierungen ermöglichten kurze Zeit später jedoch eine nahezu staubfreie Handhabung der Enzympräparate (Spök, 1998; van Eh et al. 1997). Heute sind in über 90 % der in Deutschland vermarkteten Menge an Waschmitteln Enzyme enthalten (Kottwitz u. Upadeck, 1994).

Nach Angaben des Unternehmens Novozymes wurden 2002 weltweit Waschmittel im Wert von 30 Mrd. US-\$ produziert, von denen bereits 66 % Enzyme enthielten. Die Gesamtwert der produzierten Waschmittelenzyme wurde für 2002 auf 614 Mio. US-\$ geschätzt (Abbildung 6-34); die Marktanteile der größten Enzymproduzenten lagen bei 55 % für Novozymes, bei 34 % für Genencor und bei 11 % für sonstige Hersteller (Novozymes, 2002, 2003).

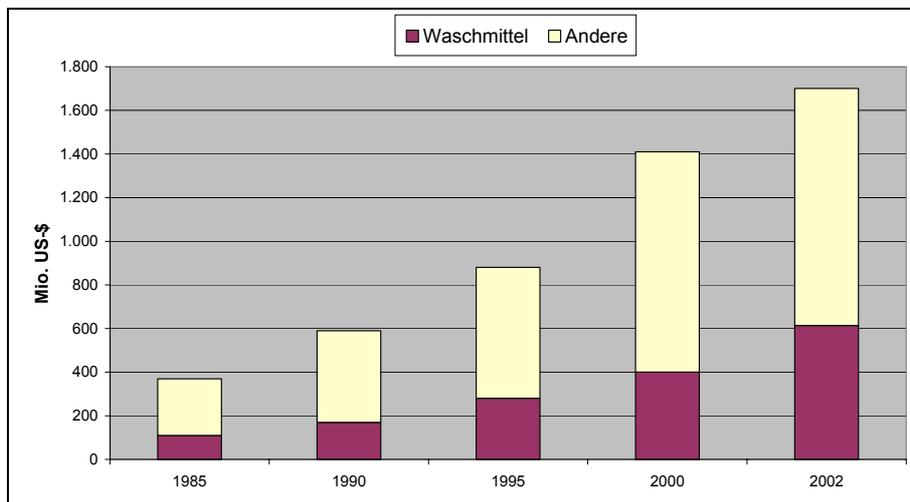


Abbildung 6-34: Marktwert für technisch genutzte Enzyme (Daten: IPTS, 1998; Novozymes, 2003)

Zunächst enthielten Waschmittel nur Proteasen, später folgten Amylasen und Cellulasen. Neuere Waschmittel enthalten inzwischen auch Lipasen. Nach Angaben von Novozymes verteilte sich der Produktionswert für Waschmittelenzyme 2002 zu 69 % auf Proteasen, zu 15 % auf Amylasen und zu 16 % auf sonstige Waschmittelenzyme (van Eh et al.; 1997; Maurer, 1999; Novozymes, 2003).

Bei den bisher in Waschmitteln eingesetzten Enzymen handelt es sich um hydrolytisch wirkende Biokatalysatoren, die jeweils eine bestimmte Stoffgruppe polymerer Substanzen in niedermolekulare Bausteine zerlegen können. Dadurch gelingt es, die meist vorhandenen Mischverschmutzungen zu lockern und von den Textilfasern zu lösen. Zusätzlich wird die Wasserlöslichkeit der Schutzstoffe durch ihre Hydrolyse erhöht, wodurch u.a. die Rekontamination der Textilfasern vermindert wird. Hinsichtlich ihres katalytischen Substratspektrums können Waschmittelenzyme unterschieden werden in:

- Proteasen zur Eiweißspaltung; in > 90 % aller pulverförmigen und flüssigen Waschmittel enthalten
- Amylasen zur Stärkespaltung; in > 90 % aller flüssigen Waschmittel und vielen neueren Pulverwaschmitteln enthalten
- Lipasen zur Fettspaltung; in > 50 % aller pulverförmigen Waschmittel¹
- Cellulasen zur Glättung aufgerauter Baumwollfasern v. a. in Colorwaschmitteln

Die Waschleistung enzymfreier klassischer Waschmittel wurde in der Regel durch hohe Waschttemperaturen begünstigt, da z.B. die vorhandenen chemischen Bleichmittel erst über 50 °C hinreichend aktiv waren. Proteasen, Amylasen und Lipasen ermöglichen im Zusammenspiel mit den restlichen Waschmittelbestandteilen bereits bei niedrigeren Waschttemperaturen Waschleistungen, wie sie ansonsten nur mit der Hochtemperaturwäsche erreicht wurden. Bei optimierten enzymhaltigen Waschmittelrezepturen soll die Waschleistung sogar über die Leistung der Kochwäsche hinaus gehen. Hierzu tragen auch die Cellulasen bei, die bei Baumwolle enthalten Textilien die Textilfasern „glätten“, sodass die Oberflächen weniger schnell verschmutzen und die Farbe

¹ Bemerkenswert ist, dass die derzeit eingesetzten Lipasen ihre optimale Wirkung erst bei reduzierten Wassergehalten entfalten, die z.B. beim Trocknen erreicht werden. Der enzymatisch zersetzte Fettschmutz wird dann erst bei der nächsten Wäsche aus dem Textil entfernt (Aehle, 2004). Derzeit werden Lipasen entwickelt, die bereits bei der ersten Wäsche das gewünschte Waschergebnis gewährleisten.

der Textilien nicht durch Faserspliss abgeschwächt wird (vergl. Abbildung 6-35). Außerdem ermöglichen die enzymhaltigen Waschmittel auch bei temperaturempfindlichen Textilien eine gute Waschleistung.

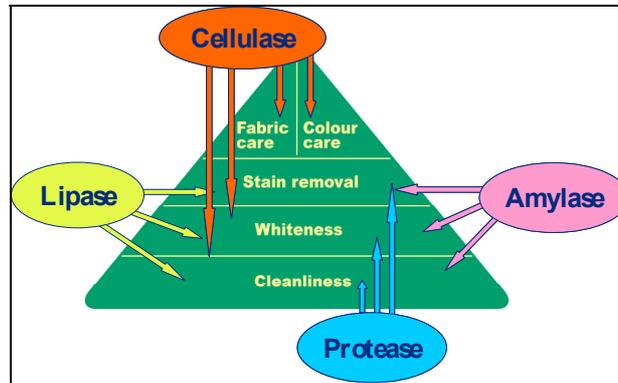


Abbildung 6-35: Wirkungsfelder von Waschmittelenzymen (Novozymes, 2002)

Allerdings hängt der Beitrag der Enzyme zur Waschleistung von zahlreichen Einflussfaktoren (Art des Enzyms, Art und Ausmaß der Verschmutzung, Wascht Temperatur, Rezeptur des Waschmittels, ...) ab. Wie Abbildung 6-36 zeigt, können geringe Dosierungen einer geeigneten Protease die Waschleistung eines Kompaktwaschmittels sehr viel stärker verbessern, als dies durch eine Erhöhung der Waschmitteldosierung der Fall wäre. Wenn auch in deutlich geringerer Ausprägung, wurde dies auch für eine Lipase gezeigt. Der positive Effekt der Enzyme ist darauf zurückzuführen, dass diese nicht einfach nur die vorhandene Reinigungsleistung additiv ergänzen, sondern durch neue Reinigungsmechanismen die Reinigungsleistung vervollkommen.

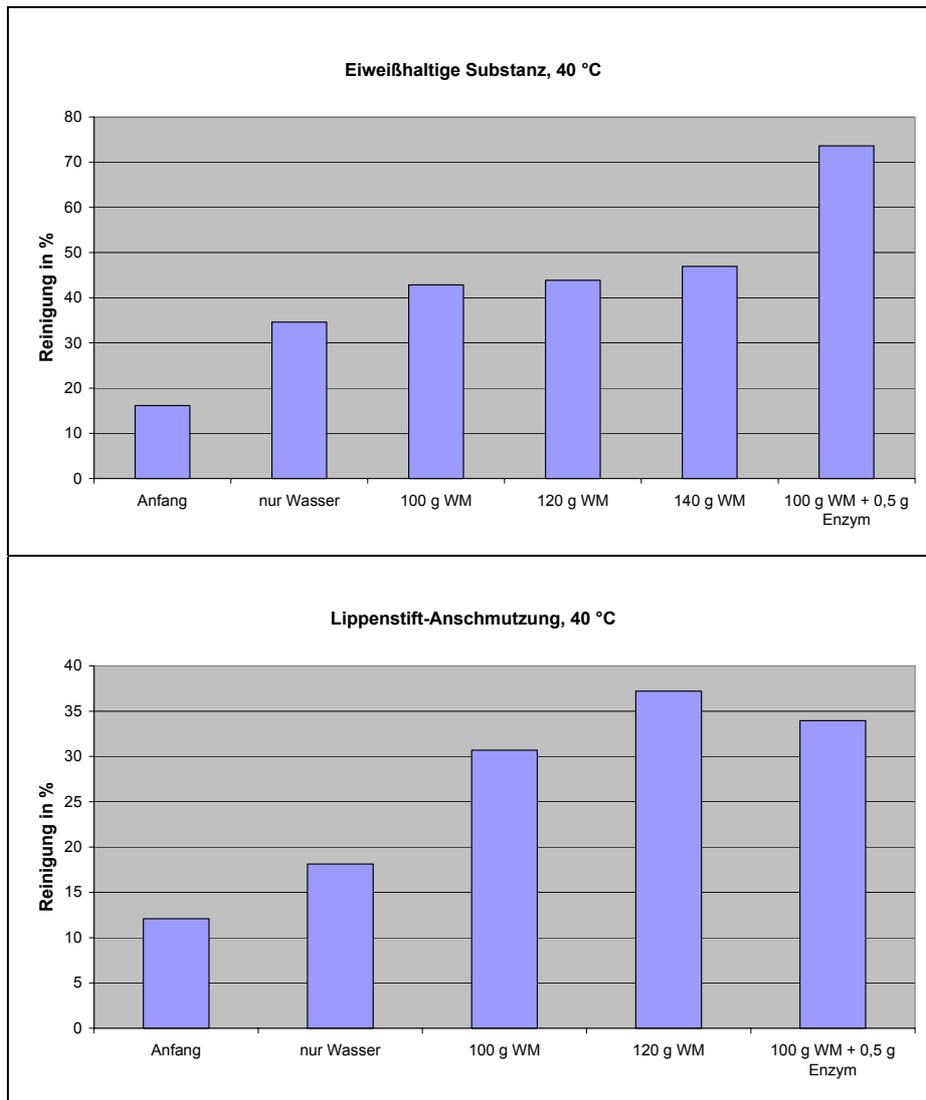


Abbildung 6-36: Beitrag von Enzymen zur Waschleistung (Daten aus Spök, 1998)

Oben: Beitrag einer Protease zur Entfernung proteinhaltiger Verschmutzungen; Originaldaten: Henkel
 Unten: Beitrag einer Lipase zur Entfernung von fetthaltigen Verschmutzungen; Originaldaten: Henkel
 WM = Kompaktwaschmittel

Die positiven Beiträge von Enzymen zur Waschleistung von Waschmitteln erfordern jedoch die Einhaltung für Enzyme günstiger Rahmenbedingungen. So werden Enzyme beispielsweise durch hohe Temperaturen, aggressive Bleichmittel und verschiedene Inhibitoren (darunter z.B. einige Tenside) in ihrer Wirkung stark abgeschwächt, sodass es notwendig wurde, die Waschmittelformulierungen für den Einsatz von Enzymen zu verändern. Aufgrund der veränderten Waschmittelrezepturen ist es heute möglich, mit geringeren Waschmitteldosierungen bei niedrigeren Waschttemperaturen bessere

Waschleistungen zu erreichen, als sie mit klassischen, enzymfreien Vollwaschmitteln bei hohen Waschttemperaturen erreichbar sind. Tabelle 6-30 verdeutlicht die Reduktion der Waschmitteldosierung bei Anwendung eines modernen Waschmittels. Durch die Absenkung der Waschtemperatur lässt sich zudem ein Großteil der Energie für die Wäsche einsparen: Werden für eine 90 °C-Wäsche rd. 1,8 kWh benötigt, sind es bei einer 60 °C-Wäsche nur 1,0 kWh und bei 40 °C sogar nur 0,4 kWh.

Tabelle 6-29: Veränderung des Rohstoffeinsatzes am Beispiel eines Marken-Universalwaschmittels (n. Kottwitz u. Upadeck, 1997; zitiert in: Ast u. Sell, 1998)

Inhaltsstoffe	Anteil pro Waschgang* in g	
	Konventionell 1986	super-kompakt 1996
Tenside	31	15
Builder	79	27
Bleichmittel	51	19
Na-Silicat/Na-Sulfat	23	6
Protease	< 0,1	< 0,1
Lipase	-	< 0,1
Amylase	-	< 0,1
Cellulase	-	< 0,1
Dosierung **	216	76

* bezogen auf die angegebene Dosierung, Enzymangaben bezogen auf Rein-Enzym

** Dosierung für Härtebereich III, normal verschmutzt

Tabelle 6-29 ist zu entnehmen, dass nur sehr geringe Enzymmengen in Waschmitteln vorhanden sind, da sie als Biokatalysatoren beim Zersetzen der Schmutzstoffe erhalten bleiben. Der Enzymanteil am Gesamtaufkommen an Waschmitteln in Deutschland ist deshalb mit 5.500 Mg kleiner als 1 Prozent (UBA, 2003¹). Trotz der geringen Einsatzmengen tragen Enzyme maßgeblich zur Waschleistung moderner Waschmittel bei (Kottwitz u. Udadeck, 1994; Maurer, 1999; Smulders, 2002; Aehle, 2004).

¹ Bei dieser Angabe ist unklar, ob sich die Mengenangabe auf das enzymatische Präparat oder aber die tatsächlich eingesetzte Enzymmenge bezieht. Der Enzymanteil am enzymatischen Präparat wird angegeben mit: Proteasen: 10 %; Amylasen, Lipasen: 5 %; Cellulasen: 2 % (Spök, 1998)

6.3.1.4 Umweltrelevanz der Textilwäsche

Für Wasch- und Reinigungsvorgänge werden in den Privathaushalten nach statistischen Auswertungen neben rd. 730 Mio. Kubikmeter Wasser noch rd. 1,2 Mio. Mg Wasch- und Reinigungsmittel im Marktwert von 3,8 Mrd. Euro verwendet (UBA, 2003; IKW, 2003). Allein für die Textilwäsche wurden rd. 600 Mio. m³ Wasser sowie 0,84 Mio. Mg Waschmittel und Waschlifsmittel genutzt. Trotz der skizzierten Weiterentwicklung der Waschmittel verdeutlichen die in Tabelle 6-30 zusammengestellten Daten, dass auch moderne Waschprozesse aufgrund ihres Stoff- und Energiebedarf weiterhin ein hohes Umweltbelastungspotential haben.

Tabelle 6-30: Näherungswerte für den Stoff- und Energieeinsatz für die Wäsche-
reinigung in deutschen Haushalten

(Annahme: Nutzung moderner Waschmittel und Waschmaschinen)

	Pro Waschgang		Pro Einw. u. Jahr		Deutschlandweit	
Wäsche	4,5	kg	450	kg	36.900.000	Mg
Wasser	54*	L	5,4	m ³	442.800.000	m ³
Waschmittel*****	100*	g	10	kg	820.000	Mg
Energie	0,77*	kWh	77	kWh	6.314.000	MWh
Waschgänge	--	--	100****	--	8.200	Mio.
Abwasser	54	L	5,4	m ³	442.800.000	m ³
Schmutz im Abwasser	230	g	23	kg	1.886.000	Mg
- Waschmittelanteil	100	g	10	kg	820.000	Mg
- Schmutzanteil	130**	g	13	kg	1.066.000	Mg
Spez. Schmutzfracht	4,3***	g/L	--	--	--	--

* Maximalwerte für 4,5 kg normal verschmutzter Wäsche im Standardwaschprogramm "Baumwolle 60 °C" bei einer Wasserhärte von < 2,5 mmol CaCO₃/L (EG, 1999; EG, 2003); ** Literaturdaten: Mittelwert aus Literaturwerten von 80 bis 180 g pro Waschgang; *** Zum Vergleich: Kommunales Rohabwasser ist mit rd. 1,3 g Fremdstoffen pro Liter verunreinigt; **** Abgeschätzt aus Daten zum Waschmitteleinsatz und Waschwasserbedarf deutscher Haushalte; ***** Für den eigentlichen Waschgang werden 8-15 Liter Wasser mit Waschmittelkonzentrationen von 5-10 g/L benötigt (Aehle, 2004)

Die europäische Waschmittelindustrie hat sich in einer freiwilligen Initiative, dem „Code of Good Environmental Practice“, verpflichtet, bezogen auf die Daten von 1996 bis 2001 den Energieverbrauch um 5 % sowie den Verbrauch an Waschmitteln, an Verpackungsmaterialien und an schwer abbaubaren Waschmittelbestandteilen um jeweils 10 % abzusenken (AISE, 2003).

Auswertungen der führenden europäischen Waschmittelhersteller haben gezeigt, dass vor allem die Herstellung der Waschmittelrohstoffe und die Anwendung der Waschmittel umweltrelevant sind (Abbildung 6-37).

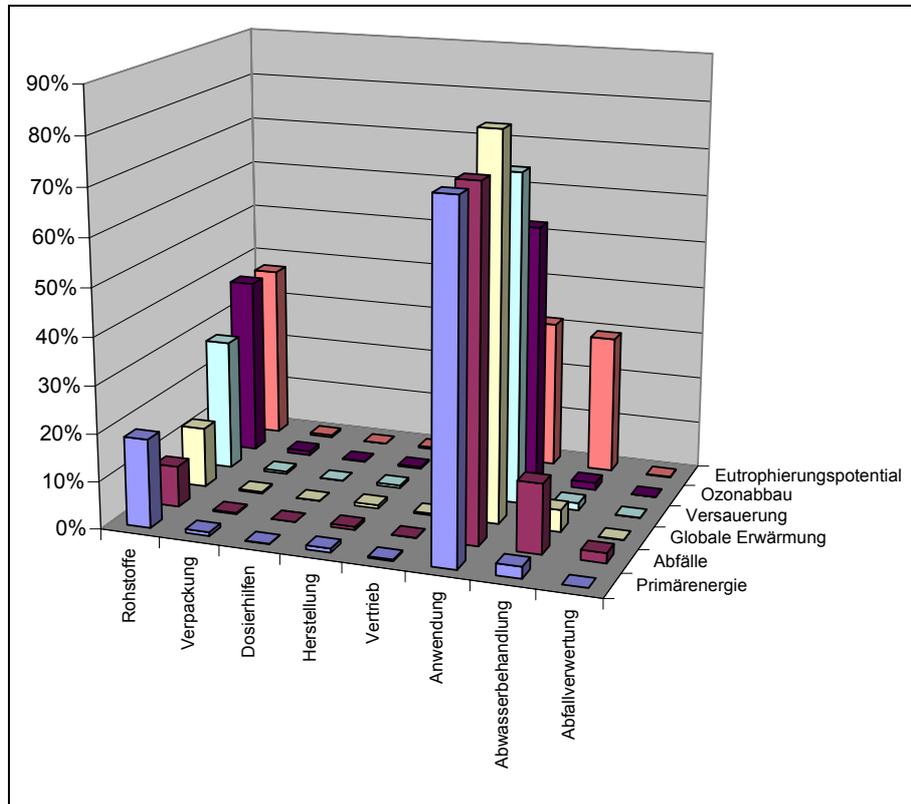


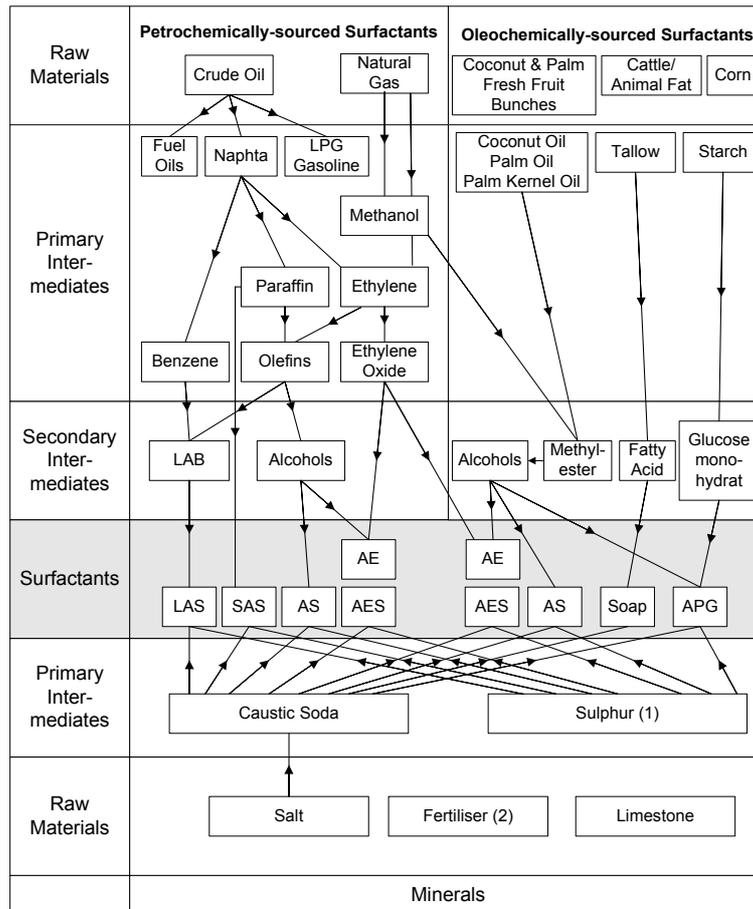
Abbildung 6-37: Anteilige Verteilung der Umweltbelastungen eines Waschganges in Deutschland mit einem Kompaktwaschmittel im Jahr 1998 (Daten: AISE, 2001b)

„Rohstoffe“: Beitrag der Rohstoffgewinnung; „Verpackung“: Beitrag durch die Verpackungsaufwendungen; „Herstellung“ = Beitrag der Waschmittelherstellung; „Anwendung“ = Beitrag durch Waschmittelanwendung

Im Rahmen dieser Studie war vor allem von Interesse, ob sich die Aufwendungen für die Herstellung typischer Waschmittelbestandteile unterscheiden. Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich dabei auf umweltrelevante Aspekte der Herstellung von Tensiden und Waschmittelenzymen.

6.3.1.4.1 Stoff- und Energieeinsatz bei der Herstellung von Waschmitteltensiden

Viele Tenside können sowohl aus fossilen als auch aus biogenen Rohstoffen hergestellt werden. Abbildung 6-38 verdeutlicht dies am Beispiel der wichtigsten in Europa vermarkteten Tenside.



(1) Sulphur is sourced from crude oil, natural gas; (2) Fertiliser (NPK) is used at palm plantations

Abbildung 6-38: Massenflüsse bei der Tensidherstellung (n. Stalmanns et al. 1995)

LAB: Linear Alkyl Benzene; LAS: Linear Alkyl Benzene Sulphonates; SAS: Secondary Alkane Sulphonate; AS: Alcohol Sulphates; AE: Alcohol Ethoxylate; AES: Alcohol Ethoxylate Sulphate; APG: Alkyl Poly Glucoside

Aufschlussreich ist ein Vergleich des Stoff- und Energiebedarfs für die Herstellung wichtiger in Europa eingesetzter Tenside (s. Abbildung 6-39). Diese Daten sind von der „Life Cycle Surfactant Study Group“, an der die europäischen Hersteller von Waschmittelbestandteilen beteiligt sind, erarbeitet und publiziert worden (Stalmanns et al.; 1995).

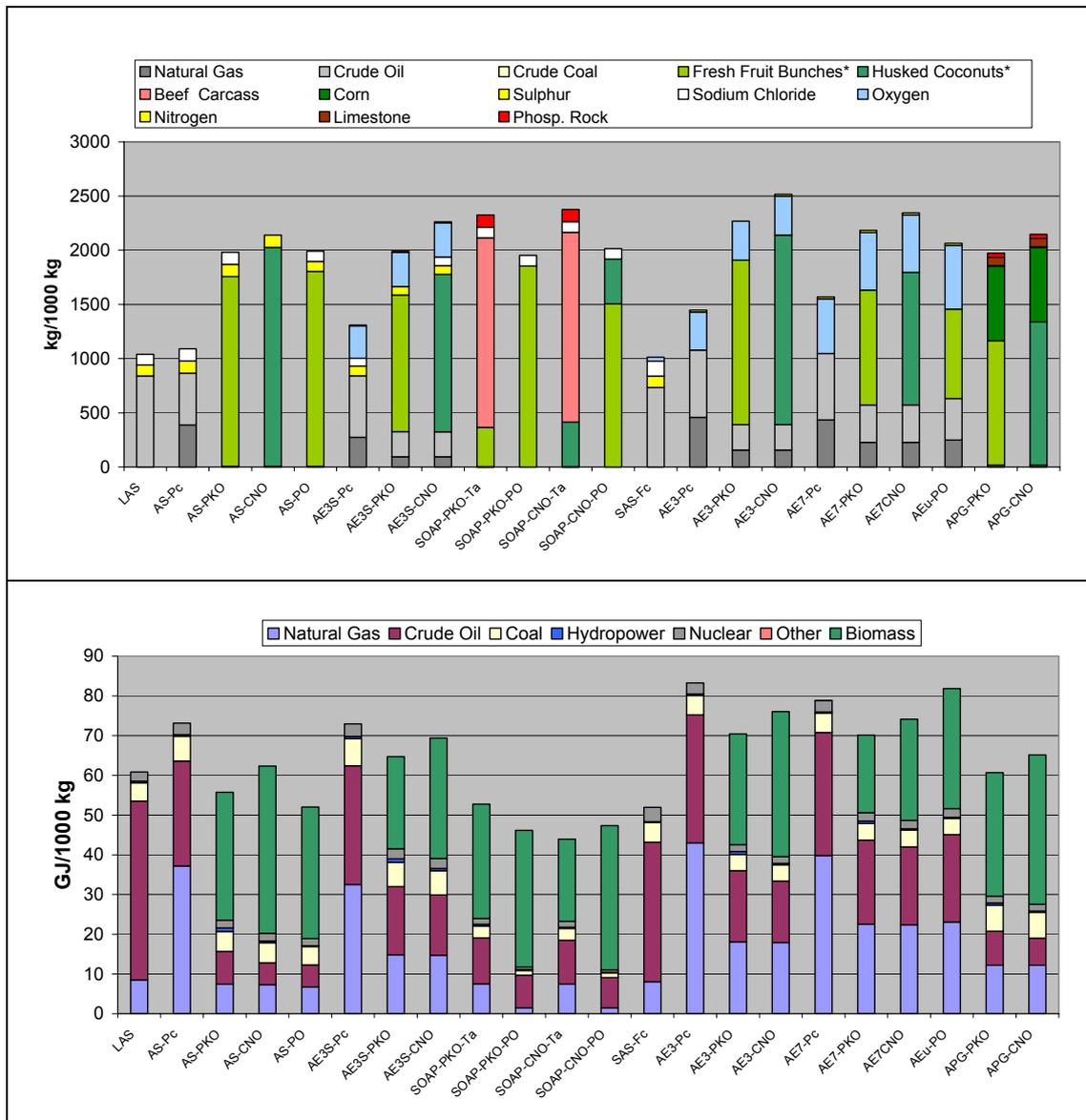


Abbildung 6-39: Vergleich des Rohstoff- (oben) und Energieeinsatzes (unten) für die Herstellung von 1.000 kg des jeweiligen Tensids (Daten: Stalmans et al., 1995)

* Die Massenangaben der biogenen Rohstoffe beziehen sich auf die Feuchtmassen!

LAS: Linear Alkyl Benzene Sulphonates; AS: Alcohol Sulphates; AES: Alcohol Ethoxylate Sulphate; SAS: Secondary Alkane Sulphonate; AE: Alcohol Ethoxylate; APG: Alkyl Poly Glucoside
Pc: Petrochemical; PKO: Palm Kernel Oil; CNO: Coconut Oil; PO: Palm Oil; Ta: Tallow

Abbildung 6-39 zeigt, dass die Einsatzmenge an Stoffen für die Herstellung von 1.000 kg Tensid bei der Nutzung biogener Rohstoffe z.T. deutlich höher ist als beim Einsatz von fossilen Rohstoffen. Anzumerken ist jedoch, dass die Autoren für die Bilanzierung bei den Biomassen die Feuchtmassen verwendet haben, die 20-30 % Wasser enthalten.

ten sollen. Doch auch wenn die Trockenmassen für die Bilanzierung verwendet würden, bliebe die obige Aussage unverändert, da von den erzeugten Biomassen jeweils nur der Öl- bzw. Fettanteil genutzt wird¹.

Außerdem haben die Autoren den für die Tensidproduktion notwendigen Energieeinsatz bilanziert. Hierbei wurden die Energiebeträge für die Prozessführungen, den Transport sowie die Energieinhalte der stofflich genutzten Rohstoffe („feedstock energy“, „Energy of Material Resource“) zusammen ausgewertet. Unter diesen Rahmenbedingungen ist der Energieeinsatz für die Herstellung von Tensiden auf fossiler Rohstoffbasis etwas höher als bei der Nutzung von Biomassen. Größere Unterschiede ergäben sich bei Bilanzierungen, bei denen die notwendigen Einsatzmengen an fossilen Rohstoffen insgesamt bzw. des Energieeinsatzes für die Prozessführungen und Transport ausgewertet würden: In beiden Fällen wäre der Energiebedarf für die Herstellung von Tensiden auf petrochemischer Rohstoffbasis deutlich höher als bei einer Nutzung von biogenen Rohstoffen.

Die obigen rein quantitativen Betrachtungen lassen allein keine eindeutige Priorität für die Wahl einer bestimmten Rohstoffbasis bzw. einer Tensidklasse zu. Würden in die Bewertung zudem noch stoffbezogene Wirkungsbetrachtungen mit einbezogen, ergäben sich äußerst komplexe Datenmatrices, deren Auswertungen eigenständige Ökobilanzen erfordern würden. Entsprechende Datensammlungen sind jedoch für die wichtigsten Waschmittelbestandteile inzwischen veröffentlicht, sodass sie als Basis für die hier interessierenden Fragestellungen herangezogen werden konnten (Grießhammer et al., 1997; Eberle u. Grießhammer, 2001; Spök, 1998).

6.3.1.4.2 Stoff- und Energieeinsatz bei der Herstellung von Waschmittelenzymen

Während umweltrelevante Daten für die Herstellung von Waschmitteltensiden öffentlich zugänglich sind, wurden bislang nur relativ wenige umweltrelevante Daten zur Herstellung und Anwendung von Waschmittelenzymen publiziert (Klüppel, 1993; Upadeck u. Kottwitz, 1996; Bahn u. Intemann, 1997; Schmidt, u. Henriksen, 1997). Spök (1998) wies darauf hin, dass die Produktion von Waschmittelenzymen verglichen mit anderen Waschmittelinhaltstoffen als sehr energieintensiv eingestuft werden muss. Abbildung

¹ Weitere Festlegungen mit Einfluss auf die Bilanzdaten waren: Die Kohlenstoffassimilation der Pflanzen blieb unberücksichtigt. Außerdem wurde der für Energiegewinnung benötigte Sauerstoff nicht bilanziert.

6-40 zeigt hierzu Ergebnisse von Ökobilanzen bei der Herstellung einer Protease: Obwohl insbesondere durch gentechnische Optimierungen Ressourcen- und Energieeinsparungen (vergl. Generation 4 und 1) erreicht wurden, liegen die Ressourcennutzung und der Energieeinsatz bei der Herstellung der Protease auf einem relativ hohen Niveau (vergl. Aufwendungen für die Tensidproduktion in Abbildung 6-39).

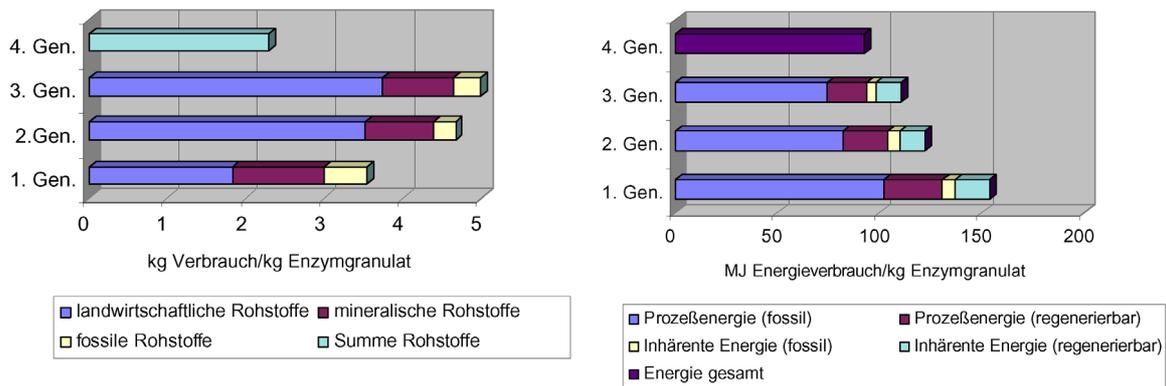


Abbildung 6-40: Ressourcennutzung und Energieeinsatz für die Herstellung von Proteasegranulaten sowie Änderung dieser Parameter während der Prozessentwicklung (1. – 4. Generation); nach Daten von Cognis; zitiert aus Spök (1998)

Der hohe Ressourcen- und Energiebedarf für die Herstellung von Waschmittelenzymgranulaten wird anhand von Abbildung 6-40 deutlich. Waschmittelenzyme werden mithilfe unterschiedlicher Mikroorganismen hergestellt. Für die Fermentation der Hochleistungsstämme ist eine aseptische Kulturführung notwendig. Während der Fermentation fallen in der Kulturbrühe die gewünschten Enzyme in Konzentrationen von > 15 Gramm/Liter an (Schmidt, 2003), die in nachfolgenden Reinigungsschritten aufkonzentriert und aufgereinigt werden müssen (s. Abbildung 6-41).

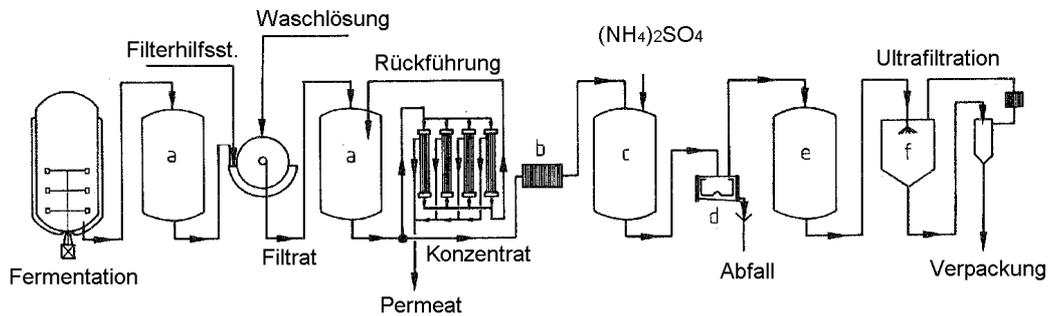


Abbildung 6-41: Aufarbeitung für extrazelluläres Enzym (Jacobi et al., 1987)

Durch Optimierungen der Produktionsstämme und der Prozesstechnik sollen die Ausbeuten der Enzymproduktion in den letzten 20 Jahren jedoch im Durchschnitt um 10 % im Jahr angestiegen sein, sodass die herstellungsbedingten Umweltbelastungen - bezogen auf eine vergleichbare Enzymaktivität – stark reduziert werden konnten.

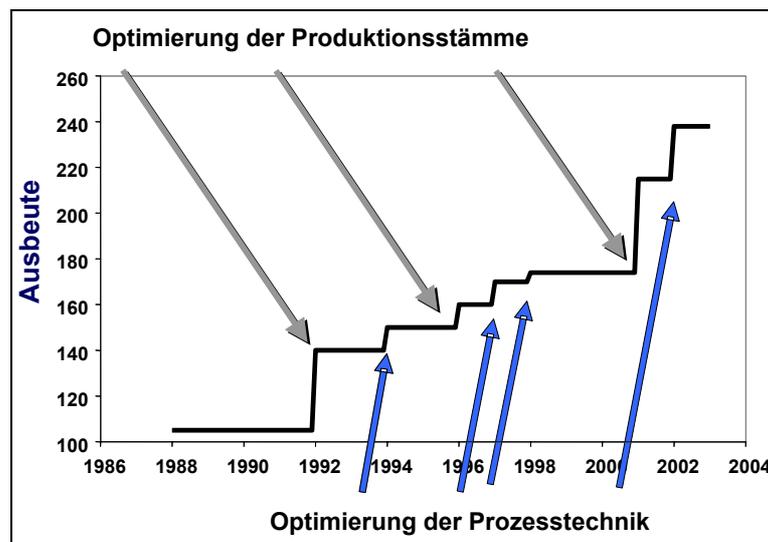


Abbildung 6-42: Optimierung der Ausbeute bei der Enzymproduktion (Novozymes, 2003)

Powell et al. (2001) wiesen zudem darauf hin, dass es durch die Nutzung der gerichteten Evolution z.B. gelungen ist, die spezifische Aktivität von der Protease Subtilisin E um das 470fache zu steigern. Außerdem wurde das Temperaturoptimum dieses Enzyms erweitert und die mittlere Lebensdauer bei 65 °C um Faktor 200 verlängert.

6.3.2 Aufgabenstellung

Waschmittelenzyme machen einen Anteil von weniger als 1 % an der Waschmittelmasse aus; ihr Anteil an den Waschmittelkosten wird von Novozymes (2002) mit 8 % angegeben, sodass Waschmittelenzyme vergleichsweise teure Waschmittelbestandteile sind. Trotz ihrer Kostennachteile sind Enzyme heute fester Bestandteil der marktführenden Waschmittel, da ihr Einsatz z.T. Einsparungen anderer Waschmittelbestandteile ermöglicht (s. Abbildung 6-36). Vor allem aber tragen sie Wascheigenschaften zur Rezeptur bei, die auf andere Weise nicht erreichbar wären (z.B. Faserglättung durch Cellulasen).

Literaturauswertungen zeigten, dass die Herstellung von Waschmittelenzymen im Vergleich zu anderen Waschmittelbestandteilen ursprünglich sehr ressourcenintensiv war (s. 6.3.1.4.1 u. 6.3.1.4.2). Optimierungen der Produktionsstämme, des Produktionsprozesses und der Enzymeigenschaften haben die auf eine spezifische Enzymaktivität bezogenen Stoff- und Energieaufwendungen der Enzymproduktion inzwischen stark reduziert, doch sind die veröffentlichten Daten zum Stoff- und Energieeinsatz der Enzymproduktion im Vergleich zu anderen Waschmittelbestandteilen noch immer relativ hoch.

Auf Basis der zu Projektbeginn vorliegenden Informationen wurde deshalb ein Untersuchungsansatz formuliert, bei dem die Umweltbelastungen durch die Herstellung und Anwendung je eines enzymfreien und eines enzymhaltigen Waschmittels miteinander verglichen werden sollten. Dabei sollte geprüft werden, ob die Nutzung moderner Waschmittelenzyme eine Reduktion der mit dem Waschprozess verbundenen Umweltbelastungen ermöglicht: Der hohe Stoff- und Energieaufwand der Enzymproduktion könnte durch einen hohen Beitrag der Enzyme zur Waschleistung überkompensiert werden, sodass sich für enzymhaltige Waschmittel in der Gesamtbilanz reduzierte Stoff- und Energieaufwendungen ergeben könnten (vgl. z.B. EUROPABIO, 2002).

Weitergehende Recherchen und Rücksprachen mit verschiedenen Waschmittelherstellern zeigten, dass ein derartiger Produktvergleich im Rahmen dieser Studie nicht durchführbar gewesen wäre. Obwohl in den letzten Jahren umfangreiche Sammlungen von Ökobilanzdaten über Waschmittel veröffentlicht wurden (Stalmanns et al., 1995; Franke et al., 1995; AISE, 2001a-d; Saouter et al., 2001, 2002; Saouter u. van Hoof, 2002), sind Daten zu aktuellen Waschmitteln nicht frei verfügbar, sondern allenfalls den

Waschmittelherstellern bekannt. Aus Wettbewerbsgründen werden Rezepturen zu aktuellen Waschmitteln und nähere Angaben zum Herstellungsprozess im Detail nicht veröffentlicht.

Zugänglich ist jedoch die Rezeptur des Referenzwaschmittels CLC A, das in der DIN 60456 (2003) beschrieben ist und das für die Prüfung der Waschleistung von Waschmaschinen entwickelt wurde. Bei dem aktuellen Referenzwaschmittel handelt es sich um ein enzymhaltiges Produkt, das das bisherige enzymhaltige Referenzwaschmittel A ersetzt. Für beide Waschmittel ist nach DIN 60456 beim 60 °C-Waschprogramm für Baumwolle eine Vergleichbarkeit der Waschleistungen gegeben. Das Referenzwaschmittel A hat wiederum das enzymfreie und phosphathaltige Referenzwaschmittel B ersetzt, das einen Waschmitteltyp repräsentiert, der bis Anfang der 80iger Jahre auf dem deutschen Markt gewesen ist. Mit den Referenzwaschmitteln CLC A und B waren somit zwei funktionsanaloge Waschmittelrezepturen zugänglich, da mit beiden Waschmitteln mindestens die Waschleistung des Referenzwaschmittels B erreicht werden kann.

Die Rezepturen der beiden Waschmittel sind in Tabelle 6-31 aufgeführt. Das phosphathaltige Waschmittel B enthält weder Enzyme noch Bleichaktivatoren, sodass für dieses Waschmittel bei hohen Waschttemperaturen die maximale Waschleistung erreicht wird. Das aktuelle Referenzwaschmittel CLC A ist dagegen phosphatfrei, es enthält eine Protease sowie Bleichaktivatoren, sodass bereits bei einer 60 °C-Wäsche Waschleistungen möglich sind, die mit Referenzwaschmittel B erst bei 90 °C erzielt würden.

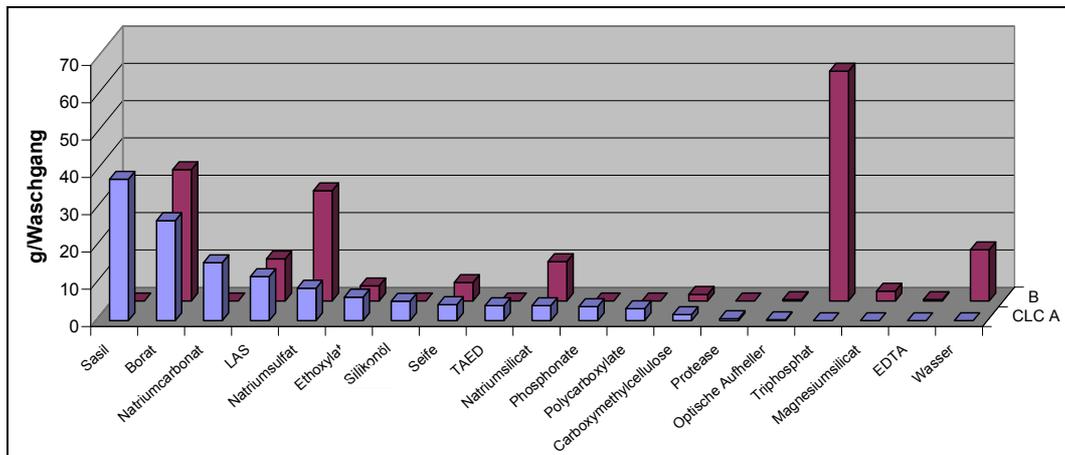


Abbildung 6-43: Mengen an Waschmittelbestandteilen pro Waschgang für die Referenzwaschmittel CLC A und B

Die Rezepturunterschiede verdeutlichen – wie auch Tabelle 6-28 – die zeitliche Entwicklung der Waschmittelzusammensetzung: Das Referenzwaschmittel B repräsentiert einen Waschmitteltyp, der in Deutschland bis Anfang der 80er Jahre eingesetzt worden ist. In der Folgezeit mussten die Waschmittel auf Phosphat-freie Rezepturen umgestellt werden. Waschmittelposphate gehören zur Gruppe der Gerüstsubstanzen (Buildern), die die Wasserenthärtung gewährleisten und die Tensidwirkung komplettieren und unterstützen (Stache u. Großmann, 1985). Die Phosphatersatzstoffe (z.B. Zeolith A) deckten nur einen Teil der Waschwirkung der Phosphate ab, sodass die Waschmittelformulierung durch weitere Hilfsstoffe (wie Natriumcarbonat, Polycarboxylate, u.a.) ergänzt wurden (s. Abbildung 6-43).

Neben der Umstellung der Gerüstsubstanzen wurde noch das Bleichsystem optimiert, sodass bereits bei niedrigeren Temperaturen (50 – 60 °C) die erwünschte Bleichwirkung erzielt werden kann. Niedrige Waschttemperaturen sowie ergänzende Anpassungen der Waschmittelformulierung ermöglichten die zusätzliche Nutzung von Waschmittelenzymen, wobei zunächst nur Proteasen zum Einsatz kamen.

Das Referenzwaschmittel CLC A repräsentiert ein entsprechendes Waschmittel, dessen Rezeptur die oben skizzierten Weiterentwicklungen integriert. Die Gesamtwaschleistung des Waschmittels wird erst durch die Kombination der einzelnen Waschmittelbestandteile erreicht. Synergieeffekte verhindern es, den Beitrag zum Wascherfolg für

einen einzelnen Waschmittelbestandteil (z.B. der Protease) zu benennen, wenn praktisch üblich verschmutzte Wäsche mit Mischverschmutzungen gereinigt wird.

Den angefragten Waschmittelherstellern war es deshalb nicht möglich, je eine enzymhaltige bzw. -freie Waschmittelrezeptur mit möglichst ähnlicher Zusammensetzung zu benennen.

Deshalb wurde der Untersuchungsansatz dieser Studie den gegebenen Möglichkeiten angepasst. Für den Produktvergleich wurden die Referenzwaschmittel CLC A und B herangezogen, wobei die Rezepturunterschiede insgesamt den grundlegenden Wandel der Waschmittelzusammensetzung von Anfang der 80er zu Anfang der 90er Jahre repräsentieren. Zu diesem Wandel der Waschmittelrezepturen haben Waschmittelenzyme beigetragen. Durch die Umstellung der Waschmittelrezepturen können die Waschmittelmengen zur Erzielung von Waschleistungen, wie sie mit dem Referenzwaschmittel B erreicht werden, deutlich reduziert werden.

Abbildung 6-44 verdeutlicht jedoch, dass die Waschmitteleinsparungen bei der Nutzung des Referenzwaschmittels CLC A auf eine Reduktion der mineralischen Waschmittelbestandteile zurückzuführen sind. Dagegen werden beim moderneren Waschmittel um 56 % höhere Mengen an organischen Waschmittelbestandteilen pro Waschgang eingesetzt. Insofern war unklar, welchen Einfluss die Rezepturveränderungen der Waschmittel auf die Abwasserbelastung haben würden.

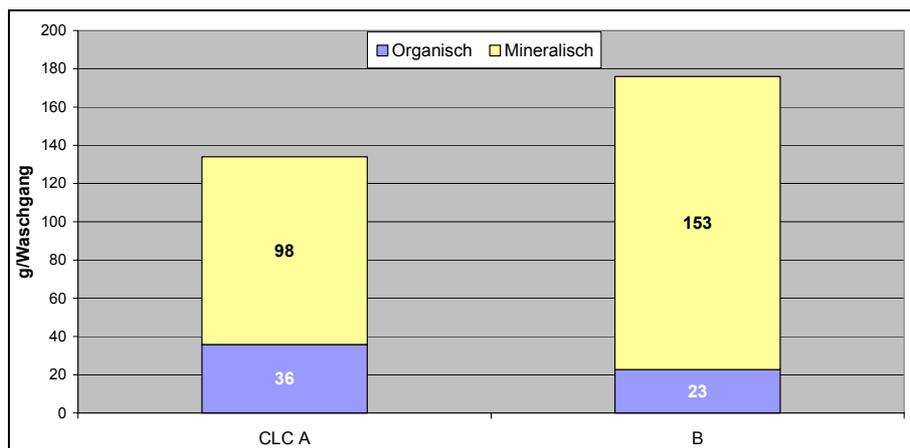


Abbildung 6-44: Einsatz organischer und mineralischer Waschmittelbestandteile pro Waschgang für die Referenzwaschmittel CLC A und B

Bei den bis zu Projektbeginn veröffentlichten Ökobilanzen zu Waschmitteln waren die Einflüsse von Rezepturunterschieden auf die Abwasserzusammensetzung unberücksichtigt geblieben (Grießhammer et al., 1997). Außerdem wurden bei diesen Untersuchungen die Beiträge der Enzymherstellung bei den Aufwendungen für die Waschmittelproduktion nicht ausgewertet. Aktuelle Ökobilanzen haben entsprechende Einflüsse berücksichtigt, doch wurden bei diesen Untersuchungen keine Pulverwaschmittel sondern Kompaktwaschmittel untersucht (Saouter et al., 2001, 2002).

Im Rahmen der vorliegenden Studie musste der Produktvergleich der beiden Pulverwaschmittel CLC A und B zudem auf eine definierte Waschsituation beschränkt werden, die in der nachfolgenden Szenarienbeschreibung definiert wurde.

6.3.3 Verfahrensbeschreibung und Vorstellung der Szenarien

Für den Produktvergleich wurden - aus den oben beschriebenen Gründen - zwei Szenarien definiert, in denen je ein Waschvorgang mit einem enzymfreien (traditionellen) und einem enzymhaltigen (modernen) Waschmittel modelliert wurden. Dafür wurden Referenzwaschmittel nach DIN 60456 herangezogen, die sich zwar in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften unterscheiden, jedoch in beiden Szenarien mindestens die mit dem enzymfreien Waschmittel erzielbare Waschleistung erreichen, sodass ein Produktvergleich möglich war.

Das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL repräsentiert Waschmittel, die Phosphate, aber keine Enzyme enthalten. Die Rezeptur im Szenario MODERNES WASCHMITTEL zeichnet sich durch die Substitution der Phosphate durch Zeolithe aus und enthält darüber hinaus Enzyme. Aufgrund der unterschiedlichen Inhaltsstoffe und der speziellen Wirkungen der Enzyme waren eine unterschiedliche Dosierung der Waschmittel beim Waschprozess und ein anderes Temperaturprogramm notwendig. Darüber hinaus ergaben sich aus den abweichenden Inhaltsstoffen auch unterschiedliche Belastungen des Abwassers. Diese Unterschiede in der Anwendung der Waschmittel und in den sich aufgrund der Waschmittelinhaltsstoffe ergebenden Abwasserbelastungen begründeten die Notwendigkeit, sowohl den Waschprozess als auch die Waschwasserreinigung innerhalb der Systemgrenzen zu bilanzieren.

Abbildung 6-45 zeigt schematisch die Teilsysteme des Bilanzierungsmodells, das für beide Szenarien identisch ist. Der Aufbau des Umberto-Modells ermöglichte die Aus-

wertung der Ergebnisse differenziert nach der Waschmittelherstellung sowie dem Waschprozess und der Waschwasserreinigung. Die Teilsysteme sind im Abschnitt 6.3.6 beschrieben.

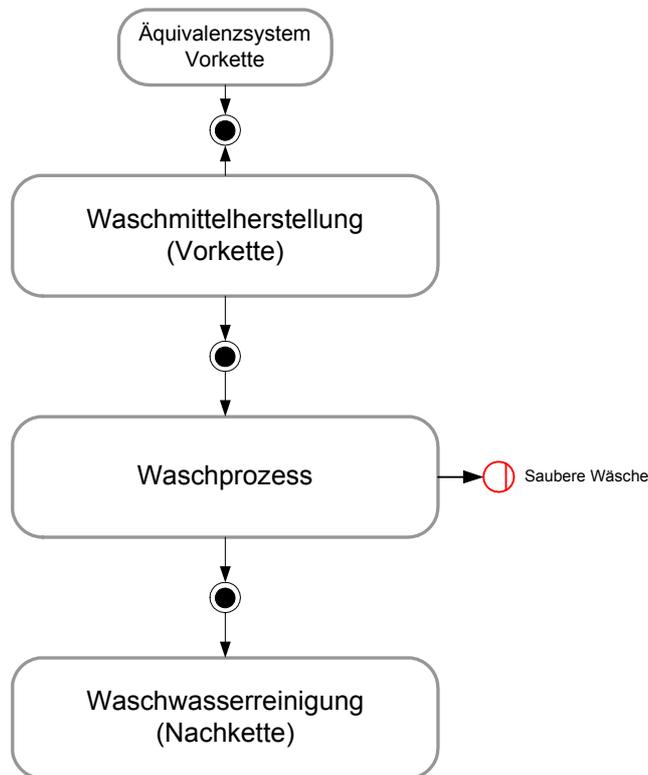


Abbildung 6-45: Teilsysteme der Bilanzierungsmodelle für die Szenarien TRADITIONELLES WASCHMITTEL und MODERNES WASCHMITTEL

6.3.4 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wurde **ein Waschgang** betrachtet. Die Füllmenge an Schmutzwäsche betrug 5 kg Weißwäsche aus Baumwolle. Aufgrund der unterschiedlichen Inhaltsstoffe der Waschmittel, ob mit Enzymen oder ohne Enzyme, wichen die Waschmitteldosierung und das Temperaturprogramm bei beiden Szenarien voneinander ab. Davon abhängig war wiederum der Wasserbedarf und der Energieverbrauch während des Waschprozesses.

Wie zu Beginn von 6.3.3 bereits erläutert, wurde davon ausgegangen, dass eine funktionelle Äquivalenz der betrachteten Szenarien in der gleichen Waschleistung besteht.

6.3.5 Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze

Im Abschnitt 4 sind die übergreifenden, auf alle Modelle zutreffenden Systemgrenzen und Annahmen, Detailgrenzen vor- und nachgelagerter Prozesse sowie die Vorgehensweise bei der Behebung von Datenlücken und Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen beschrieben. Im Folgenden werden die wichtigsten spezifischen Anmerkungen zur Systemgrenze dieses Produktvergleichs zusammengefasst.

Die Systemgrenze umfasst bei beiden Szenarien

- den Herstellungsprozess der zu vergleichenden Waschmittel,
- den Waschprozess sowie
- die Waschwasserreinigung.

Der Waschprozess und die Waschwasserreinigung wurden entgegen anderen Studien mitbetrachtet, da die zu vergleichenden Waschmittel aufgrund ihrer unterschiedlichen Inhaltsstoffe verschiedene Waschprogramme bedingen und zu abweichenden Abwasserzusammensetzungen führen.

Datenlücken und Annahmen

Aufgrund fehlender Daten konnten die Herstellungsprozesse einiger Ausgangsstoffe nicht modelliert werden. Dazu gehören

- Phosphonat
- Schäumungsdämpfungskonzentrat

Diese Prozesse sind in den Vorketten als leere Module enthalten und tragen nur mit ihren Transporten zu den Ergebnissen bei.

Alle anderen bei der Modellierung der Herstellungsprozesse der Waschmittel aufgetretenen Datenlücken konnten durch Annahmen geschlossen werden, die im Anhang (Datenherkunft und -qualität) beschrieben sind.

Geografischer und zeitlicher Bezug

Der betrachtete geografische Bezugsraum wurde mit den politischen Grenzen der Bundesrepublik Deutschland gleichgesetzt. Allerdings finden die Bereitstellung einzelner (Roh-)Stoffe nicht immer bzw. nicht ausschließlich in Deutschland statt. Der Bezugsraum für Rohstoffdaten ist meistens Westeuropa. Es wurde versucht, den Bezugs-

raum dann an die jeweiligen Länder anzupassen. War dies nicht möglich, wurde auch der Bezugsraum Deutschland gewählt.

Beim zeitlichen Bezug wurde die jeweils aktuellsten, im Bearbeitungszeitraum verfügbaren Daten verwendet, die über eigene Recherchen bzw. Datenbankauswertungen ermittelt wurden. Details zur Datenherkunft sind im Anhang dokumentiert.

6.3.6 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle

Die Bilanzierungsmodelle wurden in Teilsysteme unterteilt (vgl. Abbildung 6-45), was eine differenziertere Auswertung der Ergebnisse möglich machte. In diesem Abschnitt werden die Teilsysteme grafisch vorgestellt sowie bei Bedarf näher beschrieben.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Abbildungen wurden:

- Basismodule für die Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie, Bereitstellung von Energieträgern, Bereitstellung von Hilfsstoffen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung sowie
- In- und Outputströme an Roh- und Betriebsstoffen, Ausgangsstoffen unterhalb der Abschneidekriterien, Energieströme, Emissionen, Abfälle und Abwasser

nur dann dargestellt, wenn sie für das Verständnis erforderlich waren. Vollständige Bilanzierungsmodelle mit allen Teilsystemen und Basismodulen sind im Anhang dargestellt.

Die in den Abbildungen verwendeten grafischen Elemente sind in Tabelle 4-1 erläutert, die Module bzgl. Datenherkunft, Literaturquellen, Bezugsjahr, Repräsentativität, Kurzbeschreibungen, Annahmen und Vorketten sowie die Transporte bzgl. Entfernung, Auslastung, Nutzlast und Fahrbahnanteile im Anhang (Datenherkunft und -qualität sowie Überblick Transporte) dokumentiert.

6.3.6.1 Waschmittelherstellung (Vorkette)

Die Waschmittelherstellung kann in vier Bereiche untergliedert werden:

- Herstellung der Waschmittel-Rohstoffe einschließlich notwendiger Transporte,
- Waschmittelherstellung, d.h. die Mischung der Rohstoffe entsprechend der Zusammensetzung,
- Konfektionierung, d.h. Trocknung, Mahlung und Verpackung der Waschmittel
- Distribution der Waschmittel.

In Abbildung 6-46 und Abbildung 6-47 sind die Module und Transporte im Teilsystem *Waschmittelherstellung* sowie die Verknüpfungen untereinander dargestellt.

Die Zusammensetzungen der modellierten Waschmittel sind in Tabelle 6-31 angegeben. Die aufgeführten Massenanteile stellen Referenzrezepturen nach DIN EN 60456 dar und entsprechen damit keinen realen Waschmittelzusammensetzungen. Vielmehr sollte mit den Referenzrezepturen ein Durchschnitt der verschiedenen, sich auf dem Markt befindlichen, Waschmittel abgebildet werden.

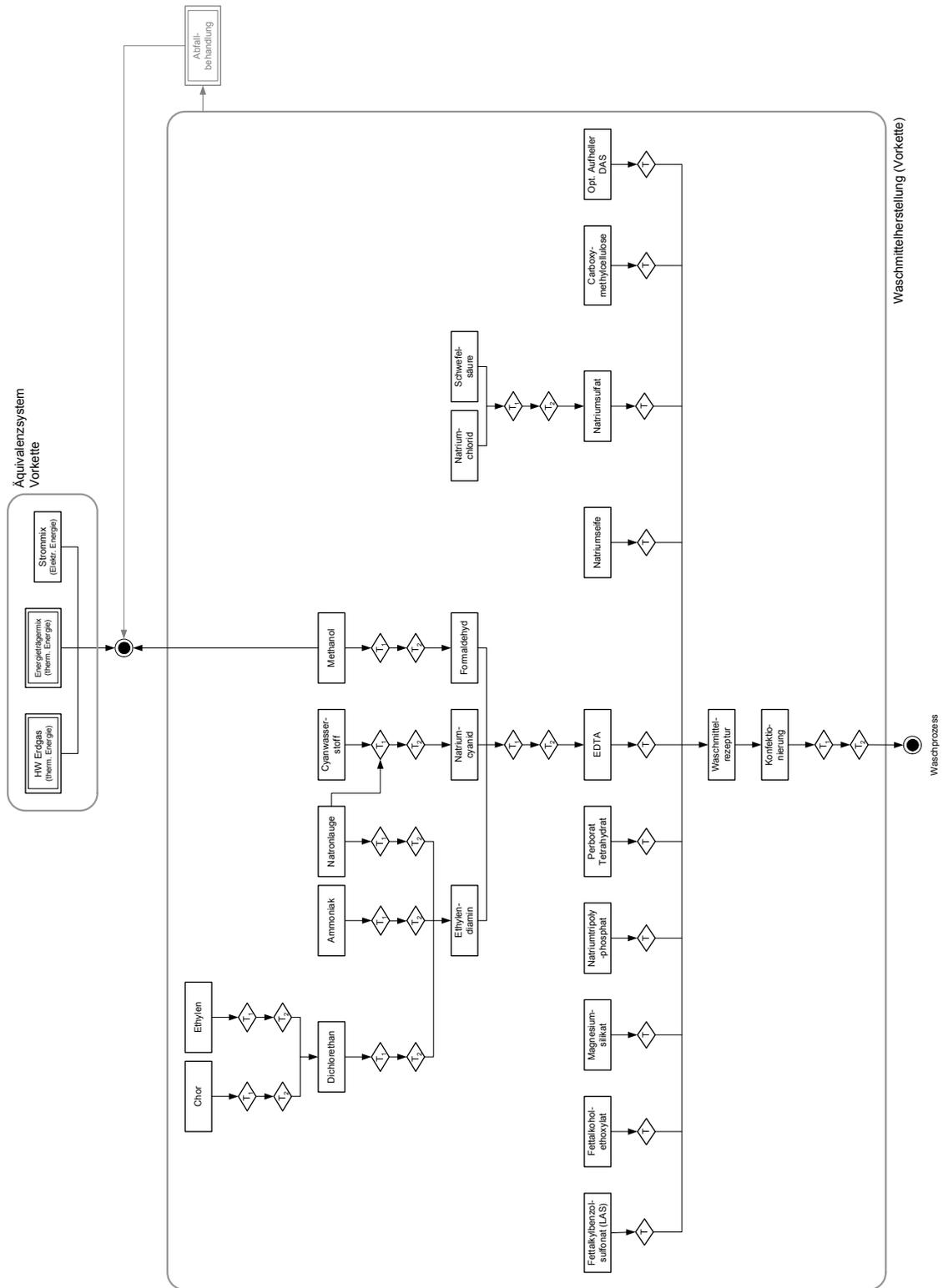


Abbildung 6-46: Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL - Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Waschmittelherstellung* inklusive des vorgelagerten Äquivalenzmodells

Tabelle 6-31: Waschmittelzusammensetzung für die untersuchten Szenarien [DIN EN 60456]

	Massenanteil in %	
	Modernes Waschmittel Referenzwaschmittel CLC A nach EN 60456	Traditionelles Waschmittel Referenzwaschmittel B nach EN 60456, Anhang E
<i>Tenside</i>		
Seife	3,2	2,8
Lineares Alkylbenzolsulfonat - LAS	8,8	6,4
Fettalkoholethoxylat***	4,7	2,3
<i>Bleichaktivator</i>		
Tetra-Azethyl-Ethylen-diamin (TA-ED, Bleichaktivator)*	3,0	-
<i>Bleichmittel</i>		
Natriumperborat-Tetrahydrat	20,0	20,0
<i>Gerüststoffe und Enthärter</i>		
Zeolith A - Sasil	28,3	
Natriumsilicat (Korrosionsinhibitor)	3,0	6,0
Phosphonate (Stabilisatoren, DE-QUEST 2066, 25 % aktive Säure)**	2,8	-
Natriumsalz eines Copolymers von Acryl- und Maleinsäure (Granulat) (Polycarboxylate)	2,4	-
Pentatriumphosphat	-	35,0
<i>Alkaliträger</i>		
Natriumcarbonat	11,6	-
<i>Vergrauungsinhibitoren</i>		
Carboxymethylcellulose	1,2	1,0
<i>Enzyme</i>		
Protease (Savinase)	0,4	-
<i>Korrosionsinhibitoren</i>		
Magnesiumsilicat (Stabilisator)*	-	1,5
<i>Sonstige</i>		
Natriumsulfat (Füllstoff)	6,5	16,8
Ethylendiamintetraacetat (EDTA)	-	0,2
Optische Aufheller	0,2	0,2
Schaumdämpfungskonzentrat (12 % Silikon auf anorg. Träger)**	3,9	-
Wasser	-	7,8

* mit Natriumschichtsilikat angenähert, * Acetanhydrid durch Essigsäure angenähert; ** Stoffe ohne Vor-
kette; *** Marktmix: 50 % aus petrochemischer Herstellung und 50 % aus nachwachsenden Rohstoffen

6.3.6.2 Waschprozess

Abbildung 6-48 zeigt eine schematische Darstellung des Bilanzierungsmodells des *Waschprozesses*, das für beide Szenarien identisch ist.

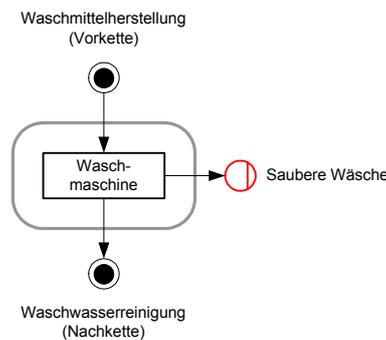


Abbildung 6-48: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Waschprozess*

In Abbildung 6-49 und Abbildung 6-50 sind die wichtigsten Ausgangsdaten (Stoff- und Energieflüsse) für den Waschprozess dargestellt. Es wurde in beiden Szenarien von der Befüllung einer durchschnittlichen zeitgemäßen Waschmaschine mit 5 kg Schmutzwäsche ausgegangen. Die Dosierungsmengen für die Waschmittel sind der DIN EN 60456 entnommen bzw. nach dort beschriebenen Rechenvorschriften berechnet worden. Darüber hinaus war für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL bei gleicher Waschleistung eine höhere Temperatur beim Waschvorgang nötig, da keine Enzyme enthalten sind. Dies bedingte einen höheren Energieverbrauch. Der Wasserbedarf und die Menge an Abwasser war in beiden Szenarien gleich groß, wogegen die Abwasserbelastung aufgrund verschiedener Inhaltsstoffe der Waschmittel unterschiedlich war. So enthielt das traditionelle Waschmittel 35 % Phosphat, welches ins Abwasser gelangte.

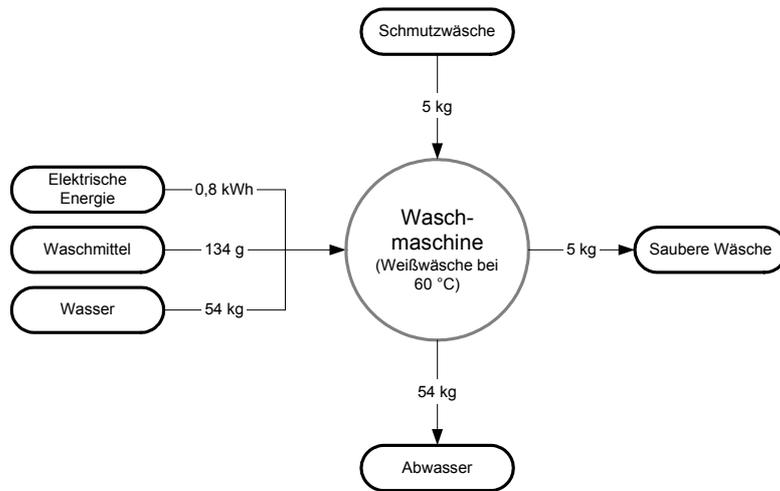


Abbildung 6-49: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den Waschprozess des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL

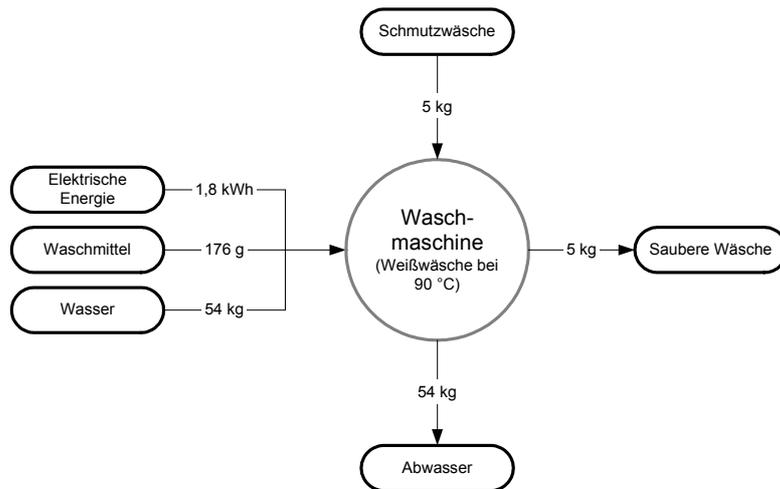


Abbildung 6-50: : In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den Waschprozess des Szenarios TRADITIONELLES WASCHMITTEL

6.3.6.3 Waschwasserreinigung (Nachkette)

Die Abwasserparameter wurden aus Literaturdaten berechnet bzw. anhand eigener Abschätzungen ermittelt. Dafür wurden die bereits ermittelten Rezepturen des modernen und traditionellen Waschmittels und die aus DIN 60456 abgeleitete Waschmitteldosierung zugrunde gelegt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den betrachteten

Waschmitteln ist das Phosphat im traditionellen Waschmittel. Für die Berechnung der Phosphatmenge im Abwasser des traditionellen Waschmittels wurde davon ausgegangen, dass die gesamten 61,6 g an Pentanatriumtriphosphat (35 % von 176 g dosierter Waschmittelmenge) ins Abwasser gelangen. Dies entspricht einer Menge an Phosphor als P von 15,6 g. Auf 54 L Abwasser umgerechnet ergibt sich eine Phosphorkonzentration von 288 mg/L.

In Tabelle 6-32 und Tabelle 6-33 sind die Daten für die Berechnung des BSB und CSB für die Waschmittel zusammengefasst. Die zweite Spalte der Tabellen enthält die Zusammensetzungen der Waschmittel in Gramm bezogen auf die Dosierung für einen Waschgang, der Grundlage für die Berechnung. Die zitierten BSB und CSB Werte in den Spalten drei und vier gehen auf AISE (2001b) zurück. Durch Multiplikation dieser Werte mit dem tatsächlichen Anteil der Substanz im Waschmittel sind die einzelnen CSB- und BSB-Werte berechnet worden, die im letzten Schritt aufsummiert wurden.

Tabelle 6-32: Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL - Berechnung des BSB und CSB

	Anteil am Waschmittel [g]	BSB [kg O ₂ /kg]	CSB [kg O ₂ /kg]	BSB [g O ₂]	CSB [g O ₂]
Lineares Alkylbenzolsulfonat (LAS)	11,3	0,92	2,3	10,36	25,91
Seife	4,9	1,4	2,9	6,90	14,29
Fettalkoholethoxylat (AE)	4,1	1,5	2,6	6,07	10,52
Natriumsilicat (Korrosionsinhibitor)	13,2				
Natriumperborat-Tetrahydrat	35,2				
Natriumsulfat (Füllstoff)	29,6				
Optische Aufheller (DAS)	0,4				
Phosphate	61,6				
Carboxymethylcellulose	1,8				
Ethylendiamintetraessigsäure (ED-TA)	0,4				
Wasser	13,7				
Summe pro dosiertes Waschmittel	176			23,33	50,72

Tabelle 6-33: Szenario MODERNES WASCHMITTEL - Berechnung des BSB und CSB

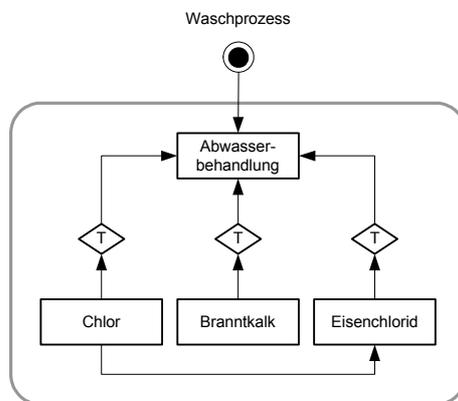
	Anteil am Waschmittel [g]	BSB [kg O ₂ /kg]	CSB [kg O ₂ /kg]	BSB [g O ₂]	CSB [g O ₂]
Lineares Alkylbenzolsulfonat (LAS)	11,8	0,92	2,3	10,85	27,12
Seife	4,3	1,4	2,9	6,00	12,44
Fettalkoholethoxylat (AE)	6,3	1,5	2,6	9,47	16,38
Zeolith A - Sasil	37,9				
Natriumsilicat (Korrosionsinhibitor)	4,0				
Natriumperborat-Tetrahydrat	26,8				
Natriumcarbonat	15,5				
Polycarboxylate	3,2	0	0,1	0	0,32
Protease (Savinase)	0,5	0,7	2	0,38	1,07
Natriumsulfat (Füllstoff)	8,7				
Optische Aufheller (DAS)	0,3				
Schaumdämpfungskonzentrat	5,2				
Phosphonat	3,8				
Tetra-Azetyl-Ethylen-Diamin (TAED)	4,0				
Carboxymethylcellulose	1,6				
Summen pro dosiertes Waschmittel	134			26,67	57,33

Wie oben dargelegt, ist bei der Berechnung des BSB und CSB nicht nur der Beitrag aus dem Waschmittel zu berücksichtigen, sondern auch der Beitrag von Stoffen aus der Schmutzwäsche, wie z.B. Fette/Öle, Pigmente, gerbstoffhaltiger Schmutz, Proteine und Kohlenhydrate. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Schmutzwäsche einen ähnlichen Teil am CSB und BSB beiträgt, wie die Waschmittel. Daher wurde ein, aus den BSB- und CSB-Werten der Waschmittel, gebildeter Durchschnittswert zu den jeweiligen BSB und CSB-Werten addiert. In Tabelle 6-34 sind die so berechneten Abwasserparameter im Einlauf der Kläranlage aufgelistet.

Tabelle 6-34: Abwasserparameter im Einlauf der Kläranlage

	Einheit	MODERNES WASCHMITTEL	TRADITIONELLES WASCHMITTEL	Abbauraten
Abwassermenge	L	54	54	
BSB aus Waschmittel	mg/L	494	432	
CSB aus Waschmittel	mg/L	1062	939	
BSB aus Schmutzwäsche	mg/L	463	463	
CSB aus Schmutzwäsche	mg/L	1000	1000	
BSB gesamt	mg/L	957	895	99,6 %
CSB gesamt	mg/L	2062	1939	95,3 %
Phosphat	mg/L	-	288	89 %

Das im Waschprozess anfallende Abwasser wurde in einer kommunalen Kläranlage mit weitergehender Abwasserreinigung behandelt. Die spezifischen Abbauraten sind in Tabelle 6-34 aufgelistet. In Abbildung 6-51 ist das Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Waschwasserreinigung* abgebildet, das für beide Szenarien identisch ist.

Abbildung 6-51: Bilanzierungsmodell für das Teilsystem *Waschwasserreinigung*

6.3.6.4 Äquivalenzsysteme

In Tabelle 6-35 sind die Zusatznutzen aus den beiden Szenarien sowie die dadurch substituierten Energien aus Primärrohstoffen zusammengefasst. Die konventionellen Herstellungsprozesse zu den aufgeführten Zusatznutzen sind im Anhang (Datenherkunft und -qualität) dokumentiert.

Tabelle 6-35: Mit der Modellierung verbundene bilanzierte Zusatznutzen

Zusatznutzen aus beiden Szenarien	Substituiertes Material oder Energie aus Primärrohstoffen	Substitutionsfaktor
Energiegutschrift aus der Methanolherstellung ¹⁾	Thermische Energie aus einem Heizwerk Erdgas	1,0
Elektrische und thermische Energie aus der Abfallbehandlung ¹⁾	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschland, thermische Energie aus dem Fernwärmemix Deutschland und als Prozessenergie	1,0

¹⁾ Äquivalenzsystem Vorkette (Teilsystem Waschmittelherstellung)

6.3.7 Vergleich der Bilanzierungsergebnisse

6.3.7.1 Inputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle inputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 6-36 neben dem Wasserbedarf die Stoff- und Energieeinsätze zusammengefasst, die für die Auswertung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten inputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Die Werte der Tabelle zeigen, dass beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL der Aufwand an KEA fossil (Energie aus fossilen Energieträgern) um fast die Hälfte sowie an KEA Kernkraft (Kernenergie) über die Hälfte niedriger ist als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL. Zurückzuführen ist dies auf den höheren Bedarf an elektrischer Energie für den Waschprozess im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL aufgrund des heißeren Temperaturprogramms.

Die Beanspruchung fossiler Rohstoffe unterstreicht das Ergebnis für den Energiebedarf. Im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL werden mehr als doppelt so viel Steinkohle und Braunkohle benötigt als im Szenario MODERNES WASCHMITTEL. Für Erdgas und Erdöl ist der Bedarf im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL dagegen nur geringfügig größer.

Tabelle 6-36: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte inputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	MODERNES WASCHMITTEL	TRADITIONELLES WASCHMITTEL
<i>Kumulierter Energieaufwand</i>			
KEA fossil	MJ	7,8	14
KEA regenerativ	MJ	0,34	0,46
KEA Kernkraft	MJ	3,5	7,8
KEA Wasserkraft	MJ	0,05	0,09
KEA sonstige	MJ	1,8	3,0
<i>Fossile Energieträger</i>			
Erdöl	kg	0,03	0,05
Erdgas	kg	0,06	0,07
Steinkohle	kg	0,09	0,21
Braunkohle	kg	0,29	0,63
<i>Mineralische Rohstoffe</i>			
Bauxit	g	29,0	0,1
Kalkstein	g	25	103
Natriumchlorid	g	16	55
Rohphosphat	g	0,002	144
Schwefel	g	2,7	6,1
Steinsalz	g	13	83
<i>Wasserbedarf</i>			
Kühlwasser	kg	193	427
Wasser (Kesselspeise)	kg	48	107
Wasser (Prozess)	kg	1,0	2,2
Wasser, unspezifisch	kg	55	54
<i>Naturraum</i>			
Fläche K7	m ²	3,78e ⁻⁷	4,9e ⁻⁷

Die Beanspruchung mineralischer Ressourcen zeigt, dass für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL zum Teil deutlich mehr Kalkstein, Natriumchlorid, Rohphosphat, Schwefel und Steinsalz benötigt wird. Der Unterschied ist besonders bei Rohphosphat stark ausgeprägt, was auf den Einsatz von Phosphaten in Waschmitteln zurückzuführen ist. Für moderne Waschmittel trifft dies nicht zu. Im Szenario MODERNES WASCHMITTEL ist der Bedarf an Bauxit deutlich höher, was auf die Herstellung von Zeolith zurückzuführen ist. Zeolithe werden als Ersatz für die früher eingesetzten Phosphate eingesetzt.

Aus der Zusammenfassung des Wasserbedarfs ist zu sehen, dass das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL mehr als doppelt so viel Kühlwasser und Kesselspeisewasser benötigt. Der Bedarf an unspezifischem Wasser ist so gut wie ausschließlich auf den Wasserbedarf der Waschmaschine zurückzuführen und ist daher bei beiden Szenarien fast identisch.

Im folgenden Abschnitt wird näher auf den Energiebedarf (KEA gesamt) eingegangen. Es sind die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend wurden die signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnisse wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

6.3.7.2 KEA gesamt

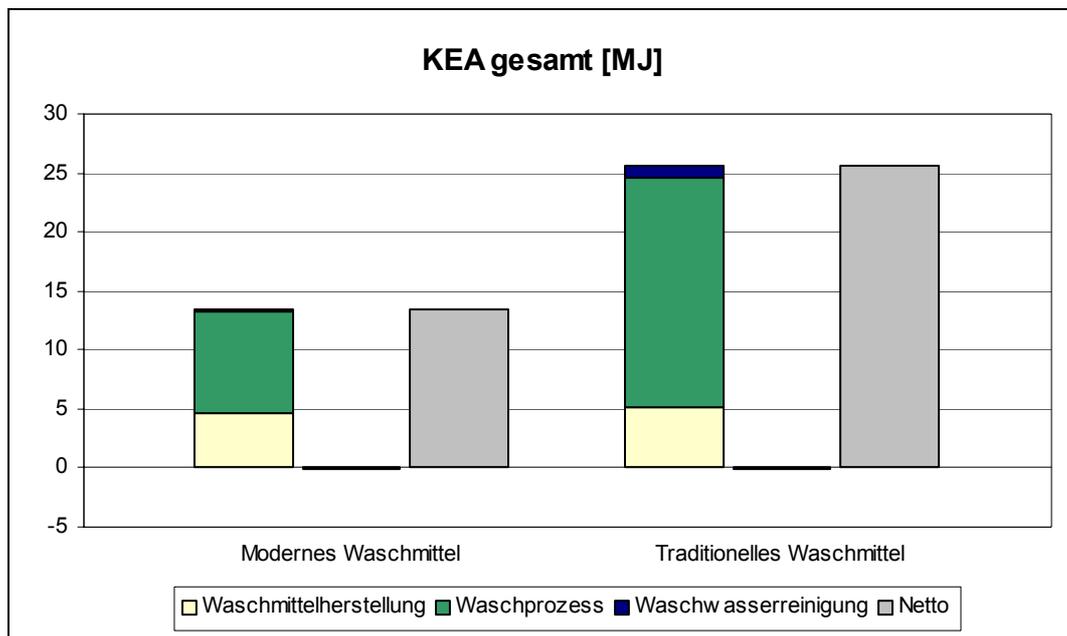


Abbildung 6-52: KEA gesamt - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-52 zeigt, dass der Energieverbrauch im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL etwa doppelt so hoch ist als im Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse werden zum größten Teil durch den Bedarf an elektrischer Energie für den Waschprozess bestimmt, der zugleich den Unterschied der Szenarien ausmacht. Dieser ist beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL aufgrund des heißeren Temperaturprogramms etwa doppelt so hoch wie beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

Der Energiebedarf für die Waschmittelherstellung ist dagegen bei beiden Szenarien vergleichbar, auch wenn die Anteile am KEA gesamt mit 34 % beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL und 20 % beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL unterschiedlich sind. Im Szenario MODERNES WASCHMITTEL wird die Energie hauptsächlich für die Herstellung von Zeolith A, TAED und Fettalkylbenzolsulphonat benötigt. Im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL ist die meiste Energie für die Herstellung von Natriumtripolyphosphat aufzubringen.

Der Einfluss der Waschwasserreinigung auf die Brutto-Ergebnisse ist bei beiden Szenarien gering. Während beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL 2 % auf dieses Teilsystem entfallen, sind es beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL 4 %.

Tabelle 6-37: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des KEA gesamt

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario MODERNES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	8,6 MJ	64 %
Zeolith A ²⁾	1,02 MJ	8 %
TAED (Tetra-Azethyl-Ethylen-Diamin) ²⁾	0,79 MJ	6 %
Fettalkylbenzolsulphonat ²⁾	0,71 MJ	5 %
<i>Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	19,4 MJ	76 %
Natriumtripolyphosphat ³⁾	1,94 MJ	8 %

¹⁾ Teilsystem Waschprozess

²⁾ Teilsystem Waschmittelherstellung

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 6-52).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf einen KEA gesamt von

- 13,4 MJ für das Szenario MODERNES WASCHMITTEL und
- 25,5 MJ für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Bei beiden Szenarien ist zu beachten, dass der KEA gesamt hauptsächlich durch die Bereitstellung elektrischer Energie für den Waschprozess über den so genannten Strommix Deutschland bestimmt wird. Dieser repräsentiert im Prinzip rund 33 % Atomkraft und 67 % fossile Energieträger. Dies spiegelt sich in der Zusammensetzung des KEA gesamt wieder, in der der KEA fossil und der KEA Kernkraft die vorherrschenden Sachbilanzparameter sind (vgl. Tabelle 6-36).

Fazit: Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist der Energiebedarf beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL ca. 91 % höher als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

6.3.7.3 Outputseitige Sachbilanzparameter und Wirkungskategorien

Stellvertretend für alle outputseitigen Sachbilanzparameter sind in Tabelle 6-38 neben dem Abfall- und Abwasseraufkommen die Luft- und Wasseremissionen zusammengefasst, die für die Auswertung der UBA-Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Ozonbildung sowie Humantoxikologie und Ökotoxikologie notwendig sind. Alle in der Tabelle nicht aufgeführten outputseitigen Sachbilanzparameter können den kompletten Stoff- und Energiebilanzen (Sachbilanzen) im Anhang entnommen werden.

Tabelle 6-38: Auf die funktionelle Einheit bezogene Netto-Ergebnisse für ausgewählte outputseitige Sachbilanzparameter

	Einheit	MODERNES WASCHMITTEL	TRADITIONELLES WASCHMITTEL
<i>Emissionen in die Luft</i>			
Ammoniak	mg	23	46
Benzo(a)pyren	mg	0,00006	0,0001
Benzol	mg	0,88	1,5
Blei	mg	0,03	0,07
Cadmium	mg	0,008	0,02
Chlorwasserstoff	mg	30	57
Dieselpartikel	mg	7,7	13
Distickstoffmonoxid	mg	11	19
Fluorwasserstoff	mg	3,1	6,1
Formaldehyd	mg	2,2	4,0
Kohlendioxid, fossil und unspezifisch	mg	700.085	1.496.753
Kohlenmonoxid	mg	371	982
Methan	mg	1.799	3.107
NMVOG	mg	254	413
NOx	mg	1.297	2.484
PAH	mg	0,01	0,02
Perfluorethan	µg	0,000011	0,000011
Perfluormethan	µg	0,03	0,001
Schwefeldioxid	mg	1.495	3.383
Schwefelwasserstoff	mg	0,13	0,16
Staub	mg	778	797
VOC	mg	570	724
<i>Emissionen ins Wasser</i>			
Ammonium	mg	11,9	20
AOX	mg	2,08	2,66
Blei	mg	0,38	0,6
Chlorid	mg	4.395	47.469
Chrom	mg	0,201	0,205
CSB	mg	5.408	5.089
Fluorid	mg	27,1	4.446
Kohlenwasserstoffe, halog.	µg	0,0001	0,0002
Kohlenwasserstoffe, sonst.	mg	1,34	1,37
Nitrat	mg	60,9	12,2
P als P2O5	mg	0,23	0,1

	Einheit	MODERNES WASCHMITTEL	TRADITIONELLES WASCHMITTEL
PAH	µg	0,000016	0,00003
Phosphat	mg	2,1	2,8
Phosphorverb. als P	mg	0,0016	1.711
Stickstoffverb. als N	mg	117	72.8
Stickstoffverb., unspezifisch	mg	74,5	230
Sulfid	mg	12	36
Zink	mg	0,12	3,25
Zinn	µg	0,035	0,078
<i>Abfallmenge</i>			
Abfälle zur Beseitigung	kg	0,0038	1,28
Abfälle zur Verwertung	kg	0,28	0,3
Abfälle ohne Zuordnung	g	0,0393	-0,0028
Abraum	kg	2,49	5,5
<i>Abwassermenge</i>			
Abwasser (Kesselschlammung)	kg	48,2	107
Abwasser (Kühlwasser)	kg	71,1	155
Abwasser (Prozess)	kg	0,7	1,87
Abwasser geklärt	kg	53,8	53,8
Abwasser sonstige	kg	0,27	2,99
Abwasser (Waschwasser)	kg	54,2	54,2
Wasserdampf	kg	122	271

Negative Werte: „Einsparung“ durch die Verrechnung von Gutschriften

Die Werte der Tabelle zeigen, dass das Szenario MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario MODERNES WASCHMITTEL für fast alle aufgeführten Luftparameter geringere Emissionen aufweist. Lediglich für Perfluorethan ist der Emissionswert höher, wobei aber die Mehremissionen mit + 0,03 % sehr gering ausfällt.

Bezogen auf den Stoffeintrag ins Wasser ist die Abweichung der Ergebnisse voneinander etwas größer. Auch hier weist das Szenario MODERNES WASCHMITTEL meist die niedrigeren Emissionswerte auf. Von den aufgeführten Wasserparametern sind nur für vier höher, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die oben genannten Wirkungskategorien eingegangen. Es sind die Bruttobeiträge der Teilsysteme, die Gutschriften sowie die daraus folgenden Netto-Ergebnisse dargestellt und anschließend hinsichtlich signifi-

kanter Unterschiede zwischen den Szenarien diskutiert. Die Anteile der einzelnen Sachbilanzparameter an den Gutschriften sowie Brutto- und Netto-Ergebnissen wurden im Anhang (Daten zur Wirkungsabschätzung) tabellarisch zusammengefasst.

6.3.7.4 Treibhauseffekt

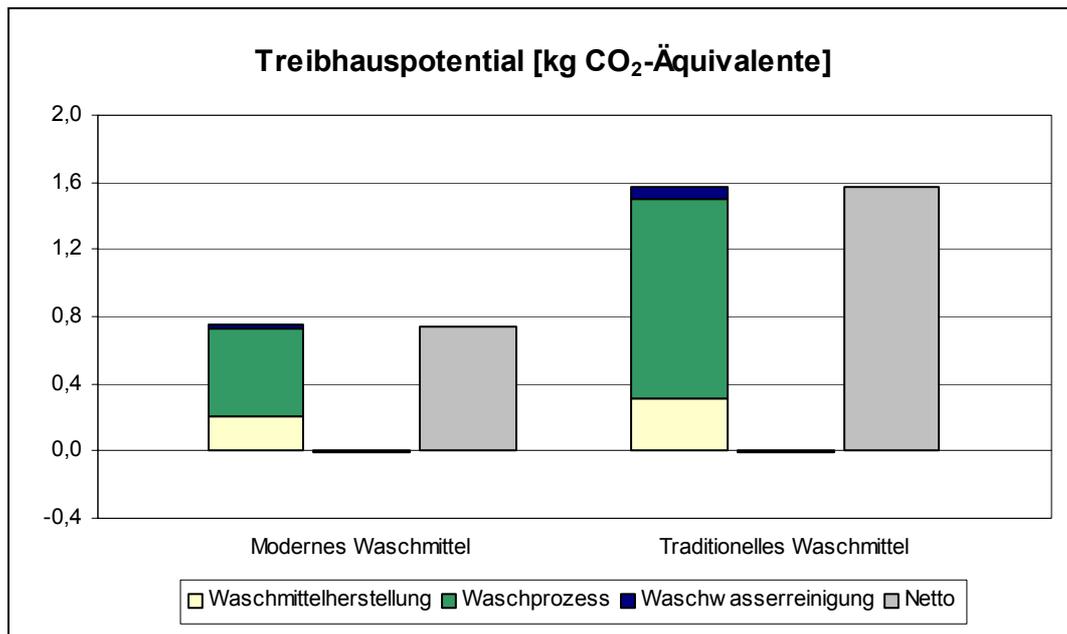


Abbildung 6-53: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-53 zeigt, dass im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL etwa doppelt so viele treibhausrelevante Emissionen entstehen als im Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse werden im Wesentlichen durch Emissionen aus der Energiebereitstellung für den Waschprozess bestimmt. Beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL stammen 71 % und beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL 76 % der CO₂-Äquivalente aus diesem Teilsystem. Daraus wird ersichtlich, dass das Treibhauspotential hauptsächlich durch die Bereitstellung elektrischer Energie verursacht wird und mit

anderen Wirkungskategorien korreliert, die ebenfalls durch die Energiebereitstellung bestimmt sind.

Der größte Teil der restlichen CO₂-Äquivalente resultiert bei beiden Szenarien aus der Waschmittelherstellung. Beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL sind dafür hauptsächlich die Herstellungsprozesse für Zeolith A, TAED und Natrium-Perborattetrahydrat verantwortlich. Beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL kommen die meisten Emissionen aus der Herstellung von Natriumtripolyphosphat.

CO₂-Äquivalente aus der Waschwasserreinigung haben nur einen geringen Einfluss auf die Brutto-Ergebnisse. Während beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL 2 % auf dieses Teilsystem entfallen, sind es beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL 4 %.

Tabelle 6-39: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Treibhauspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario MODERNES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ²¹⁾	0,53 kg CO ₂ -Äqu.	71 %
Zeolith A ²⁾	0,056 kg CO ₂ -Äqu.	7 %
TAED (Tetra-Azethyl-Ethylen-Diamin) ²⁾	0,029 kg CO ₂ -Äqu.	4 %
Natrium-Perborattetrahydrat ²⁾	0,027 kg CO ₂ -Äqu.	4 %
<i>Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	1,19 kg CO ₂ -Äqu.	76 %
Natriumtripolyphosphat ²⁾	0,17 kg CO ₂ -Äqu.	11 %

¹⁾ Teilsystem Waschprozess

²⁾ Teilsystem Waschmittelherstellung

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 6-53).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um

- knapp mehr als 1 % auf ein Treibhauspotential von 0,74 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario MODERNES WASCHMITTEL und
- weniger als 1 % auf ein Treibhauspotential von 1,57 kg CO₂-Äquivalente für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Das Treibhauspotential wird bei beiden Szenarien fast ausschließlich durch Kohlendioxidemissionen gebildet. Beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL sind es 94 % und beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL 95 %. Daneben haben noch Methanemissionen mit 4 % und 5 % einen geringen Anteil an den CO₂-Äquivalenten (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist die Emission an CO₂-Äquivalenten beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ca. 107 % höher als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

6.3.7.5 Versauerung

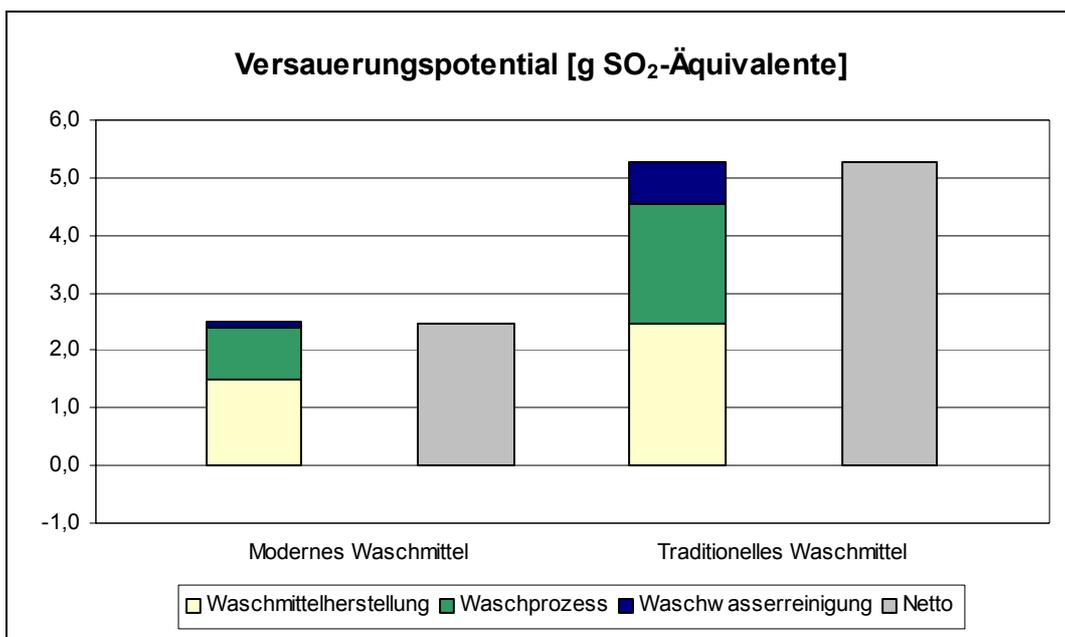


Abbildung 6-54: Versauerungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-54 zeigt, dass das Versauerungspotential beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL etwa halb so groß ist, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnis

Beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL wird das Brutto-Ergebnis mit 60 % überwiegend durch SO₂-Äquivalente aus der Waschmittelherstellung gebildet. Den größten Anteil daran haben die Herstellungsprozesse für Zeolith A, Fettalkylbenzolsulphonat und Natrium-Perborattetrahydrat sowie die Konfektionierung der Waschmittel. 37 % der SO₂-Äquivalente fallen darüber hinaus beim Waschprozess und damit der Bereitstellung elektrischer Energie für die Waschmaschine an. Emissionen aus der Waschwasserreinigung spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL kommen 47 % der SO₂-Äquivalente aus der Waschmittelherstellung. Verantwortlich dafür sind hauptsächlich die Herstellungsprozesse für Natriumtripolyphosphat und Fettalkylbenzolsulphonat. 40 % der SO₂-Äquivalente entfallen auf die Bereitstellung elektrischer Energie für den Waschprozess und 13 % auf die Waschwasserreinigung. Im letztgenannten Teilsystem stammen die Emissionen zum größten Teil aus der Herstellung von Chlor.

Tabelle 6-40: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Versauerungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario MODERNES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	0,93 kg SO ₂ -Äqu.	37 %
Zeolith A ²⁾	0,34 kg SO ₂ -Äqu.	14 %
Fettalkylbenzolsulphonat ²⁾	0,3 kg SO ₂ -Äqu.	12 %
Natrium-Perborattetrahydrat ²⁾	0,13 kg SO ₂ -Äqu.	5 %
Konfektion ²⁾	0,12 kg SO ₂ -Äqu.	5 %
<i>Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	2,1 kg SO ₂ -Äqu.	40 %
Natriumtripolyphosphat ²⁾	1,2 kg SO ₂ -Äqu.	24 %
Chlor ³⁾	0,58 kg SO ₂ -Äqu.	11 %
Fettalkylbenzolsulphonat ²⁾	0,29 kg SO ₂ -Äqu.	5 %

¹⁾ Teilsystem Waschprozess

²⁾ Teilsystem Waschmittelherstellung

³⁾ Teilsystem Waschwasserreinigung

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 6-54).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf ein Versauerungspotential von

- 2,5 g SO₂-Äquivalente für das Szenario MODERNES WASCHMITTEL und
- 5,3 g SO₂-Äquivalente für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Die SO₂-Äquivalente werden beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL zu 60 % und beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL zu 64 % durch Schwefeldioxidemissionen hervorgerufen. Die restlichen SO₂-Äquivalente sind fast ausschließlich auf Stickoxidemissionen zurückzuführen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist die Emission an SO₂-Äquivalenten beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ca. 113 % höher als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

6.3.7.6 Terrestrische Eutrophierung

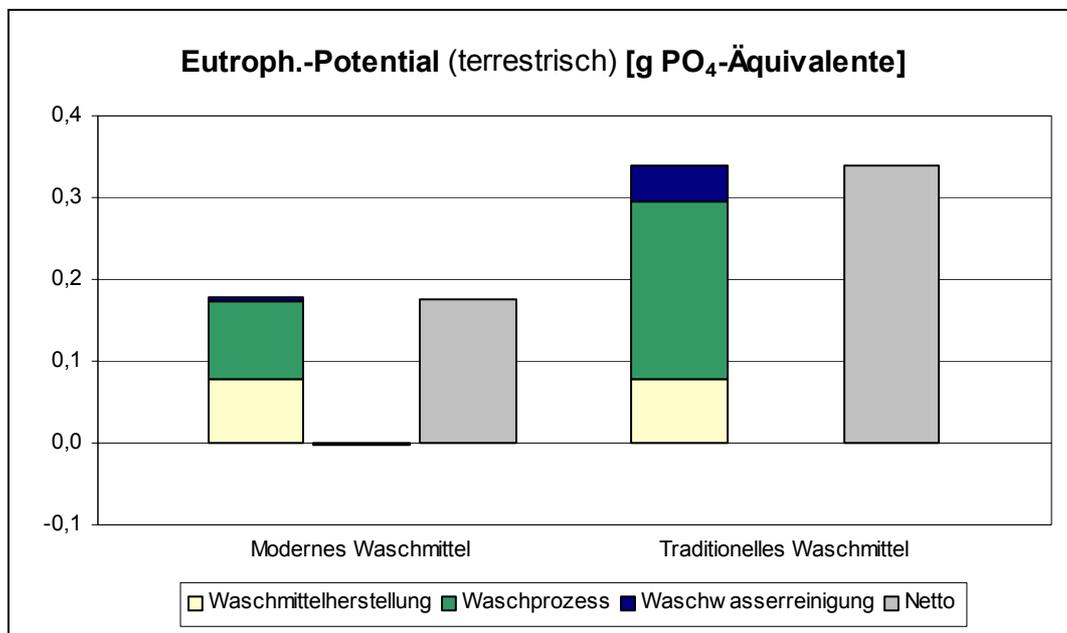


Abbildung 6-55: Terrestrisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-55 zeigt, dass das terrestrische Eutrophierungspotential beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL etwa halb so groß ist, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnis

Die Brutto-Ergebnisse werden überwiegend durch die Bereitstellung elektrischer Energie für den Waschprozess bestimmt. Beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL stammen 54 % und beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL 63 % der CO₂-Äquivalente aus diesem Teilsystem.

Die restlichen PO₄-Äquivalente sind beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL fast vollständig der Waschmittelherstellung zuzuordnen. Die größten Beiträge dazu liefern die Herstellungsprozesse für Fettalkylbenzolsulphonat und TAED.

Beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL stammen 23 % der restlichen PO₄-Äquivalente aus der Waschmittelherstellung, wozu am meisten die Herstellungsprozesse für Fettalkylbenzolsulphonat und TEAD beitragen. Der größere Teil der restlichen PO₄-Äquivalente entfällt auch auf die Waschwasserreinigung und wird dort hauptsächlich Teil bei der Herstellung von Chlor freigesetzt.

Tabelle 6-41: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des terrestrischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario MODERNES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	0,096 g PO ₄ -Äqu.	54 %
Fettalkylbenzolsulphonat ²⁾	0,019 g PO ₄ -Äqu.	11 %
TAED (Tetra-Azethyl-Ethylen-Diamin) ²⁾	0,009 g PO ₄ -Äqu.	5 %
<i>Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL</i>		
Strommix - elektrische Energie ¹⁾	0,22 g PO ₄ -Äqu.	63 %
Chlor ³⁾	0,031 kg PO ₄ -Äqu.	9 %
Fettalkylbenzolsulphonat ²⁾	0,018 kg PO ₄ -Äqu.	5 %

¹⁾ Teilsystem Waschprozess

²⁾ Teilsystem Waschmittelherstellung

³⁾ Teilsystem Waschwasserreinigung

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 6-55).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von

- 0,18 g PO₄-Äquivalente für das Szenario MODERNES WASCHMITTEL und
- 0,34 g PO₄-Äquivalente für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Die PO₄-Äquivalente basieren bei beiden Szenarien zu über 95 % auf Stickoxidemissionen. Die restlichen PO₄-Äquivalente sind Ammoniakemissionen zuzuordnen (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist das terrestrische Eutrophierungspotential beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ca. 92 % größer als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

6.3.7.7 Aquatische Eutrophierung

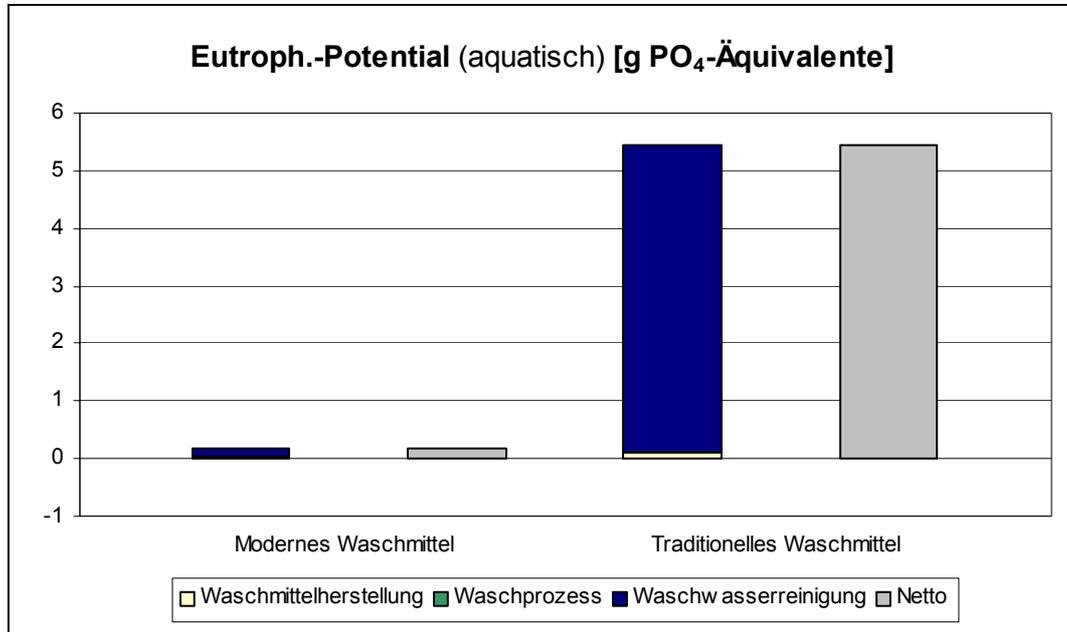


Abbildung 6-56: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-56 zeigt, dass das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ein Vielfaches größer ist, als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnis

Bei beiden Szenarien wird das Brutto-Ergebnis zum größten Teil durch die Waschwasserreinigung in einer Kläranlage bedingt. Während beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL mit 98 % fast die gesamten Emissionen diesem Teilsystem zuzuordnen sind, sind es beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL 69 %. Die restlichen PO₄-Äquivalente entstehen bei der Waschmittelherstellung, wozu überwiegend die Herstellung von Natriumschichtsilikat beiträgt.

Tabelle 6-42: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des aquatischen Eutrophierungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario MODERNES WASCHMITTEL</i>		
Abwasserbehandlung ¹⁾	0,12 g PO ₄ -Äqu.	69 %
Natriumschichtsilikat ²⁾	0,028 g PO ₄ -Äqu.	17 %
<i>Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL</i>		
Abwasserbehandlung ²⁾	5,3 g PO ₄ -Äqu.	98 %

¹⁾ Teilsystem Waschmittelherstellung

²⁾ Teilsystem Waschwasserreinigung

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 6-56).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von

- 0,2 g PO₄-Äquivalente für das Szenario MODERNES WASCHMITTEL und
- 5,5 g PO₄-Äquivalente für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Die PO₄-Äquivalente des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL setzen sich zum größten Teil aus CSB (71 %) und Emissionen unspezifischer Stickstoffverbindungen (18 %) zusammen. Dagegen werden PO₄-Äquivalente des Szenarios TRADITIONELLES WASCHMITTEL fast ausschließlich aus Phosphorverbindungen (98 %) gebildet.

Bei der Bewertung der Ergebnisse für die aquatische Eutrophierung ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse für die Waschwasserreinigung, die für diese Wirkungskategorie entscheidend ist, ausschließlich auf Berechnungen bzw. Annahmen für die Abwasserparameter beruhen, die aus der Zusammensetzung der Waschmittel und Literaturangaben abgeschätzt worden sind (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ca. 3150 % größer als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL. Die hohe Belastung beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL geht auf die vorhandene Phosphatfracht im Abwasser zurück, die beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL nicht mehr auftritt. Die Umweltentlastung hat damit nicht direkt etwas mit dem Einsatz von Enzymen im modernen Waschmittel zu tun.

6.3.7.8 Ozonbildung

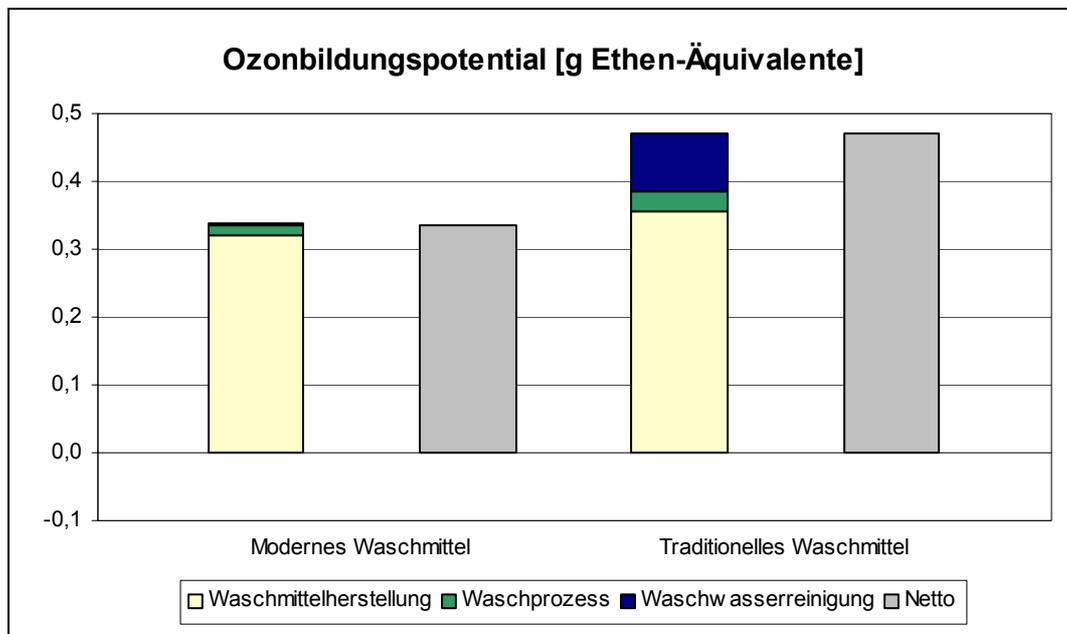


Abbildung 6-57: Ozonbildungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-57 zeigt, dass das Ozonbildungspotential beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL etwa 1/3 geringer ist, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnis

Beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL wird das Brutto-Ergebnis fast ausschließlich (95 %) durch Ethen-Äquivalente aus der Waschmittelherstellung gebildet. Die größten Beiträge dazu liefern die Herstellungsprozesse für Fettalkylbenzolsulphonat, Zeolith A und Fettalkoholethoxylat sowie die Konfektion der Waschmittel. Ethen-Äquivalente aus dem Waschprozess und der Waschwasserreinigung spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 6-43: Beitragsanalyse zum Brutto-Ergebnis des Ozonbildungspotentials

Modul im Bilanzierungsmodell	Anteil	
<i>Szenario MODERNES WASCHMITTEL</i>		
Fettalkylbenzolsulphonat ¹⁾	0,06 g Ethen-Äqu.	18 %
Konfektion ¹⁾	0,055 g Ethen-Äqu.	16 %
Zeolith A ¹⁾	0,054 g Ethen-Äqu.	16 %
Fettalkoholethoxylat ¹⁾ (petrochemisch)	0,044 g Ethen-Äqu.	13 %
Fettalkoholethoxylat ¹⁾ (aus nachwachsenden Rohstoffen)	0,035 g Ethen-Äqu.	10 %
Natrium-Perborattetrahydrat ¹⁾	0,018 g Ethen-Äqu.	5 %
<i>Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL</i>		
Natriumtripolyphosphat ¹⁾	0,092 g Ethen-Äqu.	20 %
Chlor ²⁾	0,077 g Ethen-Äqu.	16 %
Konfektion ¹⁾	0,076 g Ethen-Äqu.	15 %
Fettalkylbenzolsulphonat ¹⁾	0,058 g Ethen-Äqu.	12 %
Strommix - elektrische Energie ³⁾	0,031 g Ethen-Äqu.	7 %
Fettalkoholethoxylat ¹⁾ (petrochemisch)	0,028 g Ethen-Äqu.	6 %
Natrium-Perborattetrahydrat ¹⁾	0,024 g Ethen-Äqu.	5 %
Fettalkoholethoxylat ¹⁾ (aus nachwachsenden Rohstoffen)	0,023 g Ethen-Äqu.	5 %

¹⁾ Teilsystem Waschmittelherstellung

²⁾ Teilsystem Waschwasserreinigung

³⁾ Teilsystem Waschprozess

Auch beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL stammen mit 76 % die meisten der Ethen-Äquivalente aus der Waschmittelherstellung. Hauptsächlich tragen dazu die Herstellungsprozesse für Natriumtripolyphosphat, Fettalkylbenzolsulphonat und Fettalkoholethoxylat sowie die Konfektion der Waschmittel bei. 7 % der Ethen-Äquivalente entfallen auf den Waschprozess und damit auf die Bereitstellung elektrischer Energie

sowie 18 % auf die Waschwasserreinigung. Hier ist es zum größten Teil die Herstellung von Chlor, die entsprechende Emissionen verursacht.

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (Abbildung 6-57).

Netto-Ergebnis

Die Verrechnung der Gutschriften reduziert die Brutto-Ergebnisse um weniger als 1 % auf ein terrestrisches Eutrophierungspotential von

- 0,34 g Ethen-Äquivalente für das Szenario MODERNES WASCHMITTEL und
- 0,47 g Ethen-Äquivalente für das Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Die Ethen-Äquivalente werden bei beiden Szenarien fast ausschließlich durch NMVOC- und VOC-Emissionen gebildet. Lediglich Methanemissionen haben mit 4 % und 5 % einen geringen sichtbaren Anteil am Ozonbildungspotential (vgl. Daten zur Wirkungsabschätzung im Anhang).

Fazit: Für einen Waschgang mit 5 kg Schmutzwäsche ist die Emission an Ethen-Äquivalenten beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ca. 40 % höher als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

6.3.7.9 Humantoxizität

Stellvertretend für die ausgewählten humantoxisch eingestuft Parameter sind in Abbildung 6-58 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Cadmium und Schwefeldioxid dargestellt.

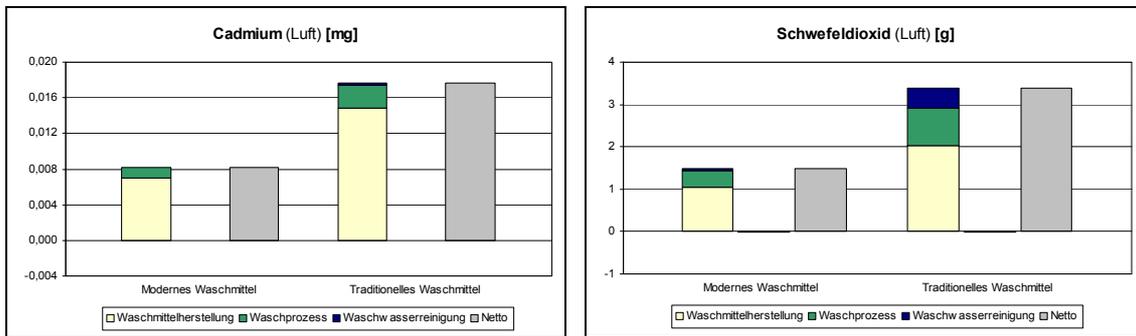


Abbildung 6-58: Humantoxizität am Beispiel von Cadmium und Schwefeldioxid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-58 zeigt, dass für die beiden dargestellten Parameter die Emissionen beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL etwa halb so groß sind, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnisse

Für die fünf untersuchten Parameter Benzo(a)pyren, Blei, Cadmium, Schwefeldioxid und Staub werden die Brutto-Ergebnisse bei beiden Szenarien im Wesentlichen durch Emissionen aus der Waschmittelherstellung sowie aus dem Waschprozess (zwischen 83 % und 99 %) bestimmt. Emissionen aus der Waschwasserreinigung haben bis auf drei Ausnahmen mit max. 3 % nur einen geringen Einfluss auf die Brutto-Ergebnisse. Lediglich für Benzo(a)pyren, Schwefeldioxid und Staub trägt das Teilsystem beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL 14 % bis 17 % zum Brutto-Ergebnis bei.

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind für alle Parameter fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. z.B. Abbildung 6-58).

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 6-38 dargestellt. In Tabelle 6-44 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 6-44: Humantoxizität - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Benzo(a)pyren	Entlastung	- 0,05 µg	- 48 %
Blei	Entlastung	- 0,04 mg	- 56 %
Cadmium	Entlastung	- 0,01 mg	- 54 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 1,89 g	- 56 %
Staub	Entlastung	- 23,4 mg	- 2 %

Fazit: Im Szenario MODERNES WASCHMITTEL wurden für alle humantoxisch eingestufte Parameter niedrigere Emissionswerte als im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL berechnet, wobei für Staub die Minderemission mit - 3 % nur gering ausfällt

6.3.7.10 Ökotoxizität

6.3.7.10.1 Luftemissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestufte Parameter (Luftemissionen) sind in Abbildung 6-59 die Bruttobeiträge der Teilsysteme und Gutschriften sowie das Netto-Ergebnis für Ammoniak und Stickoxide dargestellt.

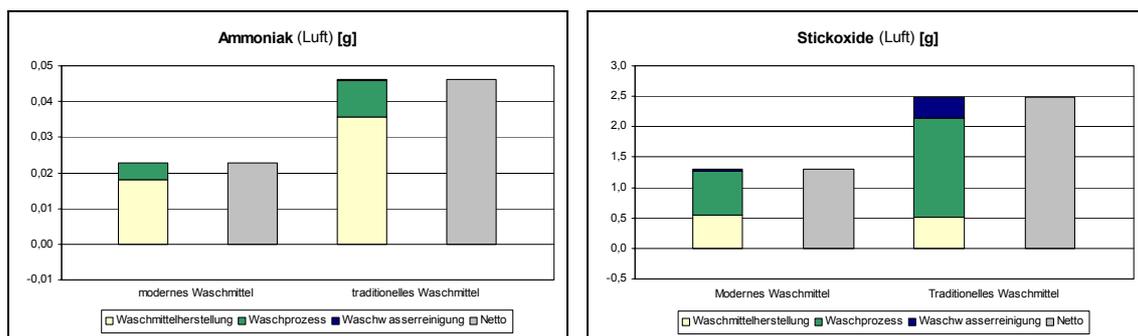


Abbildung 6-59: Ökotoxizität (Luftemissionen) am Beispiel von Ammoniak und Stickoxide - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-59 zeigt, dass für die beiden dargestellten Parameter die Emissionen beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL etwa halb so groß sind, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnisse

Für die fünf untersuchten Parameter Ammoniak, Fluorwasserstoff, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Stickoxide werden die Brutto-Ergebnisse bei beiden Szenarien im Wesentlichen durch Emissionen aus der Waschmittelherstellung sowie aus dem Waschprozess (zwischen 86 % und 99 %) bestimmt. Emissionen aus der Wasserreinigung haben bis auf zwei Ausnahmen mit max. 3 % nur einen geringen Einfluss auf die Brutto-Ergebnisse. Lediglich für Schwefeldioxid und Stickoxide trägt das Teilsystem beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL jeweils 14 % zum Brutto-Ergebnis bei.

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind für alle Parameter fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. z.B. Abbildung 6-59).

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 6-38 dargestellt. In Tabelle 6-45 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 6-45: Ökotoxizität (Luftemissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammoniak	Entlastung	- 0,03 mg	- 51 %
Fluorwasserstoff	Entlastung	- 0,003 mg	- 49 %
Schwefeldioxid	Entlastung	- 1,9 mg	- 56 %
Schwefelwasserstoff	Entlastung	- 0,03 mg	- 19 %
Stickoxide	Entlastung	- 1,2 mg	- 48 %

Fazit: Im Szenario MODERNES WASCHMITTEL wurden für alle als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Luftemissionen) niedrigere Emissionswerte als im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL berechnet.

6.3.7.10.2 Wasseremissionen

Stellvertretend für die ausgewählten als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Wasseremissionen) sind in Abbildung 6-60 die Bruttobeiträge und Gutschriften der Teilsysteme sowie das Netto-Ergebnis für Ammonium und Chlorid dargestellt.

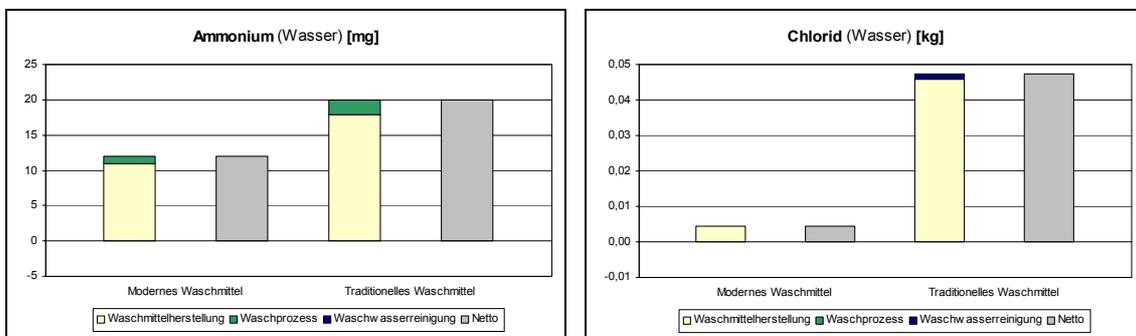


Abbildung 6-60: Ökotoxizität (Wasseremissionen) am Beispiel von Ammonium und Chlorid - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

Abbildung 6-60 zeigt, dass beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL die Emissionen für Ammoniak etwa halb so groß sowie für Chlorid fast zehn Mal geringer sind, als beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL.

Brutto-Ergebnisse

Für die vier untersuchten Parameter Ammonium, AOX, Chlorid und Kohlenwasserstoffe werden die Brutto-Ergebnisse bei beiden Szenarien fast ausschließlich durch Emissionen aus der Waschmittelherstellung sowie aus dem Waschprozess (zwischen 97 % und 99 %) bestimmt. Emissionen aus der Waschwasserreinigung haben mit 1 % bzw. bei Chlorid 3 % so gut wie keinen Einfluss auf die Brutto-Ergebnisse.

Gutschriften

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind für alle Parameter fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. z.B. Abbildung 6-60).

Netto-Ergebnisse

Die Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind in Tabelle 6-38 dargestellt. In Tabelle 6-46 werden diese miteinander verglichen.

Tabelle 6-46: Ökotoxizität (Wasseremissionen) - Vergleich der Netto-Ergebnisse hinsichtlich des Umweltbeitrages des Szenarios MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL

Parameter	Umweltbeitrag	Mehr-/Minderemission	
		Absolut	Prozentual
Ammonium	Entlastung	- 8,05 mg	- 40 %
AOX	Entlastung	- 0,58 mg	- 22 %
Chlorid	Entlastung	- 43,1 g	- 91 %
Kohlenwasserstoffe	Entlastung	- 0,03 mg	- 2 %

Fazit: Im Szenario MODERNES WASCHMITTEL wurden für alle als ökotoxikologisch relevant eingestuften Parameter (Wasseremissionen) niedrigere Emissionswerte als im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL berechnet, wobei für Kohlenwasserstoffe die Minderemission mit - 2 % nur gering ausfällt.

6.3.8 Zusammenfassung der Einzelergebnisse

Die ausgewerteten Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter verdeutlichen, dass es unterschiedliche Einflussgrößen auf die Ergebnisse gibt. Einerseits wurden die Ergebnisse durch den Waschprozess beeinflusst, bei dem aufgrund des Einsatzes von Enzymen im Waschmittel bei gleicher Waschleistung mit einer niedrigeren Temperatur gewaschen werden konnte und somit deutlich weniger elektrische Energie benötigt wurde. Andererseits zeigte sich aber, dass bei einigen Parametern auch die Teilsysteme Waschmittelherstellung und Waschwasserreinigung wesentliche Beiträge zu den Ergebnissen lieferten. Für diese Parameter konnte nicht eindeutig festgestellt werden, ob ausschließlich der Einsatz der Enzyme zu niedrigeren Umweltwirkungen der modernen Waschmittel gegenüber den Traditionellen führte. Die Umweltentlastungen könnten u.a. auch auf den Einsatz von Phosphaten in traditionellen Waschmitteln zurückgeführt werden, die in modernen Waschmitteln aufgrund der ungewollten eutrophierenden Wirkung der Phosphate seit den 80er Jahren nicht mehr enthalten sind.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Vergleich enzymfreier und enzymhaltiger Waschmittel durch die Szenarien MODERNES WASCHMITTEL und TRADITIONELLES WASCHMITTEL sind in Tabelle 6-47 noch einmal zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte (EWW) für die hier betrachtete funktionelle Einheit (**ein Waschgang für 5 kg Weißwäsche**) berechnet und bei der nachfolgenden Diskussion berücksichtigt. Hierbei ist zu beachten, dass alle Daten der Einwohnerwerte (EWW) mit Faktor 100.000 multipliziert wurden, um die Lesbarkeit der Zahlen zu erleichtern.

Die Tabelle zeigt, dass das Szenario MODERNES WASCHMITTEL gegenüber dem Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL zum Teil deutliche Umweltentlastungspotentiale für alle betrachteten Wirkungskategorien und nahezu alle Einzelparameter aufwies. Für die Einzelparameter Benzo(a)pyren (L) und Kohlenlenwasserstoffe (W) waren die Unterschiede der Daten sehr gering.

Tabelle 6-47: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

	Einheit	Modernes	Traditionelles	Modernes	Traditionelles	Differenz
		Waschmittel	Waschmittel	Waschmittel	Waschmittel	(Mod. - Trad.)
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	MJ	13,36	25,53	7,65	14,63	-6,98
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq	0,74	1,57	6,28	13,28	-7,00
Versauerungspotential	g SO ₂ -Äq	2,48	5,27	6,08	12,94	-6,86
Eutrophierungspotential (terrestr.)	g PO ₄ -Äq	0,18	0,34	3,39	6,50	-3,11
Eutrophierungspotential (aquat.)	g PO ₄ -Äq	0,17	5,46	3,01	98,1	-95,1
Ozonbildungspotential (POCP)	g Eth-Äq	0,34	0,47	3,90	5,45	-1,55
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren (L)	mg	0,000058	0,000104	0,03	0,06	-0,03
Blei (L)	mg	0,029	0,066	0,38	0,86	-0,48
Cadmium (L)	mg	0,0082	0,018	6,11	13,2	-7,06
Schwefeldioxid (L)	g	1,5	3,4	15,5	35,0	-19,5
Staub (L)	g	0,78	0,80	24,7	25,3	-0,62
Ökotoxische Einzelstoffe						
Ammoniak (L)	g	0,023	0,046	0,30	0,61	-0,31
Fluorwasserstoff (L)	g	0,0031	0,0061	0,21	0,40	-0,20
Schwefeldioxid (L)	g	1,5	3,4	15,5	35,0	-19,5
Schwefelwasserstoff (L)	g	0,00013	0,00016	--	--	--
Stickoxide (L)	g	1,3	2,5	6,67	12,8	-6,10
Ammonium (W)	g	0,012	0,020	0,43	0,71	-0,29
AOX (W)	g	0,0021	0,0027	3,95	5,05	-1,10
Chlorid (W)	g	4,4	47,5	--	--	--
Kohlenwasserstoffe (W)	g	0,00134	0,00137	2,58	2,64	-0,06

7 Konzept zur vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotentials der biotechnischen und chemisch-technischen Produktion

7.1 Hintergrund und Zielsetzung

Chemisch-technische Produktionsprozesse sind häufig durch hohe Temperaturen, großen Druck, den Einsatz organischer Lösungsmittel sowie das Vorhandensein von Schadstoffen gekennzeichnet. Dagegen gilt die Biotechnik meist als vergleichsweise sanfte Technologie, da in der Regel unter milden Bedingungen wie Raumtemperatur, Normaldruck und wässrigem Milieu gearbeitet wird (vgl. Tabelle 2-3).

Tabelle 7-1: Unterschiede zwischen biotechnischen und chemisch-technischen Produktionsverfahren (n. Festel et al., 2004; verän.)

Kriterien	Biotechnisches Verfahren	Chemisch-technisches Verfahren
Rohstoffe	Meist (C ₆) _n -Quellen aus nachwachsenden Rohstoffen	Meist C ₂ /C ₃ -Quellen aus Erdöl
Druck	Niedriger Druck	Hoher Druck
Konzentration	In Wasser verdünnt	Hohe Konzentration
Temperatur	Umgebungstemperatur (15 - max. 80°C)	Breiter Bereich (-100 – 1200°C)
pH-Wert	Mild (pH 3 – 8)	Extrem
Reaktionsgeschwindigkeit	Niedrig	Hoch
Katalysator-Lebensdauer	Tage	Monate/Jahre
Selektivität	Moderat (Fermentation) bis hoch (Biotransformation)	Üblicherweise hoch (einfache Reaktionen) bis mittel (komplexe Reaktionen)
Reaktor	Üblicherweise hohe Volumina, monoseptisch, geringe Reaktorleistungsfähigkeit	Üblicherweise klein und kompakt; hohe Reaktorleistungsfähigkeit
Operationsmodus	Diskontinuierlich; teilweise multiple Reaktionen in einem Reaktor (Zellen)	Kontinuierlich mit wenigen Reaktionsschritten bei Basischemikalien und diskontinuierlich mit mehreren Reaktionsschritten bei Spezialchemikalien
Verwendung biologischer Arbeitsstoffe	Einsatz von (Mikro-)Organismen (z.T. gentechnisch verändert) in Produktion und Abfall- und Abwasserentsorgung	Keine Verwendung im Produktionsprozess, jedoch im Bereich der Abfall- und Abwasserentsorgung

Andererseits kann die biotechnologische Produktion zusätzliche spezifische Risiken aufweisen. Hierbei ist vor allem an eine Freisetzung ökologisch oder gesundheitlich relevanter, möglicherweise gentechnisch veränderter Organismen zu denken. Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt in seiner Projektausschreibung vom 4. März 2002 die Vermutung formuliert, dass biotechnologische Produktionsanlagen im Vergleich zu chemischen Produktionsanlagen Vorteile aufweisen. Als mögliche Vergleichsfelder wurden dabei die Mess- und Regeltechnik, die Materialbeschaffenheit, der Materialaufwand als auch generell die Anlagensicherheit angeführt. Um diese Annahme zu prüfen, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Bewertungskonzept entwickelt und an einem konkreten Beispielprodukt untersucht, ob diese Vorteile tatsächlich gegeben sind.

In Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurde entschieden, diese Fragestellung exemplarisch anhand der zwei Varianten der Riboflavin-Produktion (Vitamin B₂) zu untersuchen, die bereits im Abschnitt 5.1 betrachtet werden. Dies hat den Vorteil, dass auf diejenigen Informationen und Daten zurückgegriffen werden kann, die dort für den ökobilanziellen Vergleich der beiden Produktionsverfahren verwendet bzw. dabei gewonnen wurden.

7.2 Vorgehensweise

7.2.1 Zielsetzung, Struktur und Datengrundlage

Als besonders anspruchsvoll bei der Entwicklung der Vorgehensweise stellte sich heraus, dass einer relativ offen formulierten Aufgabenstellung eine Vielzahl möglicher Ansätze sowie vor allem eine große Anzahl relevanter Begriffe, die je nach Bereich unterschiedlich und zum Teil widersprüchlich verwendet werden, gegenüberstand. Entsprechend war es zuerst notwendig, die Verwendung der Begriffe in diesem Vorhaben zu klären und auf diesem Wege eine sachgerechte Bezeichnung der nachfolgend entwickelten Vorgehensweise zu finden. Diese Überlegungen zur Begriffsbestimmung widmet sich der nächste Abschnitt. Im Anschluss daran wird thematisiert, welche Schutzgüter unter der zu behandelnden Fragestellung der Anlagensicherheit relevant sind und welcher Bewertungsrahmen sich damit anbietet.

Im nächsten Schritt galt es dann, die Vorgehensweise für eine solche vergleichende Bewertung zweier Verfahren zu entwickeln und unter Darstellung der Hintergründe zu begründen. Dabei wurde Wert auf eine praxisorientierte und dennoch theoretisch fundierte Methodik gelegt, die vor allem auf Ansätze und Wertungen zurückgreift, die bereits im geltenden Rechtssystem der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland – mit den Schwerpunkten Umwelt- und Arbeitsschutzgesetzgebung – verankert sind. Ein weiteres Ziel war es, im Sinne eines sachorientierten Diskussions- und Lernprozesses die Vorgehensweise so zu gestalten, dass dem Leser bzw. der Leserin aufgrund der vorgelegten Informationen eine eigene Bewertung und damit die Überprüfung unserer Folgerungen ermöglicht wird. Auf dieser Basis wurde dann exemplarisch am Beispiel der Riboflavin-Produktion untersucht, welches Gefahrenpotential einerseits mit dem chemisch-technischen, andererseits mit dem biotechnischen Produktionsverfahren verbunden ist und wie sich die beiden Prozesse hierbei unterscheiden.

Ursprünglich gingen wir für die Bearbeitung dieses Projektmoduls davon aus, dass der Zugang zu geeigneten chemisch-technischen und biotechnischen Produktionsanlagen, in denen das selbe Produkt erzeugt wird, möglich sein wird (s. Verfahrensvergleich 1, Abschnitt 5.1) Darüber hinaus war es anfangs geplant, Genehmigungsunterlagen zu solchen Anlagen bezüglich sicherheitsrelevanter Aussagen und Auflagen auszuwerten. Da sich jedoch in der Praxis dieser Weg nicht als gangbar erwiesen hat, wurde der Verfahrensvergleich alternativ auf Grundlage allgemein bekannter Prozesskennndaten zum chemisch-technischen und biotechnischen Riboflavin-Herstellungsverfahren durchgeführt. Dies ist aus unserer Sicht jedoch nicht negativ zu werten, da so der Schwerpunkt zwangsläufig darauf zu legen war, die wesentlichen Unterschiede zwischen den Verfahren auf einer anlagenunabhängigeren Ebene herauszuarbeiten und verbal-argumentativ zu bewerten. Aus unserer Sicht sollte dies der Entwicklung einer Herangehensweise zu Gute kommen, die sich bei relativ guter Akzeptanz auf weitere Verfahrensvergleiche übertragen lässt - auch wenn unsere folgenden Überlegungen dazu schon aufgrund der begrenzten Ressourcen realistischerweise nur einen bescheidenen Diskussionsbeitrag leisten können.

7.2.2 Begriffsklärung: Gefahrenpotential – Gefahr - Gefährdung - Risiko

Die Klärung dieser für die hier betrachtete Fragestellung bedeutsamen Begriffe war wichtig für die Definition der Vorgehensweise und die Einordnung der Ergebnisse –

und stellte sich dabei als nahezu unlösbar heraus. So wirkte sich enorm erschwerend aus, dass die im relevanten Themenbereich zentralen Begriffe „Gefahrenpotential“, „Gefahr“, „Gefährdung“ und „Risiko“ nicht eindeutig definiert sind und in sehr unterschiedlichen Bedeutungen verwendet werden (vgl. die unterschiedlichen Definitionen im Glossar im Anhang). So führt der Sachverständigenrat für Umweltfragen in seinem Sondergutachten „Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen“ (SRU, 1999) eine Vielzahl verschiedener und teilweise sogar widersprüchlicher Definitionen auf, die je nach Ansatz (mathematisch-technisch, [öko-]toxikologisch-epidemiologisch, soziologisch, rechtswissenschaftlich, ökonomisch) verwendet werden. Darüber hinaus weist der Umweltrat darauf hin, dass sich selbst im Bereich des Umwelt- und Sicherheitsrechtes trotz erheblicher Bedeutung immer noch keine gesetzliche Definition des Gefahren- und Risikobegriffs findet (SRU, 1999).

Dieses Dilemma soll am Beispiel der Begriffe „*Risiko*“ und „*Gefahr*“ erläutert werden: In einer grundlegenden Definition bezeichnet der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU, 1999) die quantitativ bestimmte Möglichkeit des Auftretens von Schäden und Verlusten als Risiko. Dieser Begriff steht damit für die „*Größe einer Gefahr*“. Verbunden damit sind zwei weitere Begriffe: Der Schaden, der eintreten kann, und die Wahrscheinlichkeit, dass dieser eintritt. Daraus wird nach dem mathematisch-technischen Verständnis das mit einem Prozess verbundene Risiko berechnet. Der ökotoxikologische bzw. toxikologisch-epidemiologische Ansatz versteht darunter die Wahrscheinlichkeit des Auftretens schädlicher Wirkungen in einer Gruppe von Exponierten in Abhängigkeit von der Dosis D . Ganz anders der rechtswissenschaftliche Ansatz, der ein Risiko dann sieht, wenn ein Schaden möglich oder nicht auszuschließen ist, also die bloße Möglichkeit eines Schadens gegeben ist. Dies umfasst auch Fälle der Ungewissheit und der subjektiven Nichtkenntnis einzelner Faktoren oder Wirkungszusammenhänge. Andererseits setzt eine Gefahr im rechtswissenschaftlichen Sinne voraus, dass Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenshöhe bekannt sind und miteinander verrechnet werden können - was dem naturwissenschaftlichen Risikobegriff deutlich näher kommt (Risikokommission, 2003; SRU, 1999).

Angesichts dieses unklaren Begriffsfeldes soll vor weiteren Überlegungen mit einfachen Worten beschrieben werden, worum es dem Autor in diesem Projektmodul geht: Ziel ist es, beide Verfahren hinsichtlich der damit verbundenen potentiellen Gefahren auf eher allgemeiner Ebene, nicht jedoch auf Basis konkreter Anlagen miteinander zu

vergleichen. Da der Blickwinkel dabei die technisch-naturwissenschaftliche Perspektive ist und sowohl über mögliche Schadensfolgen als auch über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines nicht bestimmungsgemäßen Anlagenbetriebs keine Kenntnis besteht – und man sich damit in Anlehnung an den Wissenschaftlichen Beirat für globale Umweltfragen im Zustand der Ahnungslosigkeit bewegt (WBGU, 1999) – scheidet die Verwendung des Begriffes Risiko aus.

Bleibt als nächstes der Begriff Gefährdung zu prüfen: Hier herrscht relative Einigkeit, dass es sich dabei um eine Gefahr handelt, die auf ein Objekt bezogen ist (SRU, 1999; TRGS 300, 1995; SUVA, 2003). „Einzig“ die Risikokommission schert aus und sieht darin lediglich das Vorhandensein einer Gefahr (Risikokommission, 2003). Stimmt man hier der Mehrheit zu, so würde es durchaus möglich sein, diesen Begriff beispielsweise in Form von „Vergleichende Analyse des Gefährdungspotentials“ zu übernehmen. Andererseits findet die Untersuchung nicht auf Ebene einer konkreten Anlage statt, so dass ein konkreter Objektbezug nicht gegeben ist, was eventuell durch den Zusatz „*Potential*“ geheilt werden könnte.

Wendet man sich angesichts dieser noch unbefriedigenden Lage konkreteren Dingen zu, so wie es die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA) tut, indem sie als Beispiel für eine „*Gefahr*“ einen „Blumentopf, der auf einem Fenstersims steht“ anführt, so findet man damit dort auch eine Definition für Gefahr, die aus Sicht des Autors sehr gut auf das in dieser Untersuchung Machbare passt: „Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden entstehen kann“. (SUVA, 2003): Da an dieser Untersuchung jedoch nicht nur „ein Blumentopf“, sondern eine Vielzahl möglicher Gefahren zu betrachten ist und es zudem nicht um eine konkrete Produktionsanlage geht, wird im Folgenden der Begriff „*Vergleichende Bewertung des Gefahrenpotentials*“ verwendet.

Dass dies keine exotische Festlegung ist, zeigt die nahezu identische Verwendung dieser Begrifflichkeit in zwei aktuellen Praxishilfen der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin zur Bewertung des Gefahrenpotentials von Produktionsanlagen nach TRGS 300 - Sicherheitstechnik (BAuA, 2004b; BAuA, 2004c).

7.2.3 Begriffsklärung: Anlagensicherheit und Schutzgüter

Die Bewertung einer Anlage bzw. eines Verfahrens unter dem Gesichtspunkt der Anlagensicherheit provoziert zuerst einmal die Frage: Sicher für wen? – und stellt damit vor

die Notwendigkeit, entsprechende Schutzgüter zu definieren, wie dies beispielhaft anhand folgender Definitionen dargestellt wird:

- Nach BAuA (2004) ist die Anlagensicherheit ein relativ weit gefasster Begriff, der vor allem auf vier Schutzziele abzielt: den Schutz der Anlage, den Arbeitnehmerschutz, den Nachbarschaftsschutz und den Umweltschutz
- Dies deckt sich weitgehend mit der rechtswissenschaftlichen Definition, die bei der Bewertung von Risiken die Schutzgüter Leben, menschliche Gesundheit, Eigentum und Umwelt differenziert (SRU, 1999).
- Kurth et al. (2003) benennen als Ausgangspunkt jeder ökobilanziellen Betrachtung folgende Schutzgüter: Menschliche Gesundheit, natürliche Umwelt, natürliche Ressourcen, vom Menschen gemachte Umwelt.
- Zweck des Gentechnik-Gesetzes (GenTG, 2004) ist es, Leben und Gesundheit von Menschen, Tieren, Pflanzen sowie die sonstige Umwelt in ihrem Wirkungsgefüge und Sachgüter vor möglichen Gefahren gentechnischer Verfahren und Produkte zu schützen und dem Entstehen solcher Gefahren vorzubeugen.

Das Erreichen dieser Schutzziele wird in Deutschland über ein ausdifferenziertes Rechtssystem unterstützt. Dieses wird um sicherheitsrelevante Normen und weitere Regelungen ergänzt, die von nationalen und internationalen Normungsinstitutionen (DIN, CEN, ISO) sowie von Verbandseinrichtungen und von Seiten des Staates beauftragten Organisationen (VDI, VDE, VdS, Berufsgenossenschaften, ABAS etc.) aufgestellt werden und denen in vielen Fällen ebenfalls eine rechtliche Geltung zukommt.

Einzelne dieser Schutzziele stehen zwar meist im Mittelpunkt einer spezifischen Regelung. In der Regel sind sie aber nicht getrennt zu sehen, da vielfältige Überschneidungen und Wechselwirkungen zwischen den Schutzziele bestehen. Beispielsweise wird von Seiten des Umweltschutzes die Anlagensicherheit vorrangig über das Bundesimmissionsschutzgesetz sowie die daraus abgeleiteten Störfall-Verordnung geregelt. Beide Vorschriften haben zugleich erhebliche Bedeutung für den Schutz der Arbeitnehmer und der Anwohner. Andererseits wird der Schutz der Arbeitnehmer vor allem über das Arbeitsschutzgesetz und diesem nachgeordnete gesetzliche Bestimmungen geregelt. Die dort formulierten Anforderungen haben – wie etwa bei der Betriebssicherheitsverordnung – große Bedeutung für den sicheren Betrieb von Anlagen. Letzterer

hat wiederum – wie es beispielsweise gerade bei den Vorgaben zu Druckbehältern sehr offensichtlich wird – große Bedeutung für den Schutz der Nachbarschaft und der Umwelt. Die Gefahrstoffverordnung, die den sicheren Umgang mit Gefahrstoffen regelt, ist hinsichtlich aller Schutzziele wichtig – und leitet sich sowohl vom Chemikalienrecht als auch von den Arbeitsschutzgesetzen ab. In Verbindung mit der TRGS 300 "Sicherheitstechnik" macht sie wesentliche Vorgaben an die Sicherheit von Anlagen.

Insgesamt gibt es damit eine Vielzahl gesetzlicher Regelungen, die als Orientierungsrahmen zu der hier durchgeführten Untersuchung beitragen können. Da es aus unserer Sicht sinnvoll ist, darauf zurückzugreifen und die vergleichende Bewertung darauf aufzubauen, werden im Folgenden wesentliche Vorarbeiten zu den relevanten Rechtsbereichen zusammengetragen und zur Entwicklung der Vorgehensweise beim Verfahrenvergleich herangezogen.

Betrachtungen zur Anlagensicherheit orientieren sich in erster Linie an der nicht gewollten Störung der oben genannten Schutzgüter durch einen nicht-bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage. Dabei geht es vor allem darum, potentielle Gefahren soweit in den Griff zu bekommen, dass das verbleibende Risiko im Vergleich zum potentiellen Schaden vertretbar ist. Nicht berücksichtigt werden dagegen in der Regel Emissionen, die sich aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage ergeben. Dies ist analog auch in diesem Vorhaben nicht Aufgabe dieses Projektteils, sondern der in Abschnitt 5.1 durchgeführten ökobilanziellen Betrachtung. Unter beiden Fragestellungen nicht thematisiert werden dagegen Fragen der Produktsicherheit.

Abschließend soll noch auf einen wichtigen Punkt in diesem Zusammenhang hingewiesen werden: Aus Ausführungen der BAuA (2004) geht ein wesentlicher Unterschied zwischen der Zielrichtung, die üblicherweise bei Betrachtungen zur Anlagensicherheit verfolgt wird, und der Aufgabenstellung in diesem Vorhaben hervor. Nach BAuA zielt die ganzheitliche Betrachtung von Anlagen im Sinne der anfangs genannten Schutzziele mit den zugehörigen Rechtssystemen auf die Ermittlung und Umsetzung notwendiger Sicherheitsmaßnahmen. In diesem Vorhaben geht es dagegen darum, zwei Verfahren hinsichtlich ihres Gefahrenpotentials miteinander zu vergleichen. Der stark anlagenorientierten Ausrichtung beim Focus Sicherheitsmaßnahmen kommt damit in diesem Vorhaben nur eine sehr eingeschränkte Bedeutung zu.

7.2.4 Bewertungsrahmen: Rangfolge von Schutzmaßnahmen

Eine der Aufgaben bei Bearbeitung dieses Projektmoduls war es, das mit den Verfahren einhergehende Gefahrenpotential vergleichend zu bewerten. Dazu wird im Folgenden vorweg ein Bewertungsrahmen abgeleitet und dabei enger Bezug auf in gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen angelegte Werthaltungen genommen, die so weitgehend akzeptiert sind. So findet sich in verschiedenen Vorschriften (z.B. GefStoff, 2004; TRBA 400, 2001; vgl. auch SFK, 2002) eine nahezu identische Hierarchie von Schutzmaßnahmen, die nachfolgend in konsolidierter Form wiedergegeben wird. Dabei gilt, dass Maßnahmen mit niedrigerer Nummer vorrangig umzusetzen sind:

1. Ersatz gesundheitsgefährdender Arbeitsstoffe durch weniger gefährliche, soweit dies zumutbar und nach dem Stand der Technik möglich ist.
2. Verhinderung der Freisetzung gefährlicher Arbeitsstoffe am Arbeitsplatz mittels geeigneter Gestaltung der Arbeitsverfahren und technischer Schutzmaßnahmen, wobei passiv wirksame Maßnahmen aktiv wirksamen, die beispielsweise Hilfsenergien benötigen vorzuziehen sind.
3. Schutzmaßnahmen zur Minimierung der Exposition der Beschäftigten, falls gefährliche Arbeitsstoffe nicht vollständig zurückgehalten werden können bzw. bestimmungsgemäß freigesetzt werden, wobei technische stets vor organisatorischen Maßnahmen Vorrang haben.
4. Ergänzende persönliche Schutzausrüstung nur dann, wenn technische und organisatorische Schutzmaßnahmen nicht zur Erreichung des Schutzzieles ausreichen.
5. Begrenzung der Zahl exponierter Beschäftigter, die Tätigkeiten mit gefährlichen Arbeitsstoffen ausüben, auf ein Mindestmaß.

Sollen nun zwei Verfahren unter dem Gesichtspunkt des damit jeweils verbundenen Gefahrenpotentials verglichen werden, kann die in dieser Rangfolge angelegte Werthaltung als Bewertungsraaster übernommen werden. Dies würde beispielsweise bedeuten, dass bei einem Vergleich zweier Verfahren zuerst analysiert wird, ob ein Unterschied bezüglich des Einsatzes gefährlicher Arbeitsstoffe besteht. Schneidet eines der Verfahren hierbei deutlich besser ab, ist dieses im Sinne dieser Hierarchie zu bevorzugen.

gen. Gibt es diesbezüglich keinen Unterschied, müsste diese Frage auf der Ebene der Verfahren (Punkt 2.) betrachtet werden usw..

Weitere Bewertungskriterien lassen sich beispielsweise der TRGS 400 (2002) entnehmen, in der davon ausgegangen wird, dass es in vielen Fällen möglich ist, ein Produkt oder ein Verfahren mit geringerem Risiko zu erkennen. Dazu werden die folgenden Kriterien aufgestellt und so ebenfalls ein Bewertungsrahmen vorgeben:

- Geschlossene Verfahren sind besser als offene Verfahren.
- Wässrige Systeme sind besser als lösemittelhaltige Systeme.
- Produkte mit 10 % Lösemittel sind besser als Produkte mit 50 % Lösemittel bei gleichen Inhaltsstoffen.
- Stoffe mit höherem Luftgrenzwert sind besser als Stoffe mit niedrigerem Luftgrenzwert.
- Organische Flüssigkeiten mit niedriger Gefährdungszahl (Sättigungskonzentration/Grenzwert) sind besser als Stoffe mit hoher Gefährdungszahl.
- Weniger leicht entzündliche Stoffe sind besser als entzündlichere Stoffe.
- Stoffe ohne Explosionsgefährlichkeit sind besser als Stoffe, die explosionsgefährlich sind.
- Nicht brandfördernde Stoffe sind besser als brandfördernde Stoffe.

Soweit es erforderlich sein sollte, wird bei der Auswertung auf diese beiden Bewertungsraster zurückgegriffen werden.

7.3 Kriterien zur Bestimmung des Gefahrenpotentials

7.3.1 Vorbemerkung

Das Gefahrenpotential eines Prozesses wird vor allem durch folgende Punkte bestimmt: Das in einer Anlage enthaltene Stoffinventar sowie durch anlagen- und prozessspezifische Parameter, die unter Sicherheitsgesichtspunkten relevant sind. Das stoffbezogene Gefahrenpotential ist aufgrund der in diesem Bericht verfolgten Fragestellung noch einmal zu differenzieren in Chemikalien und biologische Arbeitsstoffe.

Angesichts der Zielsetzung eines eher allgemeinen Vergleiches der Verfahren sowie fehlender Informationen werden zudem anlagenspezifische Gesichtspunkte nicht behandelt, prozessorientierte Zusammenhänge soweit diese relevant sind jedoch dargestellt. Im Folgenden werden getrennt nach den verbleibenden drei Aspekten vor allem aus dem rechtlichen Bereich stammende Informationen aufbereitet, die für die Bestimmung des Gefahrenpotentials bedeutsam sind. Auf dieser Basis wird jeweils die Vorgehensweise für die vergleichende Bewertung der biotechnischen und chemisch-technischen Riboflavin-Produktion hinsichtlich des Gefahrenpotentials in Abschnitt 7.4.3 abgeleitet. Vorweg wird die Vorgehensweise bei Gefährdungsbeurteilungen im Bereich des Arbeitsschutzes thematisiert, da die sich daran gut aufzeigen lässt, welche Bandbreite an Gefahrenfaktoren üblicherweise zu berücksichtigen sind und welche davon bei dieser Untersuchung einbezogen wurden.

7.3.2 Gefährdungsbeurteilung im Bereich der Arbeitsschutzes

Um den Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen sicherzustellen, ist der Arbeitgeber nach § 5 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG, 2004) verpflichtet, alle Einflussgrößen, die zu einer Gefährdung führen können, zu ermitteln und zu bewerten. Diese Gefährdungsbeurteilung ist bezogen auf die konkreten betrieblichen Gegebenheiten bei einem bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlagen durchzuführen. Auf dieser Basis sind notwendige Schutzmaßnahmen festzulegen und umzusetzen. (TRBA 400, 2001; TRGS 400, 1999). Tritt dabei der Fall auf, dass Beschäftigte Tätigkeiten ausüben, bei denen diese Kontakt mit biologischen Arbeitsstoffen haben können, ist dabei auch die spezifischere Biostoffverordnung (BioStoffV, 2003) zu berücksichtigen sowie die entsprechenden TRBA und TRGS.

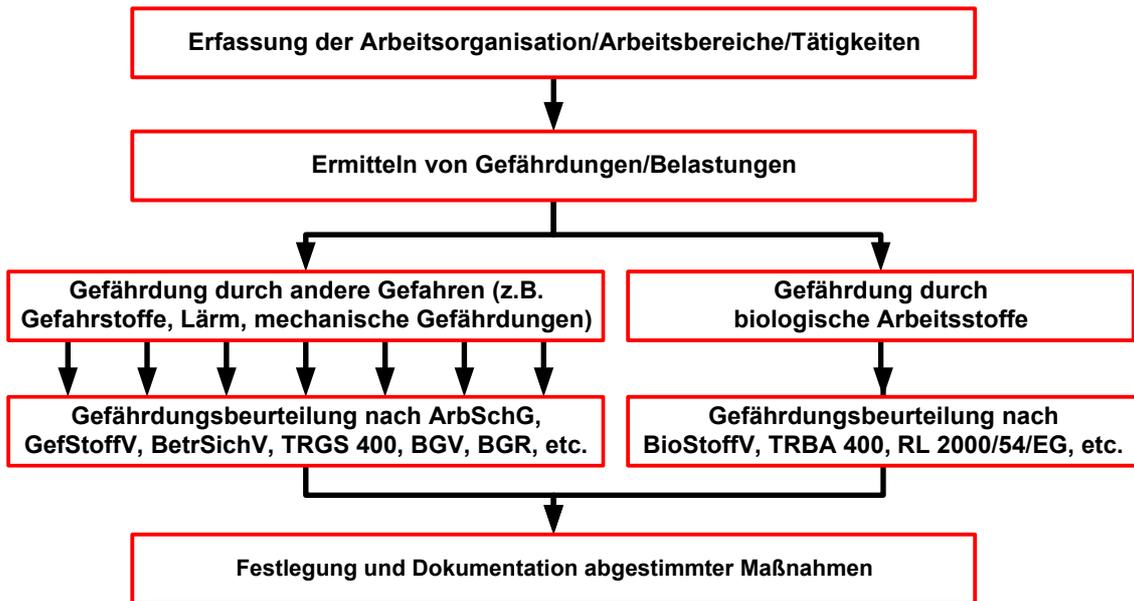


Abbildung 7-1: Vorgehensweise bei der Gefährdungsbeurteilung (in Anlehnung an TRBA 400, 2001)

Abbildung 7-1 zeigt den Ablauf einer Gefährdungsbeurteilung, wie diese in verschiedenen gesetzlichen Regelungen gefordert wird. Diese in Anlehnung an die TRBA 400 erstellte Abbildung betont, dass die Gefahren bzw. Gefährdungen, die von biologischen Arbeitsstoffen ausgehen, auf eine spezifische Art und Weise zu behandeln sind. Zudem zeigt die Abbildung ebenso, dass für diese Untersuchung der Begriff der Gefährdungsbeurteilung nicht passend wäre. Letztere ist auf konkrete Arbeitssituationen und Gefährdungen für reale Menschen bezogen, die aus dem mit einem Arbeitsmittel verbundenen abstrakten Gefahren(potential) tatsächlich resultieren. Ziel ist dabei – wie auch bei den meisten anderen bewertenden Ansätzen im Bereich der Anlagensicherheit - vor allem die Festlegung von Schutzmaßnahmen, nicht jedoch ein Vergleich von Verfahren.

Andererseits hat sich in den letzten Jahren eine inzwischen weit entwickelte Systematik zur Strukturierung möglicher Gefahren ergeben, die in Tabelle 7-2 aufgegriffen wird, da diese Zusammenstellung einen umfassenden Überblick zu den wichtigsten Gefahrenfaktoren bietet.

Tabelle 7-2: Übersicht zu den bei Gefährdungsbeurteilungen zu berücksichtigenden Gefahrenarten (in Anlehnung an Günther, 2001b; SUVA, 2003)

Nr.	Art der Gefahr		
1	Mechanische Gefahren		
	Ungeschützte bewegte Teile	Unkontrolliert bewegte Teile	Bewegte Transport-/Arbeitsmittel
	Teile mit gefährlichen Oberflächen	Ausrutschen, Stolpern, Umknicken, Fehltreten	Absturz
2	Elektrische Gefahren		
	Gefährliche Körperströme	Lichtbögen	
3	Gefahrstoffe		
	Gase	Dämpfe	Aerosole (Nebel, Rauch, Stäube)
	Flüssigkeiten	Feststoffe, Pasten	Außer Kontrolle geratene Reaktionen
4	Biologische Gefahren		
	Infektionsgefahr durch Mikroorganismen	Gentechnisch veränderte Organismen	Allergene, sensibilisierende toxische Stoffe von Organismen
5	Brand- und Explosionsgefahren		
	Brandgefährdung durch Feststoffe, Flüssigkeiten, Gase	Explosionsfähige Atmosphäre	Explosivstoffe
	Elektrostatische Aufladung		
6	Thermische Gefahren		
	Kontakt mit heißen Medien	Kontakt mit kalten Medien	
7	Spezielle physikalische Belastungen		
	Lärm	Ultraschall	Ganzkörperschwingungen
	Hand-Arm-Schwingungen	Nichtionisierende Strahlung	Ionisierende Strahlung
	Elektromagnetische Felder	Arbeiten in Über-/Unterdruck	Ertrinkungsgefahr
8	Belastungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen		
	Klima	Beleuchtung	Flächenbedarf, Verkehrswege
9	Physische Belastungen / Arbeitsschwere		
	Schwere dynamische Arbeit	Einseitige dynamische Arbeit, Körperbewegung	Körperhaltung, Haltungs-/ Haltearbeit
10	Belastung im Bereich der Wahrnehmung und Handhabbarkeit		
	Informationsaufnahme	Wahrnehmungsumfang	Erschwerte Handhabbarkeit von Arbeitsmitteln, Greifräume
11	Sonstige Gefahren / Belastungen		
	Persönliche Schutzausrüstung	Hautbelastung	Durch Menschen
	Durch Tiere	Durch Pflanzen / pflanzliche Produkte	Gerüche
12	Psychische Belastung durch die Arbeit		
	Arbeitstätigkeit	Arbeitsorganisation	Soziale Bedingungen
13	Belastung durch die Arbeitsorganisation		
	Arbeitsablauf	Arbeitszeit	Qualifikation
	Unterweisung	Verantwortung	Organisation, allgemein

Im Rahmen des hier durchgeführten Verfahrensvergleiches ließen sich jedoch nur einige der oben genannten Gefahrenarten berücksichtigen. Dies lag vor allem daran, dass viele davon sehr eng mit der Gestaltung einer konkreten Anlage (z.B. mechanische und elektrische Gefahren, Lärm, explosionsfähige Atmosphäre, Arbeitsumgebungsbedingungen) sowie der Arbeitsorganisation vor Ort (z.B. persönliche Schutzausrüstung, soziale Bedingungen, Arbeitsablauf) zusammenhängen. Dies war aber nicht Gegenstand des Verfahrensvergleiches. Relevant – weil relativ anlagenunabhängig – sind dagegen stoffbedingte Gefahren im Allgemeinen sowie biologische Gefahren und Brand- und Explosionsgefahren im Speziellen, aber auch thermische Gefahren oder Über-/Unterdruck bei der vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotentials.

7.3.3 Prozess- und anlagenbezogene Kriterien

7.3.3.1 Vorbemerkung

Prozess- und anlagenbezogene Kriterien spielen eine wichtige Rolle unter dem Gesichtspunkt der Anlagensicherheit, wobei für den Verfahrensvergleich im Weiteren nur prozessbezogene Parameter relevant sind. Während die nachfolgend betrachteten Gefahrenpotentiale von Stoffen sowie biologischen Arbeitsstoffen verhältnismäßig gut zugänglich waren, fanden sich zum prozess- und anlagenbezogenen Gefahrenpotential zwar viele Ansätze (Barth et al., 2001; BAuA, 2004a, 2004b, 2004c, IVSS, 1997; IVSS, 2000; Moch u. Stephan, 2001; Pilz et al., 1995; SFK, 2002), aber eigentlich relativ wenige konkrete Kriterien, die tatsächlich für einen Vergleich auf Basis des prozessbezogenen Gefahrenpotentials herangezogen werden konnten. Dazu trägt sicher bei, dass selbst viele der gesetzlichen Regelungen vor allem auf das Stoffinventar einer Anlage Bezug nehmen, kaum jedoch auf bestimmte Prozessparameter. (Diese stoffbezogenen Aspekte werden im Abschnitt 7.3.4 betrachtet.) Dennoch wird nachfolgend versucht, einige für einen Vergleich anwendbare prozessbezogene Kriterien aus der reichlich verfügbaren Literatur herauszuarbeiten. Vorweg soll jedoch zwischen einem bestimmungsgemäßen und einem nicht bestimmungsgemäßen Betrieb differenziert werden, da dieser Punkt in Betrachtungen zu Anlagensicherheit häufig eine wichtige Rolle spielt.

7.3.3.2 Bestimmungsgemäßer und nicht-bestimmungsgemäßer Betrieb

Viele Betrachtungen im Bereich der Anlagensicherheit unterscheiden zwischen einem bestimmungsgemäßen und einem nicht bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage. Darunter wird beispielsweise nach TRBA 400 (2001) der zulässige Betrieb einer Anlage verstanden, für den diese nach ihrem technischen Zweck bestimmt, ausgelegt und geeignet ist. Dieser umfasst dabei:

- den Normalbetrieb, einschließlich betriebsnotwendiger Eingriffe, wie z. B. der Probenahme, und der Lagerung mit Füll-, Umfüll- und Abfüllbetrieb,
- die Inbetriebnahme und den An- und Abfahrbetrieb,
- den Probetrieb,
- Instandhaltungsvorgänge und Reinigungsarbeiten sowie
- den Zustand der vorübergehenden Außerbetriebnahme.

Andererseits legen gerade Risikobetrachtungen meist ihren Focus auf den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb von Anlagen, um ausgehend davon Sicherheitsmaßnahmen festzulegen, die diesen nicht gewünschten Betriebszustand soweit wie möglich verhindern sollen. Tritt er doch ein, so kommt es zu Betriebsstörungen, Beinahestörfällen und Störfällen. Unter Sicherheitsaspekten am bedeutendsten sind dabei ungewollte Stofffreisetzungen, Explosionen und Brände (Pilz et al., 1995, TRGS 300, 1995). Dabei werden die Explosions- und Brandgefahren vor allem durch die im Unternehmen gehandhabten Stoffe verursacht und deswegen im Abschnitt 7.3.5 mitbehandelt. Bei den ungewollten Stofffreisetzungen kommen Faktoren hinzu, die mit der Anlage (z.B. Bruch einer Rohrleitung aufgrund von Korrosion), dem Prozess (z.B. ungesteuerter exothermer Prozess, überhöhter Druck), der Organisation (z.B. fehlende Umsetzung gesetzlicher Vorgaben) oder dem Personal (z.B. sicherheitswidriges Verhalten) zu tun haben. Von diesen vier Ansatzpunkten sind lediglich die prozessbezogenen Parameter für diese Untersuchung prinzipiell greifbar und von Interesse.

Damit geht es im Folgenden darum, bestimmte Prozesseigenschaften herauszuarbeiten, anhand derer sich das Gefahrenpotential von Prozessen zumindest näherungsweise beurteilen lässt. Das Gefahrenpotential der möglicherweise freigesetzten Stoffe oder auch gentechnisch veränderten Mikroorganismen wird dagegen über die dazu

weiter unten verfolgten Ansätze erfasst. Im nächsten Abschnitt soll untersucht werden, ob die Störfall-Verordnung Hinweise auf bestimmte geeignete Prozessparameter gibt.

7.3.3.3 Ansatz der Störfall-Verordnung (12. BImSchV)

Nach der Störfall-Verordnung (StörfallV, 2000) sind diejenigen Anlagenteile sicherheitsrelevant, bei deren Versagen oder Fehlen ein Störfall nicht auszuschließen ist. Dabei wird einerseits differenziert zwischen Anlagenteilen mit einem Stoffinhalt, der unter dem Störfallgesichtspunkt und damit aus dem Blickwinkel der Anlagensicherheit bedeutsam ist. Welche Stoffarten bzw. gefährlichen Stoffeigenschaften darunter zu verstehen sind, wird im Anhang mit Angabe von Mengenschwellen festgelegt. Diese Punkte werden indirekt über die Untersuchung der stoffbezogenen Gefahrenpotentiale berücksichtigt, so dass sich an dieser Stelle kein weiterer Verwendungsbedarf mehr ergibt.

Andererseits werden Anlagenteile mit besonderer Funktion und damit besonderer Störfallrelevanz hervorgehoben. Zu diesen Anlagenteilen gehören insbesondere Maschinen und Ausrüstungsteile zur Gewährleistung des sicherheitsrelevanten Energie- und Massenflusses (z.B. Pumpen, Ventile, Rohrleitungen, Energienotversorgung), Anlagenteile zur Ableitung, Beseitigung oder Rückhaltung gefährliche Stoffe (z.B. Filter- und Wäscheranlagen, Fackel- und Nachverbrennungsanlagen, Auffangbehälter, Schornstein), Brand- und Explosionsschutzeinrichtungen, Prozessleittechnik-Schutzeinrichtungen sowie Warn-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen. Da derartige Anlagen(teile) sehr anlagenspezifisch sind und entsprechende Informationen nicht vorliegen, konnten diese Punkte bei dem hier durchgeführten Vergleich nicht berücksichtigt werden. Es stellt sich aber auch die Frage, ob deren Berücksichtigung im Rahmen eines solchen Vergleiches tatsächlich zielführend wäre. Hinweise auf gefahrenrelevante Prozessparameter fehlen dagegen, so dass die Störfall-Verordnung hier nicht weiter hilft, jedoch bei der Bestimmung des stoffbedingten Gefahrenpotentials herangezogen wird (vgl. Abschnitt 7.3.4.3).

7.3.3.4 Sicherheitstechnik: Die TRGS 300

Auch die für diese Betrachtung wichtige TRGS 300 „Sicherheitstechnik“ hat über ihren Schwerpunkt – den Arbeitsschutz im Sinne der Gefahrstoffverordnung – hinaus Bedeu-

tung für den Schutz der Nachbarschaft und der Umwelt (TRGS 300, 1995). Die von ihr geforderte Sicherheitsbetrachtung gliedert sich in vier Arbeitsschritte:

- Ermittlung des Gefahrenpotentials
- Ermittlung der erforderlichen technischen und organisatorischen sicherheitsrelevanten Maßnahmen
- Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik
- Praxisorientierte Darstellung des Sicherheitskonzeptes, der Betriebsanweisungen und der Arbeitsorganisation sowie Umsetzung der technischen Maßnahmen

Wie schon weiter vorne angemerkt, geht auch hier der Schwerpunkt in Richtung Maßnahmenableitung. Der in diesem Projektteil durchgeführte Verfahrensvergleich ist jedoch angesichts der Fragestellung auf den ersten Schritt - die Ermittlung des Gefahrenpotentials - begrenzt, auf dem aber alle weiteren Schritte aufbauen. Des Weiteren gilt, dass die Ermittlung des Gefahrenpotentials schon aufgrund des Zieles, vor allem grundsätzliche Unterschiede zwischen den Verfahren herauszuarbeiten, auf einer abstrakteren Ebene bleiben muss. Es werden folglich keine konkreten Produktionsanlagen betrachtet. Damit kann auch kein Urteil darüber gefällt werden, inwieweit aus dem Gefahrenpotential resultierende Gefährdungen bzw. Risiken über technische, organisatorische oder personenbezogene Schutzmaßnahmen reduziert werden können bzw. in der Realität bereits reduziert worden sind.

Die TRGS 300 (1995) stellt im Anhang 1 Grunddaten zur Ermittlung des Gefahrenpotentials zur Verfügung. Aufgrund der Wichtigkeit für die Einschätzung bezüglich des Gefahrenpotentials, das mit einem Verfahren bzw. einer Anlage verbunden ist, werden diese in der folgenden Tabelle 7-3 dokumentiert und hinsichtlich ihrer Eignung für den Verfahrensvergleich kommentiert. Das Gefahrenpotential ist dabei von folgenden Faktoren abhängig (TRGS 300, 1995):

- Art des Gefahrstoffes
- Menge des Gefahrstoffes
- Verfahren, Arbeitsverfahren, technische Arbeitsmittel
- Art und Ausrüstung der Anlage

- Betriebszustand der Anlage
- Verwendungszweck der technischen Arbeitsmittel

Aus der folgenden Tabelle können zwei Sicherheitsgrundsätze ausgewählt werden, die für die Abschätzung eines prozessbezogenen Gefahrenpotentials in Frage kommen könnten: Die sichere Umschließung (offenes vs. geschlossenes Verfahren) sowie der Schutz vor den Auswirkungen durchgehender Reaktionen (Exotherme Reaktionen). Diese beiden Kriterien werden nachfolgend weiter verwendet.

Tabelle 7-3: Sicherheitsgrundsätze für Anlagen und Verfahren nach TRGS 300 (1995)

Nr.	Sicherheitsgrundsätze	Relevanz für den Verfahrensvergleich
Nr.	Allgemeine Sicherheitsgrundsätze	Anmerkung
1	Ersatz gefährlicher Stoffe und Zubereitungen	Stoffbezogenes Gefahrenpotential
2	Verringerung der eingesetzten Gefahrstoffmenge	Stoffbezogenes Gefahrenpotential + Mengen
3	Wahl von Verfahren mit möglichst geringen betriebsmäßigen Freisetzungen von Gefahrstoffen	Ökobilanzielle Betrachtung
4	Sichere Umschließung	Stoff- und prozessbezogenes Gefahrenpotential
5	Sichere Beherrschung des Stoffflusses	Prozessbezogenes Gefahrenpotential
6	Sachgemäßen Umgangs mit Gefahrstoffen sicherstellen sowie gegen Fehlhandlungen sichern	Organisation, Technik
7	Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre innerhalb und außerhalb der Umschließung	Stoffbezogenes Gefahrenpotential
8	Vermeiden von Zündquellen	Technik; stoffbezogenes Gefahrenpotential
9	Reduzierung der Exposition	Stoffbezogenes Gefahrenpotential, Technik, Organisation, persönliche Schutzausrüstung
10	Räumliche Trennung der Beschäftigten vom Gefahrenbereich	Technik, Organisation
Nr.	Störungsbezogene Sicherheitsgrundsätze	Anmerkung
1	Vorbeugender Brandschutz	Reduzierung der Brandlast
2	Abwehrender Brandschutz	Technik, Organisation
3	Schutz vor den Auswirkungen von Explosionen	Stoffbezogenes Gefahrenpotential (indirekt)
4	Schutz vor den Auswirkungen durchgehender Reaktionen	Prozessbezogenes Gefahrenpotential
5	Gewährleistung der Funktion von Alarmierungs- und Überwachungseinrichtungen	Technik, Anlage
6	Schutz vor den Auswirkungen bei der Freisetzung von Gefahrstoffen	Stoffbezogenes Gefahrenpotential
7	Erhalt der Versorgung mit sicherheitstechnisch bedeutsamen Betriebsmittel	Technik, Logistik
8	Erhalt der Wirksamkeit sicherheitstechnisch bedeutsamer Funktionselemente	Technik, Organisation
9	Anlage in einen sicheren Zustand überführen, einschließlich Sichern gegen Fehlhandlungen	Technik, Organisation
10	Schutz vor mechanischen Beanspruchungen	Technik, Organisation
11	Handlungsfähigkeit der Beschäftigten gewährleisten, inkl. Hilfs- und Rettungsdienste	Organisation, Qualifizierung
12	Allgem. Sicherheitsorganisation gewährleisten	Organisation, Qualifizierung, Technik,

7.3.3.5 Exotherme Reaktionen: Die TRAS 410

In der TRAS 410 (2000) wird darauf hingewiesen, dass die in verfahrenstechnischen Anlagen durchgeführten chemischen Reaktionen zu Gefahren führen können, wenn Drücke oder Temperaturen bei den Prozessen über die Auslegungsgrenzen der Anlagenteile ansteigen und unkontrolliert Energie und Stoffe freigesetzt werden. Deshalb macht diese Technische Regel praxisnahe Vorgaben zum Erkennen und Beherrschen exothermer Reaktionen. Auf Seite 8 f. listet sie dazu Kenngrößen und weitere anlagen- und prozessbezogene Informationen auf, die für den normalen Reaktionsablauf und für mögliche Störungen zu ermitteln sind, um den Verlauf der Reaktion und eventuelle Gefahren durch die exotherme Reaktion beurteilen zu können. Diese Zusammenstellung verdeutlicht aber auch, dass zu einer Beurteilung der in dieser Untersuchung betrachteten Prozesse hinsichtlich exothermer Reaktionen in größerem Umfang Daten benötigt würden, die fehlen bzw. nur mit erheblichem Aufwand beschafft werden können. Aus diesen Gründen wurde darauf verzichtet, diesen Punkt noch weiter zu betrachten, bei der Auswertung wurde jedoch darauf hingewiesen (vgl. Abschnitt 7.4.3.2)

7.3.3.6 Geräte- und Produktsicherheitsgesetz / Betriebssicherheitsverordnung

Sowohl in der Betriebssicherheits-Verordnung (BetrSichV, 2004) als auch im Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG, 2004, § 3) wird festgelegt, welche Anlagentypen überwachungsbedürftig sind. Dabei liegt ein Schwerpunkt bei Anlagen, die unter erhöhtem Druck stehen (Dampfkessel, Druckbehälter, Gasabfüllanlagen, Getränkeschankanlagen). Zudem werden Anlagen genannt, die sich in explosionsgefährdeten Bereichen befinden, bei Kontakt mit Wasser heftig Gase bilden oder zum Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten eingesetzt werden. Während die letzteren Varianten über das stoffbezogene Gefahrenpotential berücksichtigt werden, belegen die Vorgaben, dass der Druck, unter dem ein Prozess stattfindet, ein wichtiges Kriterium zur Bestimmung des prozessbezogenen Gefahrenpotentials sein kann. Dieser wird deshalb nachfolgend berücksichtigt.

7.3.3.7 Prozessbezogene Kriterien zur Beurteilung des Gefahrenpotentials

Insgesamt ließen sich nur wenige für einen Vergleich geeignete prozessbezogene Parameter identifizieren. Die meisten sicherheitstechnisch bedeutsamen Prozessbedingungen führt die Störfall-Kommission (2002) an: Druck, Temperatur, Exothermie der

Prozesse, Prozesse mit inhärenter Sicherheit, diskontinuierlicher vs. kontinuierlicher Betrieb. Die ebenfalls angeführte Anzahl der relevanten Gefahrenquellen gehört aus unserer Sicht in den Bereich des stoffbezogenen Gefahrenpotentials.

Zudem wird noch das Kriterium „Gefahren durch das Verfahren“ herangezogen, dass im stoffbezogenen Spaltenmodell nach TRGS 440 (2002) (vgl. Tabelle 7-9) verwendet wird. Mit diesem wird zwischen Verfahren differenziert, in denen Stoffe offen (sehr hohes Gefahrenpotential) oder geschlossen (geringes Gefahrenpotential) verarbeitet werden. Dieser Aspekt ist vergleichbar zum Kriterium „sichere Umschließung“ der TRGS 300.

Diese Kriterien wurden im Abschnitt 7.4.3.2 auf die betrachteten Prozesse angewendet. Da aus den vorliegenden Informationen nicht entnommen werden konnte, bei welcher Größenordnung ein Parameter kritisch wird bzw. wann dieser unkritisch ist, wird anhand dieser Kriterien keine Einstufung der Prozesse hinsichtlich des damit verbundenen prozessbezogenen Gefahrenpotentials vorgenommen. Aufgrund der entsprechenden Zusammenstellung lassen sich jedoch möglicherweise Unterschiede zwischen Verfahren erkennen und herausarbeiten.

7.3.3.8 Exkurs: Ökobilanz-Wirkungskategorie „Risiko von Betriebsstörungen“

Risiken, die sich aus nicht bestimmungsgemäßen Zuständen von Industrieanlagen sowie den mit dem Produktlebensweg verbundenen Transporten ergeben, werden bisher in Ökobilanzen kaum erfasst. In einer aktuellen Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Kurth et al., 2003) wurde untersucht, wie bisher in verschiedenen Ökobilanzen diesbezüglich vorgegangen worden ist und welche Methoden grundsätzlich in Frage kommen könnten, Risikoaspekte in Ökobilanzen sachgerecht zu berücksichtigen. Die in diesem Zusammenhang angestellten Überlegungen zielten schließlich daraufhin ab, eine neue Wirkungskategorie „Risiko von Betriebsstörungen“ einzuführen, die über eine sogenannte „Risikomaßzahl“ charakterisiert werden sollte. Die dafür am besten geeignet erscheinenden Methoden wurden auf zwei Verfahren der Polycarbonat-Herstellung angewendet und bezüglich ihrer Eignung und des erforderlichen Entwicklungsbedarfs beurteilt.

Da dieses Vorgehen insofern Ähnlichkeiten mit dem hier angestellten Vergleich aufweist, als dass zwei Produktionsverfahren unter Gefahren- bzw. Risikoaspekten mit-

einander verglichen wurden, scheint es uns wichtig, einen Bezug zwischen den beiden Vorhaben herzustellen und zuerst einen wichtigen Unterschied herauszustellen: Während es in der Untersuchung von Kurth et al. (2003) darum ging, alle risikorelevanten Informationen zu den verglichenen Verfahren in einen einzigen, möglichst aussagekräftigen Parameterwert für die Zwecke der Ökobilanzierung zusammenzufassen, verfolgten wir das Anliegen, die Unterschiede zwischen den Verfahren möglichst transparent und nachvollziehbar herauszuarbeiten, um so das Verständnis für die entscheidenden Parameter zu unterstützen, und damit eben nicht in Richtung Aggregation zu gehen.

Dennoch kann aus unserer Sicht die begrüßenswerte Entwicklung einer anerkannten Risikomaßzahl, über die das Risiko von Betriebsstörungen bzw. alternativ des Gefahrenpotentials eines Prozesses in einem einzigen Indikatorwert gefasst werden kann, von den unterschiedlichen Ansätzen nur profitieren. So wurde von Kurth et al. (2003) der sogenannte TX3-Indikator als einer von zwei aussichtsreichen Ansätzen identifiziert. Dieser weist weitgehende Ähnlichkeiten zu dem in der TRGS 440 (2002) vorgeschlagenen Spaltenmodell auf, das in dieser Untersuchung für die Bewertung des stoffbezogenen Gefahrenpotentials verwendet wurde (vgl. Abschnitt 7.3.4.3). Dabei greift das Spaltenmodell im Vergleich zum Indikator TX3 doppelt so viele Gefahrenbereiche (u.a. auch Umweltgefahren) auf, verzichtet aber andererseits auf eine Aggregation. Aus unserer Sicht könnte es deshalb sehr interessant sein, unter Berücksichtigung der in diesem Projekt gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse den Indikator TX3 – wie auch von Kurth et al. (2003) vorgeschlagen – für den Einsatz in der Ökobilanzierung weiterzuentwickeln. Zudem könnte auf diesem Wege möglicherweise auch eines der grundlegenden Probleme von Risikobetrachtungen – die kaum mögliche exakte Quantifizierung von Schadenseintritts-Wahrscheinlichkeiten – umgangen werden. Darüber hinaus zeigt auch diese Untersuchung, dass die für ein solches Vorgehen benötigten Stoffdaten meist verfügbar sind und zudem die Stoffflussmodellierung im Ökobilanz-Rahmen eine gute Ausgangsbasis für diesbezügliche Recherchen und Vergleiche darstellt. Auf diese Punkte wird im Rahmen des abschließenden Fazits (vgl. Abschnitt 7.5) kurz noch einmal Bezug genommen.

7.3.4 Beurteilung des mit Gefahrstoffen verbundenen Gefahrenpotentials

7.3.4.1 Vorbemerkung

Wie oben beschrieben, stellt das Stoffinventar einer Anlage ein entscheidendes Kriterium für Betrachtungen zur Anlagensicherheit dar. Deshalb kommt der Bewertung des Gefahrenpotentials der Stoffe, die in den beiden Verfahren verwendet werden bzw. als Zwischen-, Haupt- und Nebenprodukte entstehen, eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung des Gefahrenpotentials der beiden miteinander verglichenen Prozesse zu. Dabei gilt allgemein, dass die Gefahr, die mit der Verwendung eines Stoffes verbunden ist, sowohl von dessen Eigenschaften als auch von der Menge abhängt.

Exponiert wird dieser Gesichtspunkt in der Störfall-Verordnung (2000) aufgegriffen. Diese verfolgt das Ziel, Störfälle zu verhindern und damit vor allem die Anwohner und die lokale Umwelt, aber implizit auch die Arbeitnehmer, vor Auswirkungen zu schützen, die möglicherweise mit einem Störfall einhergehen würden. Dazu legt sie in Abhängigkeit von den Stoffmengen, die in einer Anlage vorhanden sind, und den Eigenschaften dieser Stoffe Mengenschwellen fest, nach deren Überschreiten ein Anlagenbetreiber spezifische Sicherheitsmaßnahmen umzusetzen hat. Aber auch im Bereich des Arbeitsschutzes sowie des Um

weltschutzes – insbesondere bei der mit der Altlastenproblematik verknüpften Verschmutzung von Boden und Grundwasser – kommt den Eigenschaften der in einer Anlage eingesetzten Stoffen eine maßgebliche Rolle zu. Deshalb werden im Folgenden wesentliche Aspekte zur Charakterisierung des stoffbedingten Gefahrenpotentials dargestellt und abschließend die Vorgehensweise bei der Auswertung erläutert. Auch hier bestand die Zielsetzung wiederum darin, auf die in gesetzliche Regelungen vorhandenen Bewertungskriterien zurückzugreifen.

7.3.4.2 Eigenschaften und Charakterisierung von Gefahrstoffen

Das Chemikaliengesetz (ChemG, 2003) zielt darauf ab, schädliche Einwirkungen gefährlicher Stoffe auf die Umwelt, die menschliche Gesundheit und den Arbeitnehmer beim Umgang mit Gefahrstoffen zu verhindern. Deshalb werden im § 3a Merkmale (vgl. Tabelle 7-4) definiert, die einen Stoff oder eine Zubereitung als gefährlich charakterisieren. Ausgeschlossen werden dabei jedoch gefährliche Eigenschaften ionisierender Strahlen. Näher beschrieben werden diese Gefährdungsmerkmale im § 4 der Ge-

fahrstoffverordnung (GefStoffV, 2004), die zudem aus dem Chemikaliengesetz als weitere Eigenschaften die Explosionsfähigkeit sowie die Fähigkeit zur chronische Schädigung ableitet. Die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2004, § 2) schließt aus ihrem Gültigkeitsbereich biologische Arbeitsstoffe im Sinne der Biostoff-Verordnung (BioStoffV, 2003) aus. Dementsprechend und aufgrund des deutlich andersgearteten Gefahrenpotentials wird auf biologische Arbeitsstoffe im Abschnitt 7.3.5 separat eingegangen.

Im Chemikaliengesetz (ChemG, 2003, § 3a) und der Gefahrstoffverordnung wird zudem übereinstimmend definiert, wann ein Stoff oder eine Zubereitung als „umweltgefährlich“ zu bezeichnen ist: Dies trifft dann zu, wenn diese(r) selbst oder in Form von Umwandlungsprodukten die Beschaffenheit des Naturhaushaltes, von Wasser, Boden oder Luft, Klima, Tieren, Pflanzen oder Mikroorganismen derart ändern kann, dass dadurch sofort oder später Gefahren für die Umwelt herbeigeführt werden können. Eine Sonderrolle kommt den in § 3b ChemG ergänzend aufgeführten, hier nicht weiter relevanten Biozid-Produkten zu, deren Auswirkungen auf die Umwelt teils gewollt sind, teils aber auch ungewollt sein können.

Tabelle 7-4: Gefahrenmerkmale von Gefahrstoffen (ChemG, 2003; GefStoffV, 2004)

Nr.	Eigenschaft	Nr.	Eigenschaft	Nr.	Eigenschaft
1	explosionsgefährlich	7	giftig	13	fortpflanzungsgefährdend
2	brandfördernd	8	gesundheitsschädlich	14	erbgutverändernd
3	hochentzündlich	9	ätzend	15	umweltgefährlich
4	leichtentzündlich	10	reizend	16	explosionsfähig
5	entzündlich	11	sensibilisierend	17	chronisch schädigend
6	sehr giftig	12	krebserzeugend		

Die Wichtigsten dieser Gefahrenmerkmale werden zudem durch die in der folgenden Tabelle dargestellten international gebräuchlichen Warnzeichen für die Kennzeichnung gefährlicher Stoffe repräsentiert. Für einige Gefahrenmerkmale (entzündlich, explosionsfähig, sensibilisierend, krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend, erbgutverändernde, chronisch schädigend) gibt es zwar kein eigenes Gefahrensymbol, teilweise ist es jedoch sachlich gerechtfertigt und auch gebräuchlich, für solche Eigenschaften eines der vorhandenen Gefahrensymbole zu verwenden. So wird beispielsweise für das Gefahrenmerkmal „krebserzeugend“ das Gefahrensymbol „Giftig“ verwendet.

Tabelle 7-5: Gefahrensymbole und Gefahrenbezeichnungen für gefährliche Stoffe und Zubereitungen (RL 67/548/EWG, 2003)

				
E Explosionsgefährlich	O Brandfördernd	F+ Hochentzündlich	F Leichtentzündlich	T+ Sehr giftig
				
T Giftig	C Ätzend	Xi Reizend	Xn Gesundheitsschädlich	N Umweltgefährlich

R-Sätze

Bei den R-Sätzen (risk information) handelt es sich um ein auf europäischer Ebene zwingend vorgegebenes Schlüsselsystem, über das die mit gefährlichen Stoffen verbundenen besonderen Gefahren ausgehend von den Gefährlichkeitsmerkmalen (vgl. Tabelle 7-4) und Gefahrensymbolen (vgl. Tabelle 7-5) detaillierter angegeben werden können - beispielsweise in Sicherheitsdatenblättern oder auf Verpackungen. Die Anzahl und Formulierung der R-Sätze selbst ist in der Richtlinie RL 67/548/EWG (2003) festgelegt. Je nach Bedarf oder vorgegebener Kombination können diese miteinander kombiniert werden (z.B. R39/26/27/28 Sehr giftig, ernste Gefahr irreversiblen Schadens durch Einatmen, Berührung mit der Haut und durch Verschlucken). Derzeit gibt es 68 R-Sätze, von denen beispielsweise mehrere in Frage kommen, wenn es darum geht, die Eigenschaft „explosionsgefährlich“ zu charakterisieren (z.B. R1: In trockenem Zustand explosionsgefährlich; R2: Durch Schlag, Reibung, Feuer oder andere Zündquellen explosionsgefährlich; R3: Durch Schlag, Reibung, Feuer oder andere Zündquellen besonders explosionsgefährlich; R4: Bildet hochempfindliche explosionsgefährliche Metallverbindungen). Damit bieten die R-Sätze, die im Anhang dokumentiert sind, eine sehr gute und im Folgenden genutzte Grundlage, Stoffe hinsichtlich ihres Gefah-

renpotentials zu charakterisieren. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass die Störfall-Verordnung (StörfallV, 2000) bei der Einstufung von Anlagen hinsichtlich des Störfall-Risikos ebenso darauf zurückgreift. Auch die in Abschnitt 7.3.4.3 beschriebene Bewertung nach dem Spaltenmodell nach TRGS 440 geht vor allem von den R-Sätzen aus.

Sonstige Informationen

Darüber hinaus sind eine Reihe weiterer Informationen wichtig und hilfreich für die Beurteilung des mit Stoffen verbundenen Gefahrenpotentials. Hier sind insbesondere Angaben zu arbeitnehmerbezogenen Grenzwerten (MAK- und BAT-Werte), zur Wassergefährdung und zur Brand- und Explosionsgefahr zu nennen. Auf diese Punkte wird anschließend noch kurz eingegangen. Des Weiteren sind weitere stoffbezogene Daten (Summenformel, Strukturformel, CAS-Nummer, physikalische Größen, etc.) sowie Angaben zur akuten und chronischen Toxizität (EC50, LC50, LD50; krebserzeugende, mutagene und fortpflanzungsgefährdende Eigenschaften von Interesse. Entsprechenden Angaben werden für die relevanten Stoffe im Abschnitt 0 sowie ausführlicher im Anhang dokumentiert und geben bereits einen ersten Überblick zu den mit dem Stoffeinsatz verbundenen Gefahrenpotential.

Arbeitnehmer-bezogene Grenzwerte: MAK- und BAT-Werte

Bei der Bewertung der unerwünschten Wirkung, die von einem Gefahrstoff ausgehen kann, ist neben der Stoffart insbesondere wichtig, ab welcher Dosis die negative Wirkung auftritt bzw. welche Dosis unter dem Gesichtspunkt des Arbeitsschutzes noch akzeptierbar ist. Entsprechende Informationen sind erforderlich, um Grenzwerte beispielsweise unter dem Gesichtspunkt des Arbeitsschutzes festzulegen. Wichtige Angaben zu solchen Grenzwerten finden sich insbesondere in der TRGS 900 (2003) zu den Maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK) sowie in der TRGS 903 (2002) zu den Biologischen Arbeitsplatztoleranzwerte (BAT). Während die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) die Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz ist, bei der im allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird, gibt der Biologische Arbeitsplatztoleranzwert in etwa an, bis zu welcher Konzentration eines Stoffes im Körper im Allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird.

Wassergefährdung

Nach VwVwS (1999) werden Stoffe, Stoffgruppen und Gemische, die geeignet sind, die physikalische, chemische und biologische Beschaffenheit von Wasser nachteilig zu verändern, entsprechend ihrer diesbezüglichen Gefährlichkeit in Wassergefährdungsklassen (WGK) eingestuft. Nach den länderspezifischen Verordnungen¹ über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BayVAwS, 2003) werden Anlagen(bereiche) entsprechend der Wassergefährdungsklasse der dort gehandhabten Stoffe sowie der davon in der Anlage befindlichen Volumina bzw. Massen in verschiedene Gefährdungsstufen eingeteilt. Dabei wird zwischen den Stufen A bis D differenziert, wobei Stufe D die höchste Gefährdungsstufe darstellt (vgl. Tabelle 7-6). Damit ergibt sich eine klare Bewertung des Gefahrenpotentials hinsichtlich der Wassergefährdung.

Tabelle 7-6:: Gefährdungsstufen von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BayVAwS, 2003, § 6)

Volumen (m ³) / Masse (t)	Wassergefährdungsklasse (WGK)		
	1	2	3
bis 0,1	Stufe A	Stufe A	Stufe A
mehr als 0,1 bis 1,0	Stufe A	Stufe A	Stufe B
mehr als 1 bis 10	Stufe A	Stufe B	Stufe C
mehr als 10 bis 100	Stufe A	Stufe C	Stufe D
mehr als 100 bis 1000	Stufe B	Stufe D	Stufe D
über 1000	Stufe C	Stufe D	Stufe D

Stoffbedingte Brand- und Explosionsgefahr

Brände und Explosionen sind diejenigen nicht bestimmungsgemäßen Anlagenbetriebszustände, die in der Regel mit dem größten Gefährdungspotential für die Arbeitnehmer, die Nachbarschaft und die Umwelt allgemein verbunden sind (vgl. die Zielsetzung in StörfallV, 2000, § 4). Vor diesem Hintergrund ist es wesentlich, die diesbezüglich relevanten Eigenschaften eingesetzter Arbeitsstoffe zu kennen. Nach Wegfall der Verord-

¹ Bei der entsprechenden Verordnung handelt es sich um Landesrecht. Deshalb gibt es geringfügige Abweichungen zwischen den Bundesländern bei der Gefährdungseinstufung. Im Folgenden wird auf die Bayerische Anlagenverordnung (BayVAwS) Bezug genommen.

nung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) im Jahr 2002 erfolgt deren Einstufung entsprechend der Gefahrstoff-Verordnung und damit über die oben thematisierten R-Sätze. Dies gilt analog für explosionsgefährliche bzw. explosionsfähige Stoffe und Zubereitungen. Damit reicht die Kenntnis der R-Sätze weitgehend aus, um einen Arbeitsstoff bezüglich der Brand- und Explosionsgefahren zu charakterisieren.

7.3.4.3 Bewertung des stoffbedingten Gefahrenpotentials nach der Störfall-Verordnung und dem Spaltenmodell der TRGS 440

In einem ersten Schritt wurde die Forderung der Gefahrstoff-Verordnung an den Arbeitgeber, ein Verzeichnis aller Gefahrstoffe zu erstellen (GefStoffV, 2004, § 16), mit denen im Betrieb umgegangen wird bzw. die freigesetzt werden können, aufgegriffen. In einer umfangreichen Recherche wurden für alle oberhalb einer gewissen Mengenschwelle (vgl. Abschnitt 7.4.1) beteiligten Stoffe, wesentliche Informationen zur Charakterisierung des damit verbundenen Gefahrenpotentials zusammengetragen (vgl. Abschnitt 0). Dabei stellte sich die Frage der Bewertung, die im Folgenden weiter behandelt wird.

Stoffbezogenes Gefahrenpotential nach der Störfallverordnung

In diesem Zusammenhang wurde für jeden Stoff geprüft, ob es eine Mengenschwelle im Anhang I (Spalte 4) der Störfall-Verordnung (StörfallV, 2000) gibt und wie hoch diese liegt. Dahinter stand der Gedanke, dass die Störfall-Verordnung an dieser Stelle eine Bewertung von Stoffen vorgibt, die bei der Beurteilung des stoffbedingten Gefahrenpotentials herangezogen werden kann. So legt die Störfall-Verordnung explizit für besonders relevante Stoffe sowie summarisch für Stoffe mit bestimmten gefährlichen Eigenschaften zwei Mengenschwellen fest. Werden diese Stoffmengen in einer Anlage überschritten, sind jeweils spezifische Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Aus den dabei berücksichtigten Gefahrenmerkmale bzw. R-Sätzen lässt sich die Werthaltung ablesen, die der Festlegung der Mengenschwellen zu Grunde liegt und damit letztendlich dem Ansatz der Störfall-Verhinderung (vgl. Tabelle 7-7) So werden zum Einen Stoffe negativ bewertet, die sehr giftig bzw. giftig oder umweltgefährlich sind und damit im Falle eines Störfalles mit einem großen Schadenspotential verbunden sind. Zum Anderen geht es um Stoffe, die leicht entzündlich bis hin zu explosionsgefährlich sind (StörfallV, 2000, Anh. I; SFK, 2000, Anl. 2) und die damit häufig eine wesentliche Rolle bei Bränden und Explosionen spielen. Zur Identifizierung und Zusammenfassung

solcher Stoffe werden dort analog zur Einstufung von Stoffen nach dem anschließend erläuterten Spaltenmodell der TRGS 440 R-Sätze sowie wenige weitere Informationen zur Entzündlichkeit herangezogen. Diese implizite Bewertung des Gefahrenpotentials von Stoffen deckt sich weitgehend mit derjenigen im Spaltenmodell, das ebenfalls diese Kriterien betrachtet, dabei jedoch diesen Ansatz auf insgesamt sechs Gefahrenkategorien erweitert und deshalb eine bedeutendere Rolle bei der Bewertung der stoffbezogenen Gefahrenpotentiale in diesem Forschungsvorhaben hat.

Tabelle 7-7: Eigenschaftsbezogene Mengenschwellen für gefährliche Stoffe in der Störfall-Verordnung (StörfallV, 2000, SFK, 2000, Anl. 2)

Kat.- Nr.	Stoffeigenschaften	Mengenschwellen [kg]		R-Satz*
		Spalte 4	Spalte 5	
<i>Gruppe 1: Giftige und umweltgefährliche Stoffe</i>				
1	Sehr giftig	5.000	20.000	R26, R27, R28
2	Giftig	50.000	200.000	R23, R24, R25
10b	Entwickelt bei Berührung mit Wasser giftige Gase	50.000	200.000	R29
9a	Umweltgefährlich	200.000	500.000	R50, R50/53
9b	Umweltgefährlich	500.000	2.000.000	R51/53
<i>Gruppe 2: Brandfördernde, entzündliche und explosionsgefährliche Stoffe</i>				
5	Explosionsgefährlich	10.000	50.000	R3
8	Hochentzündlich	10.000	50.000	R 10 (wenn entzündlich und leichtentzündlich > Siedepunkt), R12 (wenn Flammpunkt < 0°C und Siedepunkt < 35°C oder gasförmig und an Luft entzündlich)
3	Brandfördernd	50.000	200.000	R7, R8, R9
4	Explosionsgefährlich	50.000	200.000	R2
7a	Leichtentzündlich	50.000	200.000	R10 (wenn Flammpunkt < 55°C und unter Druck flüssig), R17
10a	Reagiert heftig mit Wasser	100.000	500.000	R14
10a	Reagiert heftig mit Wasser unter Bildung hochentzündlicher Gase	100.000	500.000	R14/15
6	Entzündlich	5.000.000	50.000.000	R10
7b	Leichtentzündliche Flüssigkeiten	5.000.000	50.000.000	R11

* Die Störfall-Verordnung orientiert sich zwar an den R-Sätzen, übernimmt diese teils jedoch nicht direkt. In diesen Fällen findet sich hinter dem R-Satz in Klammern die nähere Erläuterung.

Stoffbezogenes Gefahrenpotentials nach dem Spaltenmodell der TRGS 440

Das in der TRGS 440 (2002) beschriebene Spaltenmodell erlaubt anhand weniger Informationen einen schnellen Vergleich von Stoffen und Zubereitungen hinsichtlich des in fünf Kategorien aufgeteilten Gefahrenpotentials, das mit diesen verbunden ist (vgl. Tabelle 7-8). Soweit vorhanden können die erforderlichen Angaben dem Sicherheitsdatenblatt (vgl. RL 67/548/EWG; 2003; GefStoffV, 2004) entnommen werden, das vom Hersteller eines Stoffes zu erstellen ist. Dieses nachfolgend beschriebene Verfahren wurde zur Gefahrenvermittlung und Ersatzstoffprüfung entwickelt, die durch § 16 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2004) vom Arbeitgeber gefordert wird. Gleichzeitig liegt damit auch eine anerkannte, praxisnahe und transparente Methode vor, das Gefahrenpotential, das mit dem Einsatz von Stoffen verbunden ist, qualitativ zu charakterisieren und zu differenzieren. Da zudem die dafür benötigten Informationen für die meisten der in dem anschließenden Verfahrensvergleich relevanten Stoffe vorliegen, orientiert sich die Beurteilung des stoffbedingten Gefahrenpotentials an dieser Methodik.

Tabelle 7-8: Beurteilung des Gefahrenpotentials der eingesetzten Stoffe nach dem Spaltenmodell (BIA, 2001; TRGS 440, 2002, Anl. 2) - Gesundheitsgefahren

Nr.	Akute Gesundheitsgefahren¹⁾ (einmalige Einwirkung, z.B. Chemieunfall)	Chronische Gesundheitsgefahren (wiederholte Einwirkung)
1	SEHR HOCH	
	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr giftige Stoffe / Zubereitungen (R26, R27, R28) - Stoffe / Zubereitungen, die bei Berührung mit Säure sehr giftige Gase bilden können (R32) 	<ul style="list-style-type: none"> - Krebserzeugende Stoffe der Kategorien 1 oder 2 (R45, R49, Carc.Cat.1, Carc.Cat.2, K1, K2) - Erbgutverändernde Stoffe der Kategorien 1 oder 2 (R46, Mut.Cat.1, Mut.Cat.2, M1, M2) - Zubereitungen, die krebserzeugende oder erbgutverändernde Stoffe der Kategorien 1 oder 2 in einer Konzentration $\geq 0,1$ % enthalten.
2	HOCH	
	<ul style="list-style-type: none"> - Giftige Stoffe / Zubereitungen (R23, R24, R25) - Stark ätzende Stoffe / Zubereitungen (R35) - Stoffe/Zubereitungen, die bei Kontakt mit Wasser bzw. Säure giftige Gase bilden können (R29, R31) - Hautsensibilisierende Stoffe (R43, Sh) - Atemwegssensibilisierende Stoffe (R42, Sa) - Zubereitungen, die haut- oder atemwegssensibilisierende Stoffe in einer Konzentration ≥ 1 % enthalten 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortpflanzungsgefährdende Stoffe der Kategorien 1 oder 2 (R60, R61, Repr.Cat.1, Repr.Cat.2, Re1, Re2, Rf1, Rf2) - Zubereitungen, die fortpflanzungsgefährdende Stoffe der Kategorien 1 und 2 in einer Konzentration $\geq 0,5$ % (bei Gasen $\geq 0,2$ %) enthalten - Krebserzeugende Stoffe der Kategorie 3 (R40, Carc.Cat.3, K3) - Erbgutverändernde Stoffe der Kategorie 3 (R40, Mut.Cat.3, M3) - Stoffe, die sich im Körper anreichern können (R33) - Zubereitungen, die krebserzeugende oder erbgutverändernde Stoffe in einer Konzentration ≥ 1 % enthalten
3	MITTEL	
	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädliche Stoffe / Zubereitungen (R20, R21, R22) - Stoffe, die sich in der Muttermilch anreichern können (R64) - Ätzende Stoffe / Zubereitungen (R34, $\text{pH} \geq 11,5$, $\text{pH} \leq 2$) - Augenschädigende Stoffe (R41) - Nichttoxische Gase, die durch Luftverdrängung zur Erstickenen führen können (z.B. Stickstoff) 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortpflanzungsgefährdende Stoffe der Kategorien (R62, R63, Repr.Cat.3, Re3, Rf3) - Zubereitungen, die fortpflanzungsgefährdende Stoffe der Kategorie 3 in einer Konzentration ≥ 5 % enthalten (bei Gasen ≥ 1 %)
4	GERING	
	<ul style="list-style-type: none"> - Stoffe / Zubereitungen, die beim Schlucken Lungenschäden verursachen (R65) - Reizende Stoffe / Zubereitungen - Hautschädigungen bei Feuchtarbeit - Hautschädigende Stoffe / Zubereitungen (R66) - Dämpfe erzeugen Schläfrigkeit und Benommenheit (R67) 	<ul style="list-style-type: none"> - Auf sonstige Weise chronisch schädigende Stoffe (kein R-Satz, aber trotzdem Gefahrstoff!)
5	VERNACHLÄSSIGBAR	
	<ul style="list-style-type: none"> - erfahrungsgemäß unbedenkliche Stoffe (z.B. Wasser, Zucker, Paraffine) 	
¹⁾ Tritt R 48 zusammen mit R 20, 21, 22, 23, 24 oder 25 auf, so führt dies zu einer Höhergruppierung um eine Stufe, da es sich auch um eine chronische Gesundheitsgefahr handelt.		

Tabelle 7-9: Beurteilung des Gefahrenpotentials der eingesetzten Stoffe nach dem Spaltenmodell (BIA, 2001; TRGS 440, 2002, Anl. 2) – Umweltgefahren, Brand- und Explosionsgefahren, Gefahren durch das Freisetzungsverhalten, Gefahren durch das Verfahren

Nr.	Umweltgefahren ¹⁾	Brand- und Explosionsgefahren ²⁾	Gefahren durch das Freisetzungsverhalten	Gefahren durch das Verfahren
1	SEHR HOCH			
	- Stoffe* mit dem Gefahrensymbol N und den Gefahrenbezeichnungen R50, R51, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R59 - Stoffe der Wassergefährdungsklasse (WKG) 3	- Explosionsgefährliche Stoffe (R2, R3) - Hochentzündliche Gase und Flüssigkeiten (R12; Flammpunkt < 0°C und Siedepunkt ≤ 35°C) - Selbstentzündliche Stoffe (R17)	- Gase - Flüssigkeiten mit einem Dampfdruck von 250 hPa - Staubende Feststoffe - Aerosole	- Offene Verarbeitung - Möglichkeit direkten Hautkontaktes - Großflächige Anwendung
2	HOCH			
		- Leichtentzündliche Stoffe (R11; Flammpunkt 0 - 21°C) - Stoffe, die mit Wasser hochentzündliche Gase bilden (R15) - Brandfördernde Stoffe (R7, R8, R9) - Stoffe mit bestimmten Eigenschaften (R1, R4, R5, R6, R7, R14, R16, R18, R19, R30, R44)	Flüssigkeiten mit einem Dampfdruck von 50 – 250 hPa (z.B. Methanol)	
3	MITTEL			
	- Stoffe ohne Gefahrensymbol N, aber mit den Gefahrenbezeichnungen R52, R53, R59 - Stoffe mit WGK 2	Entzündliche Stoffe (R10; Flammpunkt 21 - 55°C)	Flüssigkeiten mit einem Dampfdruck von 10 – 50 hPa (mit Ausnahme von Wasser; z.B. Toluol)	Geschlossene Verarbeitung mit Expositionsmöglichkeiten (z.B. beim Abfüllen, bei Probennahme oder bei Reinigung)
4	GERING			
	Stoffe mit WGK 1	Schwerentzündliche Stoffe (Flammpunkt 55 – 100°C)	Flüssigkeiten mit einem Dampfdruck von 2 – 10 hPa	
5	VERNACHLÄSSIGBAR			
	Nicht wassergefährdende Stoff	Unbrennbare oder nur sehr schwer entzündliche Stoffe (bei Flüssigkeiten Flammpunkt > 100°C)	- Flüssigkeiten mit einem Dampfdruck < 2 hPa (z.B. Glykol) - nichtstaubende Feststoffe	- Geschlossene, dichte Anlage - Geschlossene Anlage mit Absaugung an den Austrittsstellen
* Stoffe steht sowohl für Stoffe als auch für Zubereitungen				
¹⁾ Einstufung nach RL 1999/45/EG, RL 91/414/EWG und RL 98/8/EG für Stoffe ab 30.07.2002, für Zubereitungen ab 30.08.2004 zwingend vorgeschrieben; falls noch keine entsprechende Einstufung erfolgt ist, kann ersatzweise und nur dann die WGK-Einstufung verwendet werden.				
²⁾ Für explosionsfähige Stäube im Einzelfall fachkundig zu prüfen; deshalb keine Zuordnung.				

Bei der Verwendung des Spaltenmodells für vergleichende Bewertungen dürfen diese dabei immer nur innerhalb einer Spalte, keinesfalls jedoch innerhalb einer Zeile vorgenommen werden. Die Spalten „akute Gesundheitsgefahren“ und „chronische Gesundheitsgefahren“ zählen dabei als eine Spalte. Nicht behandelt wird im Spaltenmodell die Beurteilung des Gefahrenpotentials, das mit dem Einsatz biologischer Arbeitsstoffe verbunden ist. Diesbezüglich haben wir uns für eine Vorgehensweise entschieden, die sich eng am Spaltenmodell orientiert (vgl. Abschnitt 7.3.5).

Die TRGS 440 (2002) macht auch Vorschläge, wie bei einer Einstufung von Arbeitsstoffen vorzugehen ist, wenn keine bzw. unvollständige Informationen zum Gefahrenpotential vorliegen. Die Einstufung hat dabei nach gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen zu erfolgen und sollte in der in Tabelle 7-10 dargestellten Reihenfolge erfolgen.

Tabelle 7-10: Gefahrenbezogene Einstufung von Arbeitsstoffen, zu denen keine bzw. unzureichende Informationen vorliegen (TRGS 440, 2002, S. 8)

Rang	Grundlagen der Einstufung
1	Stoffe, die nach Anhang I der Richtlinie 67/548/EWG einschließlich der zugehörigen Änderungs- und Anpassungsrichtlinien als gefährlich eingestuft sind
2	Krebserzeugende Gefahrstoffe nach § 35 Gefahrstoff-Verordnung
3	TRGS 905 - Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoff; TRGS 907 - Verzeichnis sensibilisierender Stoffe
4	Erkenntnisse nach § 4a Abs. 3 Gefahrstoff-Verordnung: a) Ergebnisse der Prüfungen nach §§ 7, 9 und 9a des Chemikalien-Gesetzes b) wissenschaftliche Erkenntnisse, z.B. Einstufungen durch die MAK-Kommission c) in einem Zulassungsverfahren gewonnene Erkenntnisse
5	Branchenspezifische Literatur

Bei der Beurteilung von Arbeitsstoffen sollten dabei mindestens Daten zur akuten Toxizität, Hautreizung, Schleimhautreizung und zum erbgutverändernden Potential vorliegen. Gibt es keinen Hinweis des Herstellers, dass entsprechende Auswirkungen nicht zu erwarten sind, so ist davon auszugehen, dass die entsprechenden Eigenschaften vorhanden sind. Dann ist wie in Tabelle 7-11 dokumentiert vorzugehen. Bei dem in Abschnitt 0 durchgeführten Vergleich des Gefahrenpotentials waren auch Zwischenprodukte zu betrachten, die nicht als Handelsprodukte auftreten und zu denen deswegen nur rudimentäre Daten recherchiert werden konnten. Wir hielten es dennoch nicht für angemessen, diese Zwischenprodukte entsprechend dieser Vorgabe einzustufen,

da in manchen Fällen vorhandene Informationen ein sehr geringes Gefahrenpotential vermuten ließen, das Vorgehen nach TRGS 440 aber zu einem deutlich höheren Gefahrenpotential geführt hätte.

Tabelle 7-11: Umgang mit Datenlücken bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials nach dem Spaltenmodell (BIA, 2001; TRGS 440, 2002)

Nr.	Fehlende Angaben zu	Einstufung
1	Haut-/Schleimhautreizung	Akute Gesundheitsgefahren: mindestens „gering“ (analog „reizend“ R36/37/38)
2	Akute Toxizität	Akute Gesundheitsgefahren: „hoch“ (analog „giftig“ R23/24/25)
3	Toxizität bei wiederholter Applikation	Chronische Gesundheitsgefahren: „hoch“
4	Mutagenität (erbgutverändernde Wirkung)	Chronische Gesundheitsgefahren: „hoch“ (analog „erbgutverändernd Kategorie 3“, R40)

Bezüglich fester Stoffe wurde davon ausgegangen, dass diese nicht staubend sind und damit die Gefahren durch das Freisetzungverhalten als vernachlässigbar angesehen wird. Fehlten bei Flüssigkeiten Angaben zum Dampfdruck, wurde auf eine Einstufung in dieser Spalte verzichtet.

Die Gefahren durch das Verfahren ließen sich nicht eindeutig feststellen, da hierfür nähere anlagen- und tätigkeitsbezogene Informationen erforderlich gewesen wären. Einerseits steht fest, dass bei beiden Verfahren die geschlossene Verarbeitung dominiert, so dass eine Einstufung „sehr hohes Gefahrenpotential“ nicht mehr in Frage kommt. Andererseits ist nicht auszuschließen, dass beim Abfüllen, bei Reinigungsvorgängen oder bei Probennahmen die Möglichkeit einer Exposition besteht. Entsprechend haben wir alle betrachteten Prozesse in die Kategorie „mittleres Gefahrenpotential durch das Verfahren“ eingestuft.

Da uns nicht bekannt war, ob alle wassergefährdenden Stoffe bereits nach ihren Umweltauswirkungen in R-Sätze zugeordnet worden sind, haben wir bei der Einstufung auf die in der Regel relativ einfach verfügbare Wassergefährdungsklasse (WGK) zurückgegriffen.

Fazit: Das Spaltenmodell nach TRGS 440 (2002) bietet einen differenzierten und dennoch einfachen Ansatz zur Darstellung und darauf basierenden verbalargumentativen Bewertung des stoffbezogenen Gefahrenpotentials. Bei der Beantwortung der Frage, ob ein Stoff bezüglich des Gefahrenpotentials besser als der andere ist, gibt es dann eine klare Entscheidung, wenn der verglichene Arbeitsstoff in allen Spalten besser abschneidet. Andernfalls hat eine argumentative Abwägung zu erfolgen. Analog wird dies auf die Bewertung des stoffbezogenen Gefahrenpotentials der betrachteten Prozesse und Verfahren übertragen.

7.3.5 Gefahrenpotential biologischer Arbeitsstoffe

7.3.5.1 Vorbemerkung

Vor allem in den letzten zehn Jahren wurde ein umfangreiches und weit ausdifferenziertes Instrumentarium zur Bewertung der Gefahren, Gefährdungen und Risiken entwickelt, die mit dem gezielten Einsatz biologischer Arbeitsstoffe bzw. mit deren Vorhandensein bei Arbeitsvorgängen verbunden sind. Die dazu sowohl auf europäischer als auch nationaler Ebene geschaffenen Rechtsvorgaben bieten ein konsistentes System der gefahrenbezogenen Einstufung von Mikroorganismen und der mit diesen durchgeführten Tätigkeiten. Unter engem Bezug darauf werden im Folgenden diejenigen Kriterien herausgearbeitet, die für eine Beurteilung des Gefahrenpotentials der im biotechnischen Produktionsprozess eingesetzten Mikroorganismen (vgl. Abschnitt 0) geeignet sind. Dabei wird zuerst auf die für Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen gesetzlich vorgeschriebene Gefährdungsbeurteilung eingegangen. Anschließend wird die Bestimmung des Gefahrenpotentials für Mikroorganismen im Allgemeinen sowie im darauf folgenden Abschnitt für gentechnisch veränderte Mikroorganismen im Speziellen betrachtet.

7.3.5.2 Gefährdungsbeurteilung bei Arbeiten mit biologischen Arbeitsstoffen

Analog zu sonstigen Tätigkeiten hat der Arbeitgeber bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen - unabhängig davon, ob diese gentechnisch verändert sind oder nicht - eine Gefährdungsbeurteilung gemäß EU-Vorgaben (RL 2000/54/EG, 2000) und der vom Arbeitsschutz-Gesetz abgeleiteten Biostoff-Verordnung (BioStoffV, 2003, §§ 5 ff.)

durchzuführen, um so Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten zu gewährleisten. Im Folgenden sind die Grundzüge einer solchen Gefährdungsbeurteilung beschrieben. Ziel war es dabei, daraus wesentliche Kriterien für die Beurteilung des Gefahrenpotentials, das mit den im biotechnischen Prozess eingesetzten Mikroorganismen verbunden ist, abzuleiten.

Eine „Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen“ liefert die TRBA 400 (2001). Am Anfang steht dabei die Frage, ob es sich um eine „gezielte“ oder eine „nicht gezielte“ Tätigkeit mit Mikroorganismen handelt (BioStoffV, 2003, § 2; TRBA 400, 2001, S. 12). Gezielte Tätigkeiten liegen danach vor, wenn:

1. biologische Arbeitsstoffe mindestens der Spezies nach bekannt sind,
2. die Tätigkeiten unmittelbar auf einen oder mehrere biologische Arbeitsstoffe ausgerichtet sind und
3. die Exposition der Beschäftigten im Normalbetrieb hinreichend bekannt oder abschätzbar ist.

Bei der biotechnischen Produktion werden in der Regel spezifische Mikroorganismen mit bekannter Identität einzeln oder als definierte Mischungen in kontrollierten Prozessen eingesetzt. Bei einer solchen Anwendung lässt sich die Exposition der Arbeitnehmer meist relativ gut abschätzen, so dass es sich üblicherweise um eine gezielte Tätigkeit handelt. Eine nicht gezielte Tätigkeiten liegt dagegen vor, wenn mindestens eine der vorgenannten Voraussetzungen nicht gegeben ist (TRBA 400, 2001). Beispiele dafür sind etwa die Sortierung von Abfällen, die Vergärung von Biomasse aus einem biotechnischen Prozess, die diagnostische Untersuchung humanen Probenmaterials oder auch die Reinigung von Käseläuben in einer Käserei.

Entscheidend für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung sind genaue Kenntnisse der Arbeitsbedingungen sowie ausreichende weitere Sachinformationen (vgl. die in Tabelle 7-12 dokumentierten Anforderungen). Grundlegend ist hierbei die Kenntnis des Standes der Technik, der vor allem in der Biostoff-Verordnung, den Technischen Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA) sowie beim Einsatz gentechnisch veränderter Mikroorganismen in spezifischen gesetzlichen Regelungen (vgl. Abschnitt 7.3.5.4) beschrieben ist. Zusätzliche Informationen enthalten beispielsweise branchenspezifische Leitfäden, einige Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), LASI-Veröffentlichungen

sowie das berufsgenossenschaftliche Regelwerk, aber auch wissenschaftliche Veröffentlichungen zu vergleichbaren Tätigkeiten. In der Regel nicht erforderlich sind dagegen Messungen biologischer Arbeitsstoffe am Arbeitsplatz, auch wenn diese in bestimmten Fällen hilfreich sein können.

Tabelle 7-12: Notwendige Informationen zur Gefährdungsbeurteilung beim Umgang mit biologischen Arbeitsstoffen (BioStoffV, 2003; LASI, 2001; TRBA 400, 2001)

Erforderliche Informationen	Informationsquellen
<i>1. Informationen zum biologischen Arbeitsstoff</i>	
Art der vorkommenden biologischen Arbeitsstoffe	Bekannt bzw. bei Mischpopulation aus Literatur, TRBA etc.
Zuordnung zu einer Risikogruppe	RL 2000/54/EG, TRBA 460, TRBA 462, BGI 631 bis 636
Informationen zu Übertragungswegen	z.B. Luft, Körperflüssigkeiten, Schmierinfektionen
Gefährdungen für besondere Personengruppen	BG-Informationen „Sichere Biotechnologie“
Sensibilisierende oder toxische Wirkungen	Anhang III der RL 2000/54/EG, TRGS 907, TRGS 908
<i>2. Tätigkeitsbezogene Informationen</i>	
Beschreibung Betriebsablauf und Arbeitsverfahren	evtl. bereits in Gefährdungsbeurteilung nach § 5 ArbSchG
Auftreten biologischer Arbeitsstoffe	z.B. geschlossene/offene Anlage, Luftführung, usw.
Typische Arbeitsschritte	
<i>3. Informationen zur Expositionssituation</i>	
Art der Tätigkeit	z.B. Verletzungsgefahr, direkter Kontakt, Aerosole
Beschäftigung Jugendlicher, Schwangerer, Stillender	JArbSchG/MuSchG bei Gefährdung in besonderem Maße
Tätigkeiten mit evt. Kontakt zu biolog. Arbeitsstoffen	
Dauer und zeitlicher Verlauf der Tätigkeit	
Dauer und Häufigkeit der Exposition	
Spezielle Übertragungswege	z.B. über Blutkontakt bei Verletzungen, Einatmen, direkten oder indirekten Kontakt mit der Haut oder Schleimhaut
Expositionsdaten der Beschäftigten	Branchen- bzw. tätigkeitsbezogene Untersuchungen
<i>4. Informationen zu Erfahrungen aus vergleichbaren Tätigkeiten</i>	
Erfahrungen aus vergleichbaren Tätigkeiten	Branchenspezifische Veröffentlichungen
Information zu Erkrankungen bei der Tätigkeit	Informationen vor Ort
Tätigkeitsbezogene Erkrankungsfälle	Träger der gesetzlichen Unfallversicherung
Ergebnisse arbeitsmedizinischer Untersuchungen	Betriebsarzt

Ausgehend von den Ergebnissen der Gefährdungsbeurteilung sind die betrachteten Tätigkeiten einer Schutzstufe zuzuordnen und geeignete Vorsorge- und Schutzmaßnahmen festzulegen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen nicht gleichzeitig eine Exposition der Beschäftigten bedeuten. So ist beispielsweise mit dem Überwachen einer geschlossenen biotechnischen Anlage üblicherweise keine Exposition verbunden, während dies beim Beimpfen, Beprobieren und Ernten der Kultur durchaus der Fall sein kann (TRBA 400, 2001)

Aufgrund der Ausrichtung auf den Arbeitnehmerschutz werden bei der Gefährdungsbeurteilung nach Biostoff-Verordnung (BioStoffV, 2003) jedoch mögliche Gefahren nicht explizit behandelt, die mit einer Freisetzung des biologischen Arbeitsstoffes nach außerhalb der Anlage – unabhängig davon, ob gewollt oder ungewollt – für Menschen, Pflanzen und Tiere sowie Ökosysteme insgesamt verbunden sind. Dennoch kommen die auf Basis der Gefährdungsbeurteilung eingeleiteten Sicherheitsmaßnahmen bei biotechnischen Produktionsprozessen meist auch diesen Schutzgütern zu Gute, da dadurch ja vor allem die Freisetzung der Mikroorganismen begrenzt werden soll. Zudem greift die Einstufung in Risikogruppen nach der Infektionsgefahr nicht nur bei Arbeitnehmern, sondern auch bei Personen außerhalb der Anlage.

Fazit: Die Gefährdungsbeurteilung, wie sie oben in ihren Grundzügen beschrieben wurde, bezieht sich stets auf eine konkrete Tätigkeit mit biologischen Arbeitsstoffen und damit auf eine spezifische Anlage. Der im Projekt durchgeführte Vergleich betrachtet dagegen die beiden Verfahren der Riboflavin-Produktion auf einer relativ allgemeinen Ebene und damit bei einem deutlich geringeren Detaillierungsgrad. Damit war es aus unserer Sicht nicht zielführend, den Ansatz der Gefährdungsbeurteilung eins zu eins auf die untersuchte Fragestellung zu übertragen. Dies hätte zum Einen bedeutet, eine entsprechende Anlage umfangreich zu begutachten, zum Anderen wäre die auf diesem Wege gewonnene Informationsfülle nur bedingt zum Vergleich mit dem Gefahrenpotential beim chemisch-technischen Prozess geeignet gewesen.

Andererseits ließen sich aus dem Vorgehen bei der Gefährdungsbeurteilung einige wichtige Ansatzpunkte für den Vergleich ableiten: Für die anlagenunabhängige Abschätzung des Gefahrenpotentials eines biotechnischen Verfahrens sind aus unserer Sicht vor allem die für die Gefährdungsbeurteilung geforderten Informati-

onen zum biologischen Arbeitsstoff wichtig. Besonders relevant sind dabei die Einordnung des biologischen Arbeitsstoffes in eine Risikogruppe, Angaben zu dessen sensibilisierenden Eigenschaften und Toxizität sowie die Eingruppierung der Tätigkeit in eine Schutzstufe. Auf diese Punkte wird im Folgenden näher eingegangen. Bei allen weiteren Schritten und Bewertungen setzen wir jedoch voraus, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheits- und Vorsorgemaßnahmen eingehalten werden und die Exposition der Arbeitnehmer dadurch weitestgehend reduziert wird.

7.3.5.3 Gefahrenpotential biologischer Arbeitsstoffe im Allgemeinen

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargelegt, ist die Bestimmung des Gefahrenpotentials, das mit der Herstellung und Verwendung biologischer Arbeitsstoffe verbunden ist, eng verknüpft mit der gesetzlich verlangten Einstufung in sogenannte Risikogruppen. Auf dieser basiert wiederum die Zuordnung der entsprechenden Tätigkeit zu einer Schutzstufe mit darauf abgestimmten Sicherheitsmaßnahmen. Weitere Schutzmaßnahmen sind in Abhängigkeit vom sensibilisierenden oder toxischen Potentials der verwendeten Mikroorganismen festzulegen (BioStoffV, 2003; RL 2000/54/EG; 2000). Auf diese drei für die Beurteilung des Gefahrenpotentials wesentlichen Aspekte wird im Folgenden eingegangen:

Einstufung biologischer Arbeitsstoffe nach ihrem Infektionspotential in Risikogruppen

Die dafür entwickelte Systematik – eine Einstufung biologischer Arbeitsstoffe in vier Risikogruppen entsprechend des Infektionspotentials – findet sich in der Europäischen Richtlinie über den „Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdungen durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit“ (RL 2000/54/EG, 2000, Art. 2). Diese Vorgehensweise ist identisch in der auf das Arbeitsschutzgesetz gestützten nationalen Biostoff-Verordnung (BioStoffV, 2003) enthalten, die erstmals am 1. April 1999 in Kraft trat und die Grundsätze für Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen weiter konkretisiert. Nach deren § 3 sind biologische Arbeitsstoffe in die nachfolgend dokumentierten vier Risikogruppen einzuteilen (vgl. auch LASI 2003, S. 5 ff.). Dabei wird grundsätzlich vom Infektionsrisiko eines gesunden Menschen ausgegangen. Besondere Empfindlichkeiten beispielsweise aufgrund von Krankheit, Medikation, geschwächtem Immunsystem,

Schwangerschaft oder Stillzeit werden nicht berücksichtigt. Nicht einbezogen werden zudem sensibilisierende oder toxische Wirkungen (LASI, 2001):

- *Risikogruppe 1:* Biologische Arbeitsstoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit verursachen.
- *Risikogruppe 2:* Biologische Arbeitsstoffe, die eine Krankheit beim Menschen hervorrufen können und eine Gefahr für Beschäftigte darstellen können. Eine Verbreitung des Stoffes in der Bevölkerung ist unwahrscheinlich, eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist normalerweise möglich.
- *Risikogruppe 3:* Biologische Arbeitsstoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen können und eine ernste Gefahr für Beschäftigte darstellen können. Die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung kann bestehen, doch ist normalerweise eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung möglich.
- *Risikogruppe 4:* Biologische Arbeitsstoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen und eine ernste Gefahr für Beschäftigte darstellen. Die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung ist unter Umständen groß, normalerweise ist eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung nicht möglich.

Kriterien für die Risikoeinstufung von Mikroorganismen finden sich in der TRBA 450 (2002). Glücklicherweise kann der Anwender meist jedoch bereits auf Publikationen zurückgreifen, die für den relevanten biologischen Arbeitsstoff die Risikogruppe vorgeben. So enthält die EU-Richtlinie RL 2000/54/EG (2000) im Anhang III europaweit verbindliche Einstufungen biologischer Arbeitsstoffe der Risikogruppen 2 bis 4. Ergänzend hierzu werden in mehreren Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA-Reihe 400 Arbeitsplatzbewertung) Pilze, Bakterien, Viren und Parasiten gemäß der Biostoff-Verordnung in Risikogruppen eingeteilt.

Für den Vergleich relevant sind die TRBA 466 „Einstufung von Bakterien in Risikogruppen“ (2002) und die TRBA 460 "Einstufung von Pilzen in Risikogruppen“ (2002). Diese Technischen Regeln beinhalten sowohl die Einstufungen nach RL 2000/54/EG (2000) als auch nach den vom Fachausschuss Chemie erstellten berufsgenossenschaftlichen Informationen "Sichere Biotechnologie - Eingruppierung biologischer Agenzien" (BGI 631 bis BGI 636, s. BGCh). Zudem werden weitere Einstufungen

der Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten entnommen (BMGS, 2001; TRBA 460, 2002; TRBA 466, 2002), die in enger Beziehung zur Einstufung nicht genetisch veränderter Mikroorganismen steht. Bei der Risikoeingruppierung soll zudem berücksichtigt werden, ob es sich um Stämme handelt, die in ihrer Infektionsfähigkeit abgeschwächt sind oder Virulenzgene verloren haben (vgl. TRBA 466, 2002). Über die Risikoeinstufung hinaus enthalten die entsprechenden Listen - soweit bekannt - auch Hinweise bezüglich weiterer möglicher schädlicher Wirkungen auf abwehrgeschwächte Menschen sowie auf Pflanzen und Tiere (vgl. Tabelle 7-13).

Nicht thematisiert wird dagegen auf dieser Regelungsebene die Frage des Gefahrenpotentials gentechnisch veränderter Mikroorganismen. Wie die Ausführungen im Abschnitt 7.3.5.4 zeigen, steht dieser Aspekt in engem Zusammenhang mit der allgemeinen Risikoeinstufung biologischer Arbeitsstoffe, erweitert diese jedoch zum Einen auf Tiere und Pflanzen, zum Anderen auf den Empfänger-, Spender- und gentechnisch veränderten Organismus sowie die für die Einschleusung von Genmaterial verwendeten Vektoren.

Toxische und sensibilisierende Wirkungen biologischer Arbeitsstoffe

Für eine Beurteilung des Gefahrenpotentials biologischer Arbeitsstoffe sind zusätzlich zu den infektiösen Eigenschaften, die mittels der Risikogruppen berücksichtigt werden, deren toxische und sensibilisierende Wirkungen zu beachten (BioStoffV, 2003, §§ 5 ff.). Hinweise hierzu werden im Einzelfall im Anhang III der RL 2000/54/EG (2000) durch eine Kennzeichnung mit A (= mögliche allergene Wirkung) oder T (= toxisch) gegeben. Auch die Technischen Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA 460, 2002; TRBA 466, 2002) enthalten diesbezügliche, jedoch aufgrund der komplexen Materie zwangsläufig ebenfalls nicht vollständige Informationen. In diesen Regeln werden für die im Weiteren relevanten Pilze und Bakterien auch nicht nur auf den Menschen bezogene Gefahrenpotentiale über die in Tabelle 7-13 dokumentierten Kennzeichnungen ausgewiesen. Daraus lassen sich auch Hinweise auf eine mögliche Toxinbildung ablesen.

Tabelle 7-13: In TRBA 460 (2002) und TRBA 466 (2002) für Pilze und Bakterien zusätzlich zur Risikogruppe angegebene Informationen

Symbol	Bedeutung
	Bakterien und Pilze (in TRBA 466 und TRBA 460)
+	In Einzelfällen (überwiegend abwehrgeminderte Menschen) nachgewiesener bzw. vermuteter Krankheitserreger; Identifizierung der Art oft nicht zuverlässig
	Bakterien (in TRBA 466)
n	Pathogen für Nichtwirbeltiere (keine vollständige Ausweisung)
p	Pathogen für Pflanzen (keine vollständige Ausweisung)
t	Pathogen für Wirbeltiere, aber kein Befall von Menschen bei natürlichen Bedingungen, evtl. Infektionsgefahr bei Arbeiten mit hohen Erregerkonzentrationen (deshalb Risikogruppe 2)
TA	Arten mit langjährig sicher in der technischen Anwendung gehandhabten Stämmen (diese Stämme gehören zur Risikogruppe 1; keine vollständige Ausweisung)
T	Bakterien, die zur Toxinbildung befähigt sind (keine vollständige Ausweisung)
	Pilze (in TRBA 460)
vet	Kennzeichnet Pilze, die außerdem pathogen gegen Haus- und Nutztiere sind
1)	Mögliche allergene Wirkung („A“ in Anhang III der RL 2000/54/EG)

Weitere Hinweise zur Bewertung sensibilisierender Wirkungen geben die TRGS 907 (2002) sowie ein diesbezüglicher Beschluss des Ausschusses für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS, 2003). Insgesamt gibt es jedoch nur wenige Bakterien-, Pilz- und Parasitenarten, für die sensibilisierende Wirkungen bekannt sind (ABAS, 2003; RL 2000/54/EG, 2000; TRBA 460, 2002; TRBA 466, 2002). Andererseits gilt, dass eine längerfristige intensive Exposition gegenüber biologischen Arbeitsstoffe - vor allem gegenüber luftgetragenen Pilzsporen in großer Dichte – selbst dann zu einer Sensibilisierung bis hin zu einer schwerwiegenden allergischen Reaktion führen kann, wenn die verursachenden Organismen nicht als sensibilisierend ausgewiesen sind. Vor diesem Hintergrund ist es nachvollziehbar, dass durch Mikroorganismen bedingte sensibilisierende Wirkungen in den spezifisch darauf bezogenen Regelungen (TRGS 907, 2002; ABAS, 2003) nicht auf Ebene einzelner Arten behandelt werden, sondern lediglich mit bestimmten Tätigkeitsbereichen (z.B. Abfallwirtschaft, Landwirtschaft) oder mit Stoffgruppen (z.B. schimmelpilzhaltiger Staub, Futtermittel- und Getreidestäube) in Verbindung gebracht werden.

Eingruppierung von Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen in Schutzstufen

Ausgehend von den Risikogruppen, die für die biologischen Arbeitsstoffe ermittelt worden sind, wird die entsprechende Tätigkeit einer von vier Schutzstufen zugeordnet. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

Gezielte Tätigkeiten, wie etwa die fermentative Gewinnung von Riboflavin, sind nach § 6 der Biostoff-Verordnung in Schutzstufen einzuteilen (BioStoffV, 2003). Bei Arbeiten mit mehreren biologischen Arbeitsstoffen ist dabei die Risikogruppe mit dem höchsten Gefährdungsgrad entscheidend.

Nicht gezielte Tätigkeiten, wie beispielsweise die Verwertung der in der biotechnischen Riboflavin-Produktion anfallenden Biomasse mittels Kompostierung oder Vergärung, sind ebenfalls in Schutzstufen einzugruppieren (vgl. BioStoffV, 2003, § 7). Entscheidend dafür sind ebenfalls die Infektionsgefährdung sowie zusätzlich die Expositionssituation und die Konzentration bzw. Menge der Mikroorganismen. In der Regel liegen bei nicht gezielten Tätigkeiten Mischpopulationen vor. Die Schutzstufe orientiert sich deshalb an der Risikogruppe derjenigen Mikroorganismen, die das Infektionsrisiko dominieren, und damit nicht zwangsläufig an der höchsten vorkommenden Risikogruppe. Bei der Einstufung ist auf vorhandene Erfahrungen und Erkenntnisse zu vergleichbaren Arbeitsvorgängen sowie den Stand der Technik zurückzugreifen (TRBA 400, 2001).

Abhängig von der jeweiligen Schutzstufe legen die Anhänge II und III der Biostoff-Verordnung (BioStoffV, 2003) verbindliche bzw. empfohlene Hygiene- und Sicherheitsmaßnahmen fest, die in spezifischen Technischen Regeln (TRBA) zu Schutzmaßnahmen weiter konkretisiert werden. Neben der Infektionsgefährdung, die über die Risikogruppe berücksichtigt wird, sind zudem die toxischen und sensibilisierenden Wirkungen der biologischen Arbeitsstoffe zu beachten. Diese wirken sich zwar nicht auf die Schutzstufe aus, erfordern jedoch fallweise zusätzliche Schutzmaßnahmen. (TRBA 400, 2001).

Fazit: Das Gefahrenpotential einer Tätigkeit mit biologischen Arbeitsstoffen wird aus unserer Sicht über die Zuordnung zu einer bestimmten Schutzstufe am besten abgebildet, da diese quasi zusammenfassend das Gefahrenpotential der für diese Tätigkeit relevanten biologischen Arbeitsstoffe quantifiziert. Ist die Schutzstufe nicht bekannt, kann alternativ eine Bewertung auf Ebene der Risikogruppe der biologischen

Arbeitsstoffe erfolgen. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Schutzstufe und Risikogruppen, sollte zur Vermeidung von Doppelzählungen nur eine der beiden Eingruppierungen für die Bewertung des Gefahrenpotentials verwendet werden. Unabhängig davon ist es zielführend, vorhandene Informationen zu weiteren unerwünschten potentiellen Wirkungen der biologischen Arbeitsstoffe zu dokumentieren und in die verbal-argumentative Beurteilung des Gefahrenpotentials einfließen zu lassen. Darüber hinaus ist bei der Bewertung zu beachten, inwieweit mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen gearbeitet wird und deshalb weitergehende Gesichtspunkte (vgl. Abschnitt 7.3.5.4) zu berücksichtigen sind.

Vor diesem Hintergrund halten wir die folgende Vorgehensweise für sinnvoll und geeignet, um das Gefahrenpotentials biotechnischer Verfahren ohne Einsatz gentechnisch veränderter Mikroorganismen zu bewerten: Grundlage ist die Einordnung der jeweiligen Tätigkeit in eine Schutzstufe bzw. der verwendeten Arbeitsstoffe in eine Risikogruppe. Analog zum Spaltenmodell der Gefahrstoffbeurteilung nach TRGS 440 (vgl. Abschnitt 7.3.4.3) schlagen wir vor, das Gefahrenpotential der biologischen Arbeitsstoffe in vier Stufen von gering über mittel nach hoch und sehr hoch einzuteilen. Damit gehen wir grundsätzlich konform mit einer vergleichbaren Einstufung biotechnischer Anlagen durch die Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BGCh, 1992). Von dieser wird die Kategorie „ohne Gefährdungsrisiko“ sowohl einer Tätigkeit der Schutzstufe 1 als auch Mikroorganismen der Risikogruppe 1 zugeordnet, wobei die Einhaltung der erforderlichen Hygieneregeln vorausgesetzt wird. Aus dem Blickwinkel des Gefahrenpotentials, der vor eventuellen Schutzmaßnahmen ansetzt, ist unseres Ermessens damit ein „geringes“ Gefahrenpotential gegeben, dessen Wirksamwerden jedoch sehr gut verhindert werden kann. (Sollte es kein Gefahrenpotential geben, wären auch keine Schutzmaßnahmen erforderlich.) Eine solche Wertung würde im Sinne des Vorsorgedankens auch auf mögliche organismenabhängige Wirkungen aufmerksam machen – beispielsweise gegenüber abwehrgeschwächten Menschen, Pflanzen oder Tieren - , die bei der Einstufung in Risikogruppen eben nicht berücksichtigt werden. Ein pauschale, zu schnelle Einstufung als „vernachlässigbar“ – auch wenn diese in manchen Fällen letztendlich gerechtfertigt sein mag - , würde diesem Umstand nicht gerecht werden. Ausgehend von dieser Einstufung, haben wir den weiteren Schutzstufen bzw. Risikogruppen ein Gefahrenpotential aufgrund biologischer Arbeitsstoffe (2: mittel; 3: hoch; 4: sehr hoch) zugeordnet. Zusätz-

lich haben wir separat angegeben, ob die relevanten Mikroorganismen sensibilisierende oder toxische Eigenschaften aufweisen und ob noch weitere unerwünschte Wirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Ökosysteme insgesamt bekannt sind. Diese Punkte werden soweit vorhanden ebenfalls im Rahmen der verbalargumentativen Bewertung thematisiert und berücksichtigt.

7.3.5.4 Gefahrenpotential gentechnisch veränderter Mikroorganismen

Die biotechnische Produktion von Riboflavin greift – wie nahezu alle industriell betriebenen biotechnischen Produktionen – auf Mikroorganismen zurück, die gentechnisch verändert wurden, um so die Produktausbeute zu erhöhen. Damit stellte sich die Frage, wie das mit der Verwendung gentechnisch veränderter Mikroorganismen in Produktionsprozessen verbundene Gefahrenpotential grundsätzlich bestimmt werden kann und wie dieses im speziellen Fall zu beurteilen ist. Grundlage dafür waren vor allem die diesbezüglichen gesetzlichen Regelungen. Im Folgenden werden ausgehend davon zuerst allgemein die Grundlagen einer solchen Beurteilung und dann die spezifische Vorgehensweise in dieser Untersuchung abgeleitet. Letztere wurde später im Abschnitt 7.4.3.4 auf den biotechnischen Prozess der Riboflavin-Herstellung angewendet.

Alle im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Vorgaben der Biostoff-Verordnung gelten grundsätzlich auch bei der Arbeit mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen, sofern die Anforderungen nicht im Gentechnik-Recht weitergehend geregelt sind. Auf Ebene der Europäischen Union ist dabei vor allem die Richtlinie RL 98/81/EG (1998) relevant. Diese zielt darauf ab, die Gefahren und Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt, die mit dem Einsatz gentechnisch veränderter Mikroorganismen in geschlossenen Systemen verbunden sind, zu minimieren und trifft damit auf das betrachtete biotechnische Verfahren zur Riboflavin-Herstellung zu. Zur Erreichung dieser Zielsetzung gibt sie vor, unter welchen Kriterien und auf welche Art und Weise solche Anwendungen zu bewerten sind. Darüber hinaus formuliert sie in Artikel 5 ein aus der deutschen Gesetzgebung entlehntes vierstufiges risikobezogenes System von Einschließungsstufen, das dem oben beschriebenen Verfahren zur allgemeinen Einstufung von Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen sehr ähnlich ist. Damit errichtet sie zugleich einen Rahmen für die Bewertung des Gefahrenpotentials,

welches mit dem Einsatz gentechnisch veränderter Mikroorganismen in Produktionsprozessen verbunden ist.

In Deutschland wird dieser Rahmen durch das Gentechnik-Gesetz (GenTG, 2004) und insbesondere die Gentechnik-Sicherheitsverordnung (GenTSV, 2002) näher ausgestaltet, zugleich aber auch erweitert auf alle gentechnisch veränderten Organismen insgesamt (inkl. Pflanzen und Tiere), wobei die Anwendung gentechnisch veränderter Organismen am Menschen ausgenommen ist.

Der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen liegt auf der biotechnischen Nutzung von Mikroorganismen. Am Anfang steht dabei analog zum Vorgehen bei nicht gentechnisch veränderten Mikroorganismen die Einstufung der beteiligten Mikroorganismen in vier Risikogruppen (GenTSV, 2002, § 5). Dabei ist zu untersuchen, inwieweit die in Tabelle 7-14 aufgeführten potentiell schädlichen Auswirkungen relevant sind. Deutlich wird dabei, dass sich die Eingruppierung anders als bei nicht gentechnisch veränderten Organismen nicht mehr ausschließlich auf das Infektionspotential stützt. Die bei dieser Analyse gewonnenen Erkenntnisse sind gemäß der in dieser Tabelle skizzierten Struktur zu bewerten. Wesentlich ausdifferenzierter finden sich davon abgeleitete spezifischere Bewertungskriterien im Anhang 1 der Gentechnik-Sicherheits-Verordnung (GenTSV, 2002): Bei der Einstufung der Spender- und Empfängerorganismen ist nach den relevanten Punkten in Anhang 1.1 zu prüfen, bei der Einstufung des gentechnisch veränderten Organismus nach denjenigen im Anhang 1.2 bis 1.4.

Erheblich einfacher stellt sich die Eingruppierung dar, wenn auf Mikroorganismen zurückgegriffen wird, denen analog zur Vorgehensweise bei nicht gentechnisch veränderten Mikroorganismen bereits eine Risikogruppe zugeordnet worden ist. Ob dies der Fall ist, lässt sich der „Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten“ (BMGS, 2001) entnehmen, die vom Bundesministerium für Gesundheit und Soziale Sicherheit veröffentlicht und in Abstimmung mit der beim Robert-Koch-Institut angesiedelte Zentralen Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS) fortgeschrieben wird. Diese Zusammenstellung greift unter anderem auf die im Abschnitt 7.3.5.3 aufgeführten Informationsquellen zur Eingruppierung nicht gentechnisch veränderter Mikroorganismen zurück.

Tabelle 7-14: Grundlagen der Bewertung des Gefährpotentials gentechnisch veränderter Mikroorganismen (GenTG, 2004, § 7; GenTSV, 2002, §§ 4 f.; RL 98/81/EG, 1998, Art. 5(2) u. Anh. III)

Nr.	Bewertungsrahmen: Potentiell schädliche Auswirkungen
1	Krankheit bei Menschen (Beschäftigte, Bevölkerung), einschließlich allergieauslösender oder toxischer Wirkungen
2	Krankheit bei Tieren und Pflanzen (inkl. Nutztiere und Kulturpflanzen)
3	Gefährliche Auswirkungen aufgrund der Unmöglichkeit, Krankheiten zu behandeln oder eine wirksame Prophylaxe zu bieten
4	Gefährliche Auswirkungen auf die Umwelt infolge der Etablierung oder Verbreitung in der Umwelt
5	Gefährliche Auswirkungen infolge der natürlichen Übertragung von inseriertem genetischen Material auf andere Organismen
Nr.	Vorgehensweise: Struktur der Bewertung
1	Feststellung aller potentiell schädlichen Auswirkungen, insbesondere jener in Verbindung mit dem Empfänger-Mikroorganismus, dem inserierten genetischen Material (vom Spenderorgan herrührend), dem Vektor, dem Spender-Mikroorganismus (solange der Spender-Mikroorganismus während des Vorgangs verwendet wird) und dem aus der Tätigkeit hervorgehenden gentechnisch veränderten (Mikro-)Organismus
2	Merkmale der Tätigkeit
3	Schwere der potentiell schädlichen Auswirkungen
4	Wahrscheinlichkeit, dass potentiell schädliche Auswirkungen eintreten

Ausgehend von der Eingruppierung der beteiligten Mikroorganismen in Risikogruppen und analog zu den in RL 98/81/EG (1998) formulierten vier Einschließungsstufen ordnet das deutsche Gentechnik-Gesetz (GenTG, 2004, § 7) gentechnische Arbeiten einer der folgenden vier Sicherheitsstufen zu:

- *Sicherheitsstufe 1:* Gentechnische Arbeiten, bei denen nach dem Stand der Wissenschaft nicht von einem Risiko für die menschliche Gesundheit und die Umwelt auszugehen ist.
- *Sicherheitsstufe 2:* Gentechnische Arbeiten, bei denen nach dem Stand der Wissenschaft von einem geringen Risiko für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt auszugehen ist.
- *Sicherheitsstufe 3:* Gentechnische Arbeiten, bei denen nach dem Stand der Wissenschaft von einem mäßigen Risiko für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt auszugehen ist.

- *Sicherheitsstufe 4*: Gentechnische Arbeiten, bei denen nach dem Stand der Wissenschaft von einem hohen Risiko oder dem begründeten Verdacht eines solchen Risikos für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt auszugehen ist.

Die Zuordnung zu diesen Sicherheitsstufen erfolgt nach dem Risikopotential der gentechnischen Arbeiten. Dieses wird sowohl durch die Eigenschaften der Empfänger- und Spenderorganismen, der für die gentechnische Veränderung genutzten Vektoren sowie des gentechnisch veränderten Organismus als auch die Exposition bestimmt (vgl. Tabelle 7-15). Bestehen Zweifel hinsichtlich der Sicherheitsstufe, so ist von der höheren Sicherheitsstufe auszugehen. Entsprechend der Sicherheitsstufe sind für biotechnische Produktionsanlagen diejenigen Vorsorge- und Schutzmaßnahmen umzusetzen, die im Anhang III.B der Gentechnik-Sicherheits-Verordnung (GenTSV, 2002) vorgegeben werden.

Tabelle 7-15: Festlegung der Sicherheitsstufen für biotechnische Produktionsanlagen mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen (GenTSV, 2002, § 7(2))

Sicherheitsstufe 1: Voraussetzungen	
1	Empfängerorganismus: Risikogruppe 1 mit experimentell erwiesener oder langer sicherer Verwendung oder mit eingebauten biologischen Sicherheitsmaßnahmen, die die Überlebens- und Replikationsfähigkeit in der Umwelt begrenzen; keine Abgabe von Organismen der Risikogruppen 2 bis 4
2	Vektoren / Nukleinsäuren aus dem Spenderorganismus / synthetische Nukleinsäuren: Gute Beschreibung; Freiheit von Nukleinsäuresequenzen mit bekanntem Gefährdungspotential; Begrenzung auf genetische Sequenzen, die zur Erreichung des beabsichtigten Zwecks notwendig sind; keine Erhöhung der Stabilität des Organismus in der Umwelt, soweit dies die beabsichtigte Funktion nicht erfordert; geringere Mobilisierbarkeit; keine Übertragung von Resistenzgenen auf andere Mikroorganismen, die diese nicht von Natur aus aufnehmen, wenn dadurch Heilmittelanwendungen zur Kontrolle von Infektionskrankheiten bei Mensch oder Nutztieren in Frage gestellt sein könnten.
3	Gentechnisch veränderter Organismus: Gleiche Sicherheit wie Empfängerorganismus unter den gewählten Verwendungsbedingungen (z.B. im Reaktor oder Fermenter), aber begrenzte Überlebens- und Replikationsfähigkeit und ohne nachteilige Folgewirkungen für die Umwelt; Gefährdungspotential entsprechend Organismen der Risikogruppe 1; keine Abgabe von GVO höherer Risikogruppen; ruft nach dem Stand der Wissenschaft keine Krankheiten bei Menschen, Tieren oder Pflanzen hervor.
Sicherheitsstufe 2: Voraussetzungen	
1	Empfängerorganismus: bis Risikogruppe 2; keine Abgabe von Organismen der Risikogruppen 3 u. 4
2	Vektoren / Nukleinsäuren aus dem Spenderorganismus / synthetische Nukleinsäuren: soweit charakterisiert, dass der GVO nach einer vorläufigen Risikobewertung das Gefährdungspotential von Organismen der Risikogruppe 2 nicht überschreitet und keine GVO höherer Risikogruppen abgibt
3	Gentechnisch veränderter Organismus: Abschließende Bewertung nach GenTSV (§ 5) ergibt ein geringes Risiko für die Rechtsgüter nach GenTG (Leben und Gesundheit von Menschen, Tieren, Pflanzen; sonstige Umwelt in ihrem Wirkungsgefüge; Sachgüter)
Sicherheitsstufe 3: Voraussetzungen	
1	Empfängerorganismus: bis Risikogruppe 3; keine Abgabe von Organismen der Risikogruppe 4
2	Vektoren / Nukleinsäuren aus dem Spenderorganismus / synthetische Nukleinsäuren: soweit charakterisiert, dass der GVO nach einer vorläufigen Risikobewertung das Gefährdungspotential von Organismen der Risikogruppe 3 nicht überschreitet und keine GVO der Risikogruppe 4 abgibt
3	Gentechnisch veränderter Organismus: Abschließende Bewertung nach GenTSV (§ 5) ergibt ein mäßiges Risiko für die Rechtsgüter nach GenTG (Leben und Gesundheit von Menschen, Tieren, Pflanzen; sonstige Umwelt in ihrem Wirkungsgefüge; Sachgüter)
4	Zielrichtung der gentechnischen Arbeit: Herstellung hochwirksamer Toxine unter Anwendung biologischer Sicherheitsmaßnahmen.
Sicherheitsstufe 4: Voraussetzungen	
1	Empfänger-/Spenderorganismus/Gentechnisch veränderter Organismus: Risikogruppe 4; insbesondere Arbeiten mit (defekten) Viren dieser Risikogruppe in Gegenwart von Helferviren; hohes Risiko für menschliche Gesundheit und Umwelt in abschließende Bewertung nach GenTSV (§ 5)

Wie in Tabelle 7-15 aufgeführt, ist bei der Festlegung der Sicherheitsstufe gentechnisch veränderter Mikroorganismen auch zu beachten, ob eine wünschenswerte Verwendung sogenannter biologischer Sicherheitsmaßnahmen (vgl. GenTSV, 2002, § 6 und Anh. II.A) stattgefunden hat. Dabei handelt es sich üblicherweise um den Einsatz anerkannt sicherer Vektoren und Empfängerorganismen. Solche Maßnahmen, die bei-

spielsweise die Überlebens- und Ausbreitungsfähigkeit der gentechnisch veränderten Mikroorganismen unter natürlichen Bedingungen einschränken, können das Gefahrenpotential deutlich reduzieren. Zuständig für die Zulassung neuer biologischer Sicherheitsmaßnahmen ist die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit, die Angaben dazu unmittelbar bzw. bei Widerspruch des Anmelders spätestens nach drei Jahren im Bundesgesundheitsblatt veröffentlicht. Insbesondere im Bereich der industriellen biotechnischen Produktion ist ein Einsatz solcher Sicherheitsmaßnahmen weit verbreitet.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass aus Sicht des Umweltbundesamtes (UBA, 2004) die Bewertung von Umwelteffekten aufgrund gentechnischer Veränderungen oftmals problematisch ist. Dabei betont das Umweltbundesamt zwar, dass direkte Wirkungen von Genprodukten bzw. Organismen gut abschätzbar seien. Andererseits bereite die Beurteilung ökologischer Zusammenhänge jedoch häufig Schwierigkeiten - nicht zuletzt aufgrund bestehender Wissenslücken hinsichtlich ökologisch relevanter Parameter. So würden vielfach experimentell gesicherte Daten, beispielsweise aus Langzeituntersuchungen fehlen. Ferner kritisiert das Umweltbundesamt, dass das „Prinzip der Nachhaltigkeit“ bisher keinen Eingang in das Gentechnik-Gesetz gefunden habe. Hierbei zielt die Kritik vor allem auf die absichtliche Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen mit dem Schwerpunkt Kulturpflanzen, da in solchen Fällen die entscheidenden Umweltwirkungen oft auf (sekundäre) Wirkungen wie Veränderungen in der Anbaupraxis oder beim Einsatz von Dünger- und Pflanzenschutzmitteln zurückzuführen sind. Der Einbezug solcher Aspekte gebietet sich aber zwingend, wenn sachgerecht beurteilt werden soll, ob eine spezifische Praxis dem Leitbild einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung gerecht werden kann.

Bezüglich des hier relevanten biotechnischen Prozesses ist jedoch zu beachten, dass das betrachtete Verfahren nicht auf eine Freisetzung von gentechnisch veränderten Mikroorganismen zielt, sondern diese ungünstigstenfalls im Zusammenhang mit einem Störfall auftreten könnte. Sollte es dazu kommen, sind in erster Linie die Überlebens- und Replikationsfähigkeit der gentechnisch veränderten Mikroorganismen in der natürlichen Umwelt sowie deren Infektionspotential, eventuelle sensibilisierende Eigenschaften, deren Potential zur Toxinbildung und die in Tabelle 7-14 zusätzlich aufgeführten umweltbezogenen Aspekte relevant. Damit handelt es sich um Kriterien, die bei der Risikoeingruppierung der Mikroorganismen vorrangig zu prüfen sind, so dass hinsicht-

lich dieser Punkte bereits eine Vorselektion stattgefunden haben sollte. Zumindest weist die aktuelle industrielle biotechnische Praxis in diese Richtung, da vor allem Mikroorganismen eingesetzt werden, deren Umweltgefährdungspotential als gering angesehen werden kann. Andererseits gibt es aber durchaus auch Produktionsanlagen beispielsweise im Bereich der Impfstoffproduktion, die mit wesentlich gefährlicheren Mikroorganismen betrieben werden. Deshalb gibt das Umweltbundesamt (UBA, 2004) aus unserer Sicht zur Recht zu bedenken, dass die Möglichkeiten einer Risikoermittlung durch vorhergehende Laborversuche gerade bezüglich der ökologischen Auswirkungen ihre Grenzen haben und eine Risikoprognose für die gesamte Biosphäre oder auch nur für die meisten Arten eines Ökosystems auf absehbare Zeit kaum möglich sein dürfte. Diese Aussage ist gleichermaßen für natürlich vorkommende Lebewesen gültig, über deren Vorkommen, Verbleib und Wirken in der Umwelt bisher auch erst wenig bekannt ist.

Fazit: Auch wenn die Ansprüche an die Risikoeingruppierung von gentechnisch veränderten Mikroorganismen höher sind, weist diese doch viele Ähnlichkeiten zur Beurteilung nicht gentechnisch veränderter Mikroorganismen. Entsprechend gleichen sich die von uns festgelegten Vorgehensweisen zur Bestimmung des Gefahrenpotentials methodisch sehr: Da in der Regel mehrere Mikroorganismen bzw. daraus gewonnene Gensequenzen für die Herstellung eines genveränderten Mikroorganismus erforderlich sind, sind bei der Abschätzung des Gefahrenpotentials üblicherweise mehrere Mikroorganismen-Arten zu berücksichtigen. Deshalb haben wir uns entschieden, zur Ableitung des Gefahrenpotentials auf die zusammenfassende Zuordnung zu einer Sicherheitsstufe Bezug zu nehmen, da diese quasi die Risikoeinschätzungen zu den beteiligten Organismen und Genabschnitten kumulativ erfasst. Des Weiteren haben wir die am Ende von Abschnitt 7.3.5.3 gemachte Zuordnung der Sicherheitsstufen zu vier Kategorien zur Beschreibung des Gefahrenpotentials (gering, mittel, hoch, sehr hoch) analog übernommen.

Andererseits war nicht unbedingt zu erwarten, dass für die betrachteten biotechnischen Produktionsprozesse die Sicherheitsstufe bekannt ist oder zumindest aufgrund der vorliegenden Informationen sicher bestimmt werden kann. In diesen Fällen haben wir eine (vorläufige) Bewertung des Gefahrenpotentials auf Grundlage der Risikogruppe des Empfängerorganismus nach der Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten (BMGS, 2001) vorgenommen. Auf

die eingeschränkte Informationslage wird bei der Darstellung der Ergebnisse zum Gefahrenpotential entsprechend hingewiesen.

Darüber hinaus hielten wir es aufgrund der engen Berührungspunkte für sinnvoll, soweit bekannt auch die Risikogruppe des nicht gentechnisch veränderten Empfängerorganismus und weitere wirkungsbezogene Informationen analog zum Vorgehen bei der Bestimmung des Gefahrenpotentials für nicht gentechnisch veränderte Mikroorganismen (vgl. Abschnitt 7.3.5.3) auch beim Einsatz gentechnisch veränderter Mikroorganismen darzustellen (vgl. Abschnitt 0)

7.4 Gefahrenpotential der Riboflavin-Produktion

7.4.1 Untersuchungsrahmen, Systemgrenzen und Abschneidekriterien

Unabhängig vom spezifischen Verfahren zur Riboflavin-Herstellung sind stets eine Reihe vorgelagerter Prozesse erforderlich, in denen die jeweils benötigten Vorprodukte hergestellt werden. Zusätzlich gehört dazu eine Vielzahl nachgeschalteter Anlagen, in denen die aus den Produktionsprozessen resultierenden weiteren Outputs wie Abfälle, Abwasser, Lösemittel oder Nebenprodukte behandelt werden. Damit sind unter dem Gesichtspunkt der Anlagensicherheit sowohl beim chemisch-technischen als auch beim biotechnischen Verfahren grundsätzlich eine Vielzahl von Anlagen bzw. Prozessen relevant (vgl. Abbildung 5-3). Angesichts der Komplexität der beiden Produktionssysteme, den dazu zur Verfügung stehenden Informationen und insbesondere der relativ begrenzten Ressourcen zur Bearbeitung dieser Thematik hatte zwangsläufig eine Eingrenzung des Untersuchungsbereiches zu erfolgen. Wie dabei vorgegangen wurde, wird im Folgenden erläutert. Im Anschluss daran werden zuerst die für diesen Vergleich relevanten Prozesse beschrieben und dann das damit verbundene Gefahrenpotential analysiert und bewertet.

Grenzen des Untersuchungssystems: Berücksichtigte Prozesse

Angesichts der zentralen Fragestellung – des Vergleiches des biotechnischen mit dem chemisch-technischen Prozess - wurde der Schwerpunkt auf diejenigen Prozesse gelegt, die besonders charakteristisch für die jeweilige Art der Riboflavin-Produktion sind und damit zur Differenzierung der Verfahren beitragen. Diese Eingrenzung erfolgte

analog zur ökobilanziellen Betrachtung und kann **Abbildung 5-3** und **Abbildung 5-5** sowie der nachfolgenden Verfahrensbeschreibung entnommen werden. Nicht berücksichtigt wurden dagegen weiter vorgelagerte Prozesse zur Herstellung von Arbeitsstoffen wie etwa die landwirtschaftliche Erzeugung nachwachsender Rohstoffe einschließlich deren Gewinnung und gegebenenfalls Modifikation oder auch die Synthese von Harnstoff. Dies trifft ebenso für weitere Anlagen zu, die beispielsweise zur Lösemittelauflaufbereitung, zur Lagerung von Arbeitsstoffen, zur Reinigung der Reaktionsanlagen, zur Biomassetrocknung, zur Abfallverwertung oder zur Abwasserreinigung dienen. Sollten die Ergebnisse trotz dieser Einschränkungen (sehr) deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren zeigen, dürfte diese Vorgehensweise zur Beurteilung des Gefahrenpotentials angemessen und ausreichend aussagekräftig sein. Andernfalls wären weitergehende Betrachtungen erforderlich. Wie sich dies beim konkreten Untersuchungsbeispiel darstellt, wird im Zusammenhang mit der Auswertung der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 0) diskutiert.

Grenzen des Untersuchungssystems: Berücksichtigte Stoffe (Art, Menge)

Nach erfolgter Auswahl der zu betrachtenden Prozesse ist zu entscheiden, welche der dort vorkommenden Stoffe bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials berücksichtigt werden. Dabei sind sowohl die für die Produktion benötigten Stoffe als auch wichtige Zwischen- und Nebenprodukte sowie die Endprodukte relevant.

Um die Verknüpfung zur ökobilanziellen Betrachtung möglichst eng zu gestalten, haben wir uns entschieden, den wesentlichen Bestandteil der dort gewählten funktionellen Einheit – die Produktion von 1000 kg Riboflavin mit einem Reinheitsgrad von mindestens 96 Gew.-% (vgl. Abschnitt 5.1) – als Ausgangspunkt entsprechender Festlegungen zu verwenden. Ausgehend davon wurden beim gefahrenbezogenen Vergleich alle Stoffe berücksichtigt, die in den näher betrachteten Produktionsprozessen bezogen darauf in einer Menge vorkommen, die mehr als 2 Gew.-% (20 kg) dieser Riboflavin-Menge ausmacht. Dies erschien uns auch deshalb gerechtfertigt, weil es sich bei allen nicht berücksichtigten Stoffen um relativ ungefährliche Filterhilfsmittel und Katalysatoren in sehr geringen Mengen handelt. Die in deutlich größeren Mengen vorkommenden Wasserflüsse wurden aufgrund ihrer ebenfalls relativ geringen Bedeutung für das Gefahrenpotential bei dieser Betrachtung ebenfalls vernachlässigt. Aus Gründen der Geheimhaltung werden im Zusammenhang mit der Auswertung für die einzelnen Stoffe keine genauen Mengen, sondern lediglich Größenordnungen angegeben.

Auf diesem Wege wurde ein Vergleich der Mengen über alle Produktionsprozesse hinweg möglich. Dieses Vorgehen bot darüber hinaus die Möglichkeit, die meisten Daten zu den Stoffströmen aus den UMBERTO[®]-Modellen zur Riboflavin-Produktion (vgl. Abschnitt 5.1) direkt zu übernehmen. Die zusätzlich zu ermittelnde Art und Menge an Zwischenprodukten konnte über dazu recherchierte Informationen zu den chemischen Reaktionswegen teilweise ebenfalls quantifiziert werden. Aus diesen Informationen sowie den für die Ökobilanzierung verwendeten Prozessdaten ließ sich zudem abschätzen, welche Lösemittelmengen sich tatsächlich in den diesbezüglich relevanten Anlagen befinden. Dies wurde notwendig, da Lösemittel häufig im Kreis geführt werden und deshalb bei der Modellierung im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung lediglich die zu ersetzenden Mengen an Neuprodukt sowie der Regenerierungsaufwand für das gebrauchte Lösemittel berücksichtigt wurden. Unter dem Gesichtspunkt des stoffbezogenen Gefahrenpotentials ist dagegen der Stoffinhalt der Anlage und damit die für den jeweiligen Prozess verwendete Gesamt-Lösemittelmenge bedeutsam.

Grenzen des Untersuchungssystems: Produktsicherheit Riboflavin

Bevor nachfolgend auf die Verfahren und das Gefahrenpotential eingegangen wird, soll an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen werden, dass Fragen der Produktsicherheit im Folgenden nicht behandelt werden. Andererseits soll auch darüber informiert werden, dass die mittels der beiden Verfahren hergestellten Riboflavin-Produkte weitgehend identisch sind. Toxikologische Untersuchungen zeigten keine Unterschiede zwischen gentechnisch hergestelltem und chemisch synthetisiertem Riboflavin (Reinheit 98 %). Die im Riboflavin feststellbaren Verunreinigungen sind bei beiden Produkten vergleichbar. So findet sich im biotechnisch hergestellten Produkt keine biologisch aktive Bakterien-DNA mehr, da diese beim Aufreinigungsprozess zerstört wird. Im Unterschied zum chemisch-technischen Produkt fehlen jedoch Anilin-Spuren im biotechnischen Produkt. (EU, 1998; Stahmann et al., 2000).

Abschätzung zu den Stoffmengen in einer Riboflavin-Produktionsanlage

Die in einer Anlage befindlichen Stoffmengen haben große Bedeutung bei der Beurteilung des stoffbezogenen Gefahrenpotentials (vgl. StörfallV). Deshalb wird im Folgenden vor der Beschreibung der Verfahren eine Vorgehensweise benannt, anhand derer sich näherungsweise bestimmen lässt, welche Stoffmengen in einer „typischen“ Anlage

zur Riboflavin-Produktion innerhalb eines bestimmten Zeitraumes gehandhabt werden. Bei der Ableitung dieser Orientierungsgröße wurde wie folgt vorgegangen:

Ausgangspunkt war die Jahresproduktionsmenge an Vitamin B₂, die im Jahr 1999 bei rund 4.500 Mg lag und von der wir annahmen, dass diese im Wesentlichen der Produktion von Riboflavin mit einer Reinheit von 96 Gew.-% entsprach. Den Hauptanteil daran hatte mit 38 Gew.-% (1.710 Mg) Roche. Die im Jahr 2000 von Roche in Betrieb genommene biotechnische Produktionsanlage hat eine Anfang 2004 noch nicht vollständig ausgeschöpfte Produktionskapazität von bis zu 3.000 Mg/a (vgl. Abschnitt 5.1). Näherungsweise schlagen wir deshalb vor, von einer Anlage mit 2.400 Mg Jahresproduktion auszugehen und weiter anzunehmen, dass sich in der Anlage maximal die Stoffmenge befindet, die für eine Monatsproduktion benötigt bzw. in dieser Zeit hergestellt wird. Daraus ergibt sich eine monatliche Produktionskapazität von 200 Mg Riboflavin. Bezieht man die jeweilige Stoffmenge – wie oben beschrieben - jeweils auf die produzierte Riboflavin-Menge, so wäre ein Stoff, der auf die untere Abschneidgrenze von 2 Gew.-% kommt und deswegen nicht mehr betrachtet wird, immerhin noch mit einer Menge von 4 Mg in der Anlage enthalten. Folgende, in der Auswertung angegebene Größenordnungen würden damit den in Klammern gesetzten Stoffmengen entsprechen: ≤ 25 Gew.-% (≤ 50 Mg); 25 –50 Gew.-% (50 - 100 Mg); 50 –75 Gew.-% (100 - 150 Mg); 75 –100 Gew.-% (150 - 200 Mg). Auf diesem Wege können die in einer solchen Produktionsanlage befindlichen Stoffe für beliebige Variationen möglicher Produktionskapazitäten und Lagerdauern abgeschätzt werden.

7.4.2 Beschreibung der Produktionsverfahren

7.4.2.1 Vorgehensweise

Die folgende Beschreibung der Riboflavin-Produktion (Vitamin B2) orientiert sich an den beiden Verfahren, die von der Roche Vitamine GmbH vor und nach dem Jahr 2000¹ angewendet wurden (vgl. Abschnitt 5.1). Die Beschreibung der einzelnen Prozesse basiert auf einer Vielzahl von Informationsquellen (Bron et al., 1999; Bundesamt für Gesundheit, 2001; Datar u. Rosen, 1993; EU, 1998; Kurth et al., 1996; Meyer, 1996; OECD, 2001; Perkins et al., 1999; Pfortner, 1995; Pollak, 1990; Roche, 2003; Stahmann et al., 2000; Wollweber, 1989), die hier summarisch zitiert werden. Bezüglich der in den Prozessen eingesetzten bzw. hergestellten Gefahrstoffe wurde auf die beim ökobilanziellen Vergleich verwendeten Grunddaten zu den Stoffströmen sowie auf allgemein verfügbare Informationen zu den jeweiligen chemischen Reaktionen zurückgegriffen. Dabei war es unser Bestreben, einerseits die betrachteten Produktionsprozesse so zu charakterisieren, dass daraus die für die Beschreibung des Gefahrenpotentials wesentlichen prozessbezogenen Aspekte abgeleitet werden können. Andererseits wurde Wert darauf gelegt, spezifisches Know-how des Produzenten zu schützen und deshalb die Beschreibung in diesem Sinne relativ allgemein zu halten. So wurden für bestimmte Parameter nur Größenordnungen angegeben. Aus Gründen der Vertraulichkeit erfolgte auch in der Auswertung (s. u.) keine exakte Angabe der Stoffmengen, sondern lediglich eine Ausweisung relativer Mengen, die soweit sachlich geboten über zwei Prozesse hinweg aggregiert wurden.

7.4.2.2 Beschreibung des chemisch-technischen Produktionsverfahren

7.4.2.2.1 Überblick zu den relevanten Prozessen

Wie im Abschnitt 5.1 ausgeführt, gibt es vier Hauptproduktionsprozesse, die wesentlich für die chemisch-technische Produktion von Riboflavin (Vitamin B2) sind. Dabei handelt es sich um die Herstellung der Vorprodukte Barbitursäure und Azo-Farbstoff, die jeweils in einem zweistufigen Prozess erfolgt. Anschließend wird aus diesen beiden

¹ In diesem Jahr erfolgte die Umstellung vom chemisch-technischen auf den biotechnischen Prozess. Im Jahr 2003 wurde die Roche Vitamine GmbH von DSM Nutritional Products übernommen, die die biotechnische Produktionsanlage weiter betreibt.

Substanzen Riboflavin mit einer Reinheit von mindestens 96 Gew.-% synthetisiert und je nach Nachfrage in einem weiteren Schritt analog zum biotechnischen Prozess weiter veredelt. Diese vier Prozesse wurden im Folgenden beschrieben und dann im Abschnitt 7.4.3 hinsichtlich des damit verbundenen Gefahrenpotentials analysiert.

7.4.2.2.2 Herstellung des Azo-Farbstoffes

Die Herstellung des Azo-Farbstoffes erfolgt in zwei Schritten – der Ribamin-Herstellung und der darauf aufbauenden Synthese des für die Riboflavin-Produktion benötigten Azo-Farbstoffes.

Ribamin-Herstellung

Im ersten Prozessschritt reagiert 3,4-Xylidin (3,4-Dimethylanilin) mit D(-)-Ribose und Wasserstoff in einer hydrierenden Kondensation unter Zusatz eines Nickelkatalysators zu Ribamin (N-Ribitylamino-3,4-Xylidin) und Wasser. Die Reaktion erfolgt in einem Rührautoklaven bei Temperaturen um 60°C und einem Wasserstoffdruck zwischen 30 und 40 bar. Bei der anschließenden Einengung der Hydrierlösung mit dem darin befindlichen Feststoff-Anteil mittels Destillation und darauf folgender Filtration wird die Lösung auf eine Temperatur bis knapp 100°C erhöht. Die auf diesem Wege abgetrennte und mit Wasser versetzte Ribamin-Suspension wird in der nächsten Prozessstufe weiter verwendet.

Produktion des Azo-Farbstoffes

Die Ribamin-Suspension wird einem Reaktionskessel zugeführt, in dem zuvor aus Salzsäure und Anilin unter Zusatz von Wasser, Eis und einer wässrigen Natriumnitritlösung zuerst eine wässrige Lösung von Benzoldiazoniumchlorid hergestellt worden ist. Nach entsprechender Durchmischung wird eine Natriumacetat-Lösung zugegeben, die zur Bildung des Azo-Farbstoffes (N-Ribitylamino-4,5-dimethyl-2-phenylazobenzol) führt. Dieser fällt aus und wird dann abgetrennt, gewaschen und getrocknet. Die Temperatur im Reaktionskessel bewegt sich über den gesamten Syntheseprozess hinweg zwischen –15 bis 10°C, der pH-Wert liegt zwischen 1 und 4. Als Nebenprodukt mit einem Massenanteil von unter 10 Gew.-% fällt ein Isoazo-Farbstoff (N-Ribitylamino-3,4-dimethyl-2-phenylazobenzol) an.

7.4.2.2.3 Herstellung der Barbitursäure

Barbitursäure (Hexahydropyrimidin-2,4,6-trion), ein cyclisches Ureid, wird durch Kondensation von Malonsäureester und Harnstoff hergestellt. Im Folgenden werden die beiden Prozesse, die üblicherweise direkt in räumlichen Zusammenhang mit der chemisch-technischen Herstellung von Riboflavin stehen und entsprechend in der Ökobilanz aggregiert als ein Prozess bilanziert wurden – die Herstellung des Malonsäureesters und die darauf basierende Synthese der Barbitursäure – betrachtet.

Synthese von Malonsäurediethylester

Die Herstellung erfolgt im sogenannten Wasserstoff-Cyanid-Prozess. Dazu wird eine 25 %-ige wässrige Natriumcyanidlösung in einem Edelstahl-Reaktionskessel auf 65 – 70°C erhitzt. Anschließend wird langsam und unter Rühren eine zuvor hergestellte wässrige Lösung des Natriumsalzes der Chloressigsäure zugeführt. Dabei darf die Temperatur einen Wert von 90°C nicht überschreiten. Auf diesem Temperaturniveau wird die Lösung eine Stunde lang gerührt. Dabei in Spuren entstehendes Wasserstoff-Cyanid (Blausäure) wird fortlaufend entfernt und neutralisiert. Die auf diesem Wege hergestellte Lösung von Natriumcyanacetat wird unter Vakuum aufkonzentriert und in einen mit Glas ausgekleideten Kessel gebracht, wo die nachfolgende Verseifung und Veresterung stattfinden. Dazu werden Alkohol (Methanol) und eine anorganische Säure (Schwefelsäure) im Verhältnis 1:2 bis 1:3 zugemischt, wobei die Temperatur nicht über den Bereich von 60°C bis 80°C steigen sollte. Die Alkoholzugabe liegt bei rund 1,2 Mol je erwartetes Mol Ester. Diese Mischung wird über 6-8 Stunden hinweg im Rückfluss auf 110°C gehalten, wobei das Zwischenprodukt Malonsäureestermonoamid zu Malonsäurediethylester hydrolysiert wird, der dann aus der Lösung abgetrennt und aufgereinigt wird. Da bei dem Prozess über das Zielprodukt hinaus verschiedene niedermolekulare Kohlenwasserstoffe entstehen, die zum Teil chloriert sind, und zudem die verbleibende wässrige Phase hohe Mineralsalz und Säuregehalte aufweist, ist die Abluft- und Abwasserreinigung im Vergleich zur eher einfachen Produktionsanlage relativ aufwendig.

Synthese der Barbitursäure

Aus dem Malonsäurediethylester und Harnstoff wird über klassische Kondensation Barbitursäure synthetisiert. Dazu wird die Mischung unter Zugabe von Essigsäureanhydrid rund 45 Minuten auf einer Temperatur von 110°C gehalten. Danach kann die Barbitursäure über Wasserzugabe ausgefällt und abfiltriert werden.

7.4.2.2.4 Herstellung von Riboflavin aus Azo-Farbstoff und Barbitursäure

Azo-Farbstoff und Barbitursäure werden zur gewünschten Cyclokondensation in einem Reaktionskessel, in dem bereits 1,4-Dioxan als Lösemittel sowie Essigsäure vorgelegt wurden, zusammengeführt und über einen längeren Zeitraum gerührt. Bei dem dabei einsetzenden Synthesevorgang, der unter Stickstoff-Inertisierung erfolgt, liegen die Temperaturen zwischen 80°C bis knapp 110°C. Als Nebenprodukt entsteht dabei Anilin. Das Riboflavin wird mittels Zentrifugen abgetrennt, mit Dioxan, Wasser und Methanol gewaschen und zur Abfüllung getrocknet. Dabei handelt es sich um ein Produkt mit 96-%iger Reinheit, das in der Tierernährung eingesetzt wird. Aus der verbleibenden Mutterlauge sowie der Waschlauge werden über eine mehrstufige Lösemittelregenerierung (Verdampfer, Trockner, Stripper, Dekanteur, Destillationskolonnen, etc.) Anilin, Dioxan, Acetat und Methanol zurückgewonnen und wieder eingesetzt.

7.4.2.2.5 Aufkonzentration des Riboflavins auf über 98 Gew.-%

Durch Rekristallisation wird entsprechend der Nachfrage und analog zum biotechnischen Prozess aus der Riboflavin-Rohware ein höherwertiges, auch für den Einsatz im Pharmabereich und der Nahrungsmittelproduktion geeignetes Produkt mit einem Riboflavin-Gehalt größer 98 Gew.-% hergestellt. Dazu wird das im Vorprozess gewonnene Riboflavin mit einer Reinheit von 96 Gew.-% in Salzsäure gelöst, mittels Filtration unter Zugabe von Filterhilfsmitteln von Fremdanteilen befreit und anschließend in aufeinander folgenden Fällungsschritten wieder aus der Lösung zurückgewonnen, mit deionisiertem Wasser gewaschen, getrocknet und abgefüllt. Die Lösung des Riboflavins erfolgt bei Temperaturen von 30 bis 40°C, bei der Fällung bewegen sich diese zwischen 25 bis 80°C.

7.4.2.3 Beschreibung des biotechnischen Produktionsverfahren

7.4.2.3.1 Vorbemerkung

Wie im Abschnitt 5.1 näher beschrieben gibt es mehrere Mikroorganismen-Arten, die derzeit zur biotechnischen Produktion von Vitamin B₂ eingesetzt werden. Die folgende Darstellung orientiert sich an dem bereits in oben genannten Abschnitt ökonomisch untersuchten biotechnischen Produktionsprozess. Auch die Biosynthese von Riboflavin beruht auf mehreren aufeinanderfolgenden Syntheseschritten. Ausgangsstoff ist in diesem Fall Glucose, die aus dem nachwachsenden Rohstoff Maisstärke hergestellt wurde. Im Unterschied zum chemisch-technischen Produktionsprozess erfolgt die Riboflavin-Synthese jedoch durch gentechnisch entsprechend optimierte Mikroorganismen. In diesen laufen die einzelnen Syntheseschritte nacheinander kontrolliert über Enzyme ab. Damit kann anders als beim chemisch-technischen Verfahren dieser Synthesevergang in einem einzigen Prozess – der Fermentation in einem großen geschlossenen Kessel mit anschließender Abtrennung und Reinigung des Riboflavins – erfolgen. Je nach Marktnachfrage wird ein Teil des Riboflavins analog zum chemisch-technischen Prozess weiter aufgereinigt und auf diesem Wege ein höherwertiges Produkt (Reinheit > 98 %) hergestellt. Diese beiden Hauptschritte werden im Folgenden knapp charakterisiert. Zum Schutz von Unternehmens-Know-how kann keine bis ins Detail gehende Darstellung erfolgen.

7.4.2.3.2 Fermentation und Gewinnung von Riboflavin (mind. 96 Gew.-%)

Die biotechnische Produktion erfolgt in einem einstufigen Fermentationsprozess, in dem ein gentechnisch modifizierter *Bacillus subtilis*-Stamm aus einem Nährsubstrat Riboflavin produziert. Die Nährlösung besteht dabei in erster Linie aus in Wasser gelöster Glucose, die entsprechend der Wachstumsanforderungen des Mikroorganismus um eine Stickstoff-Quelle und Mineralsalze sowie ein Antischaummittel ergänzt wird. Zum Beimpfen und zur schnellen Besiedlung der sterilisierten Nährlösung, die sukzessive in den mehr als 100 m³ fassenden geschlossenen Großfermenter zugeführt wird, ist eine ausreichend große Mikroorganismenpopulation erforderlich. Deren Anzucht aus einer definierten Kultur erfolgt mittels einer Vorfermentation, bei der die Substratmenge schrittweise erhöht wird.

Alle Fermentationsprozesse laufen näherungsweise unter Normaldruck und aeroben Bedingungen ab. Die Temperaturen liegen dabei im mesophilen Bereich (20 - 40°C), die pH-Werte im neutralen Bereich. Der gesamte Fermentationsprozess dauert wenige Tage. Bei diesem diskontinuierlichen Batch-Prozess werden mehrere Großfermenter zeitlich versetzt nebeneinander betrieben.

Nach Abschluss der Fermentation wird der pH-Wert der Fermentationsbrühe über Säurezugabe geringfügig abgesenkt. Dann wird diese pasteurisiert (Temperatur 60°C bis 90°C), um die Mikroorganismen abzutöten. Über mehrere Dekanter werden nachfolgend aus der wässrigen Biomasse-Suspension die schwereren Vitamin B2-Kristalle abgetrennt. Die Biomasse-Fraktion wird von einem Trockensubstanzgehalt von unter 5 Gew.-% auf einen Anteil von rund 30 Gew.-% eingedampft und dann als Abfall mittels Kompostierung oder Vergärung verwertet. Der verbleibende Vitamin B2-Brei wird in weiteren Schritten mit Säure behandelt, mittels Dekanter und Filter weiter aufkonzentriert, dazwischen mehrfach mit Wasser gewaschen und dann getrocknet. Eventuell noch vorhandene aktive Bakterien-DNA wird durch diese Behandlung zerstört. Auf diesem Wege wird analog zum chemisch-technischen Prozess ein Produkt mit einem Riboflavin-Anteil von mindestens 96 Gew.-% hergestellt, das als Zusatz in Tierfutter eingesetzt wird. Zur Reinigung der Produktionsanlage wird in erster Linie verdünnte Natronlauge eingesetzt.

7.4.2.3.3 Aufkonzentration des Riboflavins auf über 98 Gew.-%

Analog zum chemisch-technischen Prozess wird ein Teil des im vorhergehenden Prozess hergestellten Riboflavin-Produkts weiter veredelt. Dazu wird das Vorprodukt in Säure gelöst und mittels Filtration unter Einsatz von Filterhilfsmitteln von noch vorhandenen organischen Nebenbestandteilen befreit. Über weitere Filtrationsschritte und säurefreie Waschvorgänge wird das Produkt weiter gereinigt. Am Ende wird das dazu auskristallisierte Riboflavin mit einer Reinheit von größer 98 % abgetrennt, wieder resuspendiert und dann getrocknet.

7.4.3 Vergleich des Gefahrenpotentials

7.4.3.1 Vorbemerkung

Wie oben beschrieben, wird im Folgenden die vergleichende Analyse bezüglich des Gefahrenpotentials unterteilt in drei Unterpunkte durchgeführt: Bezogen auf gefahrenrelevante Prozessparameter (vgl. Abschnitt 7.4.3.2), auf die in diesen Prozessen eingesetzten Stoffe (vgl. Abschnitt 0) und auf die dabei relevanten biologischen Arbeitsstoffe (vgl. Abschnitt 0). Die wesentlichen Ergebnisse werden am Ende jedes dieser Abschnitte in einem knappen Fazit festgehalten und abschließend in einer zusammenfassenden Bewertung gemeinsam diskutiert.

Der entsprechende Untersuchungsrahmen wird im Abschnitt 7.4.1 beschrieben. Des Weiteren gehen wir davon aus, dass wie über Gesetze an vielen Stellen vorgegeben (z.B. BetrSichV, 2004; GefStoffV, 2004, §§ 14 u. 16; StörfallV, 2000; TRBA; TRGS) zum Schutz der Arbeitnehmer, der Nachbarschaft und der Umwelt erforderliche Maßnahmen und Vorkehrungen nach dem Stand der Technik umgesetzt sind. Auf diesem Wege können die aus den Gefahrenpotentials möglicherweise resultierenden Gefährdungen für diese Schutzobjekte wesentlich reduziert werden.

7.4.3.2 Prozessbedingtes Gefahrenpotential

In der folgenden Tabelle 7-16 sind die Daten zusammengestellt, die zur Beurteilung des prozessbezogenen Gefahrenpotentials vorliegen bzw. näherungsweise dazu angenommen wurden. Es zeigt sich, dass nur zu wenigen Kriterien verwendbare Daten vorhanden sind. Dabei handelt es sich vor allem um Angaben zu Druck und Temperatur.

Vergleicht man die Temperatur zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen dem biotechnischen und dem chemisch-technischen Verfahren: Während der Hauptprozess des biotechnische Verfahrens – die Fermentation - im mesophilen Bereich und damit etwa bei einer üblichen bis wärmeren Raumtemperatur abläuft, sind die Temperaturen bei den sechs an der chemisch-technischen Riboflavin-Produktion beteiligten Prozesse entweder deutlich höher bis zu über 100°C - oder bewegen sich sogar im Bereich unter 0°C.

Bezüglich des Druckes schneidet der biotechnische Prozess ebenfalls besser ab, auch wenn nur für einen der Teilprozesse der Druck bekannt ist. Hier spricht für die Fermentation, dass dies quasi bei Normaldruck abläuft.

Bezüglich der Geschlossenheit der Anlage nehmen wir analog zum Vorgehen beim stoffbezogenen Gefahrenpotential an, dass es keine Unterschiede gibt. Hinsichtlich der Exothermie der beteiligten Prozesse fehlen Daten, um diese belastbar auswerten zu können, es ist jedoch davon auszugehen, dass der biotechnische Prozess hier unproblematisch ist. Soweit wir dies beurteilen können, handelt es sich bei der überwiegenden Zahl der Prozesse – möglicherweise auch bei der Aufkonzentration von Riboflavin – um diskontinuierliche Prozesse. Die Frage, ob es sich um Prozesse mit inhärenter Sicherheit handelt, kann aus unserer Sicht nur für den Fermentationsprozess beantwortet werden. Da *Bacillus subtilis* lediglich in einem bestimmten Temperaturbereich wachsen kann, würde der Fermentationsprozess bei einer Temperaturerhöhung von sich aus zum Abbruch kommen.

Tabelle 7-16: Informationen zum prozessbezogenen Gefahrenpotential der chemisch-technischen bzw. biotechnischen Riboflavin-Produktion

	Druck [bar]	Temperatur [°C]	Geschlossene Anlage*	Exothermer Prozess	Kontinuierlicher Prozess	Prozess mit inhärenter Sicherheit
Chemisch-technisches Verfahren						
1) Herstellung des Azo-Farbstoffes						
a) Ribamin-Herstellung	30-40	60 - 100	(ja)	k.A.	nein	k.A.
b)Produktion Azo-Farbstoff	k.A.	-15 - 10	(ja)	k.A.	nein	k.A.
2) Herstellung der Barbitursäure						
a) Malonsäurediethylester-Synthese	k.A.	65 - 110	(ja)	k.A.	nein	k.A.
b) Barbitursäure-Synthese	k.A.	110	(ja)	k.A.	nein	k.A.
3) Riboflavin-Synthese	k.A.	80-100	(ja)	k.A.	nein	k.A.
4) Aufkonzentration von Riboflavin	k.A.	25 - 80	(ja)	k.A.	k.A.	k.A.
Biotechnisches Verfahren						
1) Fermentative Riboflavin-Gewinnung	1	20-40	(ja)	k.A.	nein	(ja)
2) Aufkonzentration von Riboflavin	k.a.	k.A.	(ja)	k.A.	k.A.	k.A.
() Angaben in Klammern stellen eine Einschätzung der Bearbeiter dar * analog zu „Gefahren durch das Verfahren“ im Spaltenmodell nach TRGS 440 (2002)						

Fazit: Der Vergleich bezüglich des prozessbezogenen Gefahrenpotentials zeigt Vorteile aus Sicht des biotechnischen Prozesses. Dies liegt vor allem daran, dass dieser Fermentationsprozess bei quasi natürlichen Bedingungen vor sich geht – bei nahezu Raumtemperatur und Umgebungsluftdruck. Die Temperaturen in den Prozessen im Zusammenhang mit der chemisch-technischen Riboflavin-Produktion gehen dagegen von unter 0°C bis zu 110°C, der Druck im Reaktionskessel geht – soweit bekannt – bis zu 40 bar. Festzuhalten ist aber auch, dass die Datenlage trotz relativ umfangreicher Prozesskenntnisse nur bei der Temperatur gut ist, bezüglich aller anderen Angaben dagegen nur einzelne Werte vorliegen. Unabhängig davon kommt dem biotechnischen Prozess zusätzlich zugute, dass die Fermentation bei einer Überhitzung aufgrund des damit verbundenen Absterbens der Mikroorganismen von alleine stoppen würde – und so quasi eine inhärente Sicherung aufweist. Inwieweit dies auf die Synthese-Prozesse bei der chemisch-technischen Riboflavin-Produktion ähnlich zutrifft, kann aufgrund der vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

7.4.3.3 Stoffbedingtes Gefahrenpotential

Zur Beurteilung des Gefahrenpotentials, dass aus dem Umgang mit Stoffen in den betrachteten Produktionsprozessen resultiert, wurden zuerst grundlegende Informationen zu den Arbeitsstoffen zusammengetragen (vgl. Tabellen Tabelle 7-17 bis Tabelle 7-21). Diese Betrachtung umfasst sowohl Vorprodukte als auch in den Prozessen gebildete Zwischenprodukte sowie End- und Nebenprodukte. Aus dieser Darstellung ließen sich bereits erste Einschätzungen ableiten. Im Anschluss daran wurden die relevanten Stoffe gemäß des in Abschnitt 7.3.4.3 vorgestellten Spaltenmodells nach TRGS 440 (2002) bezüglich ihres Gefahrenpotentials eingestuft (vgl. Tabelle 7-24). In diesem Zusammenhang wurden auch die relativen Verhältnisse der Stoffmengen zueinander auf relativ grober Ebene dargestellt. Auf diesen Informationen basiert die am Ende dieses Abschnitts stehende verbal-argumentative Bewertung der beiden miteinander verglichenen Verfahren.

Bei der Recherche der in den nachfolgenden Tabellen dokumentierten stoffbezogenen Informationen wurden folgende, hier summarisch zitierten Informationsquellen genutzt: BauA, 2003; BIA, 2003; BIA, 2004; BIA, 2004a; ChemFinder, 2004; CSI, 2004; ISI, 2004; MERCK, 2004; StörfallIV, 2000; TRGS 440, 2002; TRGS 900, 2003; TRGS 903,

2002; TRGS 905, 2003; TRGS 907, 2002; VCI, 1998. Die insbesondere für Lösungen angegebenen Konzentrationen beziehen sich dabei nicht auf einen konkreten Produktionsprozess, sondern orientieren sich an handelsüblichen Produkten. Ausführlichere Informationen zu diesen Stoffen finden sich im Anhang zu diesem Abschnitt. Dort werden unter anderem - soweit vorhanden - zusätzlich für jeden Stoff die englische Bezeichnung, Synonyme, die CAS-Nummer, die Summenformel und ein Strukturmodell aufgeführt. Zusammen damit werden im Anhang einige wesentliche physikalische Größen (Aggregatzustand, Dampfdruck, Flammpunkt, Siedetemperatur) sowie Angaben zu krebserzeugenden Eigenschaften aufgeführt, die beide für die Einstufung nach dem Spaltenmodell der TRGS 440 (2002) erforderlich sind. Da für keinen der prozessrelevanten Stoffe erbgutverändernde oder fortpflanzungsgefährdende Eigenschaften recherchiert wurden, wurden diese Punkte in der folgenden Tabelle nicht mehr ausgewiesen, jedoch bei der Recherche der im Anhang zusammengestellten Daten ebenfalls geprüft. Dies gilt auch für die BAT-Werte, die nur für wenige Stoffe relevant waren, sowie für weitere Angaben zur Toxizität (EC50, LC 50, LD50).

Die Festlegung der Mengenschwellen nach Störfall-Verordnung (2000) sowie die Einstufung nach dem Spaltenmodell der TRGS 440 (2002), die sich jeweils am Ende der folgenden Tabellen finden, wurde auf Basis der im Anhang zusammengestellten stoffbezogenen Angaben vorgenommen.

Tabelle 7-17: Azo-Farbstoff-Herstellung: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Herstellung)

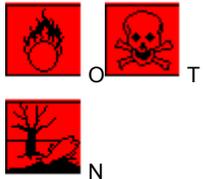
Stoffbezeichnung	Salzsäure 30 %	Natriumhydroxid-Lösung 50 %	D(-)-Ribose	Essigsäure 30 %
Gefährlichkeitsmerkmale	ätzend	ätzend	---	ätzend
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 C	 C	---	 C
R-Sätze	R34, R37	R35	---	R34
WGK	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)
MAK-Wert	5 ml/m ³ ; 8 mg/m ³	8 mg/m ³ (Staub)	---	25 ml/m ³ ; 10 mg/m ³
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	---	---	---	---
Stoffbezeichnung	3,4-Xylidin	Wasserstoff	Natriumnitrit	Anilin
Gefährlichkeitsmerkmale	giftig, umwelt-gefährlich	hochentzündlich	brandfördernd, giftig, umwelt-gefährlich	krebserzeugend, giftig, umwelt-gefährlich
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 T N	 F+	 O T N	 T N
R-Sätze	R 23/24/25-33-51/53	R12	R 8-25-50	R 20/21/22-40-48/23/24/25-50
WGK	2 (wassergefährdend)	---	2 (wassergefährdend)	2 (wassergefährdend)
MAK-Wert	5 ml/m ³ ; 25 mg/m ³	---	---	2 ml/m ³ ; 7,7 mg/m ³
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	50.000 kg	10.000 kg	50.000 kg	50.000 kg
Stoffbezeichnung	Methanol	Ribamin	Benzoldiazonium-chlorid-Lösung	Azo-Farbstoff
Gefährlichkeitsmerkmale	leicht entzündlich, giftig	k.A.	k.A.	krebserzeugend (BIA 2004)
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 F T	k.A.	k.A.	k.A.
R-Sätze	R 11-23/24/25-39/23/24/25	k.A.	k.A.	R40/45 (Einstufung nach BIA 2004)
WGK	1 (schwach wasser-gefährdend)	k.A.	k.A.	k.A.
MAK-Wert	200 ml/m ³ ; 270 mg/m ³	k.A.	k.A.	k.A.
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	500.000 kg	keine Einstufung wg. fehlender Daten	keine Einstufung wg. fehlender Daten	keine Einstufung wg. fehlender Daten
Weitere Informationen		Zwischenprodukt; keine weiteren Daten verfügbar	Zwischenprodukt; keine weiteren Daten verfügbar	Zwischenprodukt; keine weiteren Daten verfügbar

Tabelle 7-18: Barbitursäure-Synthese: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Herstellung) – Teil 1

Stoffbezeichnung	Natriumhydroxid-Lösung 25 %	Natriumhydroxid-Lösung 50 %	Schwefelsäure 96 %	Natriumcyanid
Gefährlichkeitsmerkmale	ätzend	ätzend	ätzend	sehr giftig, umweltgefährlich
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 C	 C	 C	 T+  N
R-Sätze	R35	R35	R 35	R 26/27/28-32-50/53
WGK	1 (schwach wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)	3 (stark wassergefährdend)
MAK-Wert	2 mg/m ³ (Staub)	2 mg/m ³ (Staub)	0,1 mg/m ³	5 mg/m ³ (Staub)
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	---	---	---	5.000 kg
Stoffbezeichnung	Chloressigsäure	Harnstoff	Isobutanol	Methanol
Gefährlichkeitsmerkmale	giftig, ätzend, umweltgefährlich	---	entzündlich, reizend	leicht entzündlich, giftig
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 T  N	---	 Xi	 F  T
R-Sätze	R 25-34-50	---	R 10-37/38-41-67	R 11-23/24/25-39/23/24/25
WGK	2 (wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)
MAK-Wert	1 ml/m ³ ; 4 mg/m ³	---	100 ml/m ³ ; 310 mg/m ³	200 ml/m ³ ; 270 mg/m ³
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	50.000 kg	---	50.000 kg	500.000 kg
Stoffbezeichnung	Wasserstoff-Cyanid	Cyanessigsäure	Malonsäurediamid	Malonsäurediethylester
Gefährlichkeitsmerkmale	hochentzündlich, sehr giftig, umweltgefährlich	<i>gesundheitsschädlich, ätzend, umweltgefährlich</i>	---	---
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 T+  N  F+	 C	---	---
R-Sätze	R12-26-50/53	R 20/22-34-37-52/53	---	---
WGK	3 (stark wassergefährdend)	2 (wassergefährdend)	---	1 (schwach wassergefährdend)
MAK-Wert	10 ml/m ³ ; 11 mg/m ³	---	---	---
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	5.000 kg	---	---	---
Weitere Informationen	Entsteht in Spuren bei der Synthese	Zwischenprodukt der Malonester-Synthese	Näherungsweise f. ZP Malonsäureesteramid	

Tabelle 7-19: Barbitursäure-Synthese: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Herstellung) – Teil 2

Stoffbezeichnung	Barbitursäure	Ammoniak 13 %	Methanol	---
Gefährlichkeitsmerkmale	---	ätzend	leicht entzündlich, giftig	
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	---	 C	 F  T	
R-Sätze	---	R34	R 11-23/24/25-39/23/24/25	
WGK	1 (schwach wassergefährdend)	2 (wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)	
MAK-Wert	---	50 ml/m ³ bzw. 35 mg/m ³	200 ml/m ³ bzw. 270 mg/m ³	
StörfallV (Anh.1/Sp. 4): Mengenschwelle	---	---	500.000 kg	
Weitere Informationen	kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG			

Tabelle 7-20: Chemisch-technische Riboflavin-Synthese aus Azo-Farbstoff und Barbitursäure: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen

Stoffbezeichnung	Azo-Farbstoff	Barbitursäure	1,4-Dioxan	Methanol
Gefährlichkeitsmerkmale	krebserzeugend (BIA 2004)	---	<i>leicht entzündlich, reizend, krebserzeugend</i>	leicht entzündlich, giftig
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	k.A.	---	 	 
R-Sätze	R40/45 (Einstufung nach BIA 2004)	---	R 11-19-36/37-40-66	R 11-23/24/25-39/23/24/25
WGK	k.A.	1 (schwach wassergefährdend)	2 (wassergefährdend)	1 (schwach wassergefährdend)
MAK-Wert	k.A.	---	20 ml/m ³ ; 73 mg/m ³	200 ml/m ³ bzw. 270 mg/m ³
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	keine Einstufung wg. fehlender Daten	---	5.000.000 kg	500.000 kg
Weitere Informationen	Zwischenprodukt; keine R-Sätze, da kein Handelsprodukt; nicht Benzidin-haltig → K1 oder K2 (BIA 2004)		wird üblicherweise als Lösemittel eingesetzt und im Kreis gefahren	
Stoffbezeichnung	Essigsäure 30 %	Riboflavin 96 %		
Gefährlichkeitsmerkmale	ätzend	---		
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 C	---		
R-Sätze	R34	---		
WGK	1 (schwach wassergefährdend)	nwg (nicht wassergefährdend)		
MAK-Wert	25 ml/m ³ ; 10 mg/m ³	---		
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	---	---		
Weitere Informationen		Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG		

Tabelle 7-21: Riboflavin-Aufkonzentration auf 98 Gew.-%: Gefahrenbezogene Informationen zu beteiligten Stoffen (chemisch-technische Riboflavin-Produktion)

Stoffbezeichnung	Riboflavin 96 %	Salzsäure 24 %	Methanol	Riboflavin 98 %
Gefährlichkeitsmerkmale	---	reizend	leicht entzündlich, giftig	---
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	---	 Xi	 F  T	---
R-Sätze	---	R36/37/38	R 11-23/24/25-39/23/24/25	---
WGK	nwg (nicht wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	nwg (nicht wasser-gefährdend)
MAK-Wert	---	5 ml/m ³ ; 8 mg/m ³	200 ml/m ³ ; 270 mg/m ³	---
StörfallV (Anh. 1/Sp. 4): Mengenschwelle	---	---	500.000 kg	---
Weitere Informationen	Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG			Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG

Bereits diese relativ einfache Zusammenstellung gefahrenbezogener Informationen zu den für den Vergleich relevanten Stoffen ergibt einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Verfahrensalternativen: Die Zahl der benötigten bzw. als Zwischenprodukt entstehenden Stoffe ist beim chemisch-technischen Verfahren deutlich höher. Während sie dort je nach Zählweise (mit bzw. ohne Doppelzählungen) zwischen 25 bis 35 liegt, sind beim biotechnischen Prozess lediglich 10 Stoffe in der bei diesem Vergleich berücksichtigten Größenordnung vertreten. Darüber hinaus weisen die beim biotechnischen Prozess relevanten Stoffe eine weitgehende Einheitlichkeit bei den Gefährlichkeitsmerkmalen aus: Entweder sind die Stoffe ungefährlich, reizend oder maximal ätzend und nur in einem Fall auch gesundheitsschädlich. Als problematische Stoffe werden lediglich mineralische Säuren oder Laugen eingesetzt.

Dagegen finden sich beim chemisch-technischen Prozess ein „bunter Zoo“ an stoffbezogenen Gefährlichkeitsmerkmalen, die von reizend über gesundheitsschädlich, ätzend, umweltgefährlich, giftig, sehr giftig, brandfördernd, leicht entzündlich bis hin zu hochentzündlich reichen. Während beim biotechnischen Verfahren kein einziger Stoff beteiligt ist, der in der Störfall-Verordnung (2000) mit einer Mengenschwelle belegt wird, ist dies beim chemisch-technischen Prozess über zehnmal der Fall. Gerade die Kombination aus giftigen, sehr giftigen oder umweltgefährlichen Stoffen mit Stoffen, die entzündlich bis hoch entzündlich sind, in einem Prozess, dürfte die aus dem Blickwinkel der Störfall-Vorsorge bedenklichste Mischung darstellen.

Tabelle 7-22: Biotechnischen Herstellung von Riboflavin aus Glucose: Gefahrenbezogene Informationen zu den beteiligten Stoffen

Stoffbezeichnung	Glucose	Natriumhydroxid-Lösung 25 %	Ammoniak 13 %	Hefeextrakt
Gefährlichkeitsmerkmale	---	ätzend	ätzend	---
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	---	 C	 C	---
R-Sätze	---	R35	R34	---
WGK	nwg (nicht wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	2 (wassergefährdend)	nwg (nicht wasser-gefährdend)
MAK-Wert	---	2 mg/m ³ (Staub)	50 ml/m ³ ; 35 mg/m ³	---
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	---	---	---	---
Weitere Informationen	Stoff mit minimalen Risiko laut EG-VO 793/93 (BIA, 2002,)			Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG
Stoffbezeichnung	Kaliumhydroxid-Lösung 45 %	Phosphorsäure 75 %	Schwefelsäure 96 %	Magnesiumsulfat
Gefährlichkeitsmerkmale	gesundheitsschädlich, ätzend	ätzend	ätzend	---
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	 C	 C	 C	---
R-Sätze	R 22-35	R 34	R 35	---
WGK	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)
MAK-Wert	---	1 mg/m ³	0,1 mg/m ³	---
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	---	---	---	---
Weitere Informationen				Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/54/EWG
Stoffbezeichnung	Riboflavin 96 %	---	---	---
Gefährlichkeitsmerkmale	---			
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	---			
R-Sätze	---			
WGK	nwg (nicht wasser-gefährdend)			
MAK-Wert	---			
StörfallV (Anh.1/Sp.4): Mengenschwelle	---			
Weitere Informationen	Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG			

Tabelle 7-23: Riboflavin-Aufkonzentration auf 98 Gew.-%: Gefahrenbezogene Informationen zu beteiligten Stoffen (biotechnische Riboflavin-Herstellung)

Stoffbezeichnung	Riboflavin 96 %	Salzsäure 24 %	Riboflavin 98 %	
Gefährlichkeitsmerkmale	---	reizend	---	
Gefahrensymbole mit Gefahrenzeichen	---	 Xi	---	
R-Sätze	---	R36/37/38	---	
WGK	nwg (nicht wasser-gefährdend)	1 (schwach wasser-gefährdend)	nwg (nicht wasser-gefährdend)	
MAK-Wert	---	5 ml/m ³ bzw. 8 mg/m ³	---	
StörfallV (Anh. 1/Sp. 4): Mengenschwelle	---	---	---	
Weitere Informationen	Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG		Kein Gefahrstoff im Sinne RL 67/548/EWG	

Nach dem die obige erste Auswertung der gefahrenbezogenen Stoffinformationen bereits eine deutliche Differenzierung zwischen den beiden miteinander verglichenen Verfahren der Riboflavin-Produktion gezeigt hat, wird im Folgenden das im Abschnitt 7.3.4.3 beschriebene Spaltenmodell nach TRGS 440 (2002) auf alle beteiligten Stoffe angewendet. Dabei wurde über die Angaben in den obigen Tabellen hinaus auf weitere Stoffdaten zurückgegriffen, die im Anhang dokumentiert sind.

Tabelle 7-24: Stoffbezogenes Gefahrenpotential für die chemisch-technische Riboflavin-Produktion - Einstufung nach dem Spaltenmodell der TRGS 440 (2002)

Stoffbezeichnung	akute Gesundheitsgefahren	chronische Gesundheitsgefahren	Umweltgefahren	Brand-/Explosionsgefahren	Gefahren durch Freisetzungsvverhalten	Gefahren durch das Verhalten*	Relativer Mengenanteil (s. Erläuterung am Tabellenende)
Herstellung des Azo-Farbstoffes							
Salzsäure 30 %	C	E	D	E	C	C	■■■■■■■
Natriumhydroxid-Lösung 50 %	B	E	D	E	D	C	■■■■■■■
D(-)-Ribose	E	E	D	E	E	C	■■■
Essigsäure 30 %	C	E	D	E	---	C	■■■
3,4-Xylidin	B	B	A	E	E	C	■■
Wasserstoff	E	E	E	A	A	C	■■
Natriumnitrit	B	E	A	A	E	C	■
Anilin	A	B	A	E	E	C	■
Methanol	B	D	D	B	B	C	■
Ribamin	---	---	---	---	---	C	(■■■■■)
Benzoldiazoniumchlorid-Lösung	---	---	---	---	---	C	(■■■■■)
Azo-Farbstoff	---	A	---	---	---	C	■■■■■
Herstellung der Barbitursäure							
Natriumhydroxid-Lösung 25 %	B	E	D	E	D	C	■■■■■■■ ■■■
Natriumhydroxid-Lösung 50 %	B	E	D	E	D	C	■■
Schwefelsäure 96 %	B	E	D	E	E	C	■■■■■■■
Natriumcyanid	A	E	A	E	E	C	■■■■
Chloressigsäure	B	E	A	E	E	C	■■■
Harnstoff	E	E	D	E	E	C	■■
Isobutanol	D	E	D	C	C	C	■
Methanol	B	D	D	B	B	C	■■
Wasserstoff-Cyanid	A	E	A	A	A	C	(■)
Cyanessigsäure	C	E	C	E	E	C	(■■)
Malonsäurediamid	E	E	E	E	E	C	(■■)

Tabelle 7-25: Stoffbezogenes Gefahrenpotential für die biotechnische Riboflavin-Produktion - Einstufung nach dem Spaltenmodell der TRGS 440 (2002)

Stoffbezeichnung	akute Gesundheitsgefahren	chronische Gesundheitsgefahren	Umweltgefahren	Brand-/Explosionsgefahren	Gefahren durch das Freisetzungsverhalten	Gefahren durch das Verfahren*	Relativer Mengenanteil (s. Erläuterung am Tabellenende)
Fermentative Gewinnung von Riboflavin aus Glucose							
Glucose	E	E	E	E	E	C	■■■■■■■■■■ ... (vertraulich)
Natriumhydroxid-Lösung 25 %	B	E	D	E	D	C	■■■■■■■■■■ ■■■■
Ammoniak 13 %	C	E	C	E	A	C	■■■
Hefeextrakt	E	E	E	E	E	C	... (vertraulich)
Kaliumhydroxid-Lösung 45 %	B	E	D	E	D	C	■
Phosphorsäure 75 %	C	E	D	E	D	C	■
Schwefelsäure 96 %	B	E	D	E	E	C	■■■
Magnesiumsulfat	E	E	D	E	E	C	■
Riboflavin 96 %	E	E	E	E	E	C	■■■■
Riboflavin-Aufkonzentration auf 98 Gew.-%							
Riboflavin 96 %	E	E	E	E	E	C	■
Salzsäure 24 %	D	E	D	E	C	C	■■■■
Riboflavin 98 %	E	E	E	E	E	C	■
Gefahrenpotential: A sehr hoch B hoch C mittel D gering E vernachlässigbar Stoffmenge: Ein Quadrat ■ repräsentiert eine Stoffmenge im Prozess von ≤ 25 Gew.-% (≤ 250 kg) bezogen auf 1000 kg Riboflavin mit einer Reinheit von 96 Gew.-%. Datenlücken: --- steht für die aufgrund fehlender Daten nicht mögliche Einstufung; () weist auf eine Abschätzung auf Grundlage wenig belastbarer Informationen hin * Annahme zu den Gefahren durch das Verfahren: geschlossene Anlage mit Expositionsmöglichkeit z.B. beim Abfüllen, bei der Probenahme oder bei der Reinigung							

Beim chemisch-technischen Verfahren fällt auf, dass in drei der vier Prozesse das Gefahrenpotential in der gemeinsam gezählten Spalte Gesundheitsgefahren (akut, chronisch) mindestens einmal die Einstufung sehr hoch aufweist und in diesen Fällen zudem jeweils noch mehrfach die Wertung hoch für einzelne Stoffe vergeben wird. Auch

der vierte Prozess – die Riboflavin-Aufkonzentration – weist hier ein hohes Gefahrenpotential auf. Dagegen werden bei der fermentativen Gewinnung von Riboflavin in dieser Spalte lediglich drei Stoffe mit hoch bewertet, wobei es sich jeweils um ätzende Flüssigkeiten handelt. Durchgehend vernachlässigbar ist hierbei jedoch – anders als beim chemisch-technischen Verfahren – das Gefahrenpotential bezüglich einer chronischen Gesundheitsgefährdung. Insgesamt ist das gesundheitsbezogene Gefahrenpotential des biotechnischen Prozesses damit wesentlich geringer.

Bezüglich der Umweltgefahren geht lediglich von einem der beim biotechnischen Verfahren eingesetzten Stoffe (Ammoniak 13 %) ein mittleres Gefahrenpotential aus, beim chemisch-technischen Verfahren schlagen dagegen insbesondere die Herstellung des Azo-Farbstoffes und der Barbitursäure mit mehreren sehr hoch zu Buche. Auch in dieser Spalte schneidet der biotechnische Prozess deutlich besser ab.

Ähnlich eindeutig ist das Abschneiden in der Spalte Brand- und Explosionsgefahren: Hier ist das Gefahrenpotential aller im biotechnischen Verfahren eingesetzten Stoffe vernachlässigbar, nicht so jedoch beim chemisch-technischen Verfahren: In zwei der vier betrachteten Prozesse kommen Stoffe mit sehr hohem, in allen vier Prozessen weitere Stoffe mit hohem Gefahrenpotential vor. Neben der Wasserstoff-Verwendung bei der Herstellung des Azo-Farbstoffes macht sich hierbei vor allem der Lösemitteleinsatz bemerkbar.

Auch hinsichtlich des Freisetzungsverhaltens weist das biotechnische Verfahren Vorteile auf, auch wenn es für Ammoniak einmal die Einstufung sehr hoch gibt. Beim chemisch-technischen Verfahren wird diese Wertung zwar an mehrere Stoffe vergeben, die Menge der Stoffe, die ein sehr hohes Gefahrenpotential hinsichtlich ihres Freisetzungsverhaltens aufweisen, bewegt sich ebenso in der gleichen Größenordnung, so dass für eine Differenzierung der Verfahren weitere Einstufungen heranzuziehen sind. Da beim biotechnischen Verfahren die nächsthöchste Einstufung aber nur noch bei mittel liegt, während das chemisch-technische Verfahren in allen vier Prozessen mindestens einmal ein hoch aufweist, fällt letzteres auch hier wieder zurück. Möglicherweise gibt es bezüglich des Ammoniak-Einsatzes beim biotechnischen Verfahren Möglichkeiten diesen durch Stoffe mit geringerem Gefahrenpotential zu ersetzen.

Lediglich bezüglich des Gefahrenpotentials, das mit spezifischen Eigenschaften des Verfahrens verbunden ist und das wir zur Wahrung der Vollständigkeit der Methode

ebenfalls angewendet haben, zeigt sich keine Differenzierung. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass keine spezifischen Anlagen untersucht wurden und aufgrund fehlender detaillierter Informationen dazu, bei allen Prozessen näherungsweise davon ausgegangen wurde, dass diese in geschlossenen Anlagen ablaufen, die z.B. beim Abfüllen, bei der Probennahme oder bei der Reinigung Expositionsmöglichkeiten aufweisen. Zudem trägt dazu bei, dass es sich bei beiden Verfahren um großformatige Produktionsprozesse im Bereich der chemischen Industrie handelt und diese bezüglich des Einschlusses von Arbeitsstoffen relativ ähnlich gehandhabt werden. Möglicherweise kann es aber auch sinnvoll sein, diese Spalte weiter zu differenzieren.

Abschließend zu dieser Betrachtung soll noch auf den jeweils letzten Prozess – die Aufkonzentration von Roh-Riboflavin mit einer Reinheit von 96 Gew.-% auf über 98 Gew.-% - eingegangen werden, der zwischen beiden Verfahren sehr ähnlich ist. Aber sogar dieser schneidet in der biotechnischen Variante besser ab. Es wird zwar rund 50 Gew.-% mehr Salzsäure benötigt, dafür kann aber auf die Zugabe von Methanol als organischem Lösemittel verzichtet werden. Möglicherweise liegt dies daran, dass beim chemisch-technischen Prozess noch organische Nebenbestandteile entfernt werden müssen. Es könnte jedoch auch sein, dass dieser Prozess inzwischen insgesamt (in die aus Sicht des Gefahrenpotentials richtige) Richtung weiterentwickelt worden ist.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse damit sehr deutlich, dass das biotechnische Verfahren in allen bewertungsrelevanten Spalten besser abschneidet – und dies zum Teil sehr deutlich.

Die Darstellung des Gefahrenpotentials im Spaltenmodell gibt zudem auch Anlass, über die Rolle der Systemgrenzen zu reflektieren: Das höchste Gefahrenpotential zeigt sich beim chemisch-technischen Verfahren nicht bei der letztendlichen Synthese von Riboflavin aus Azo-Farbstoff und Barbitursäure, sondern in den beiden vorgelagerten Synthese-Prozessen. Grundsätzlich belegt dies, dass auch ein Vergleich hinsichtlich des Gefahrenpotentials mehrerer Prozesse analog zum Ansatz der Ökobilanzierung eine transparente Festlegung der Systemgrenzen unter Aufzeigung des gesamten Produktsystems bedarf.

In dem untersuchten Fall hat sich andererseits die Ziehung der Systemgrenzen als ausreichend weit erwiesen, um bezüglich des stoffbedingten Gefahrenpotentials zu

einem eindeutigen Ergebnis zu kommen. Dies lässt sich auch deshalb relativ sicher behaupten, da im chemisch-technischen Prozesse deutlich mehr Vorprodukte eingesetzt werden, deren Herstellung ebenfalls zu berücksichtigen wäre. Auch die Kreislauf-führung von Lösemitteln einschließlich deren Regenerierung würde bei einem Einbe-zug das Gefahrenpotential weiter erhöhen. Zudem werden die bei der biotechnischen Produktion von Riboflavin benötigten vor allem anorganischen Chemikalien in einem ähnlichen Umfang auch in den betrachteten chemisch-technischen Produktionsprozes-sen benötigt.

Eine Ausnahme stellt lediglich die sehr große Menge Glucose dar, die für die Fermen-tation als organische Kohlenstoffquelle benötigt wird. Diese selbst ist hinsichtlich des Gefahrenpotentials unbedenklich. Die für deren Produktion eingesetzten Prozesse sind in ihrer Zahl überschaubar: Landwirtschaft, Maisstärke-Gewinnung, Glucose-Herstellung. Außer dem Pflanzenschutzmittel-Einsatz in der Landwirtschaft, der zum Teil kontrovers gesehen wird, sind diese Prozesse – soweit dies überschlägig beurteilt werden kann– zumindest nicht offensichtlich mit größeren stoffbedingten Gefahrenpo-tentialen verbunden. Des Weiteren wären zur Vervollständigung der Vorkette die Her-stellungsprozesse der Düngemittel zu berücksichtigen, die für den Pflanzenbau im Um-fang von einigen hundert Kilogramm je 1000 kg Riboflavin benötigt werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass selbst bei Berücksichtigung der mit den Prozessen der Abwasser- und Abfallentsorgung verbunden Gefahrenpotentiale die Ergebnisse ein-deutig für den biotechnischen Weg der Riboflavin-Produktion sprechen.

Fazit: Die Vorgehensweise nach TRGS 440 ist aus Sicht des Autors gut geeignet, die stoffbedingten Unterschiede im Gefahrenpotential zwischen den betrachteten Verfah-ren transparent und nachvollziehbar darzustellen. Die Kopplung mit den gefahrenbe-zogenen Stoffinformationen sowie die Angabe relativer Mengen ergänzt diese optimal und bietet einen guten Überblick zum stoffbezogenen Gefahrenpotential der betrach-teten Verfahren. Die Ergebnisse des Vergleiches sind sehr eindeutig: Im chemisch-technischen Prozess werden deutlich mehr Stoffe verwendet, die ein wesentlich hö-heres Gefahrenpotential aufweisen. Dies betrifft sowohl akute als auch chronisch Ge-sundheitsgefahren, Umweltgefahren, Brand- und Explosionsgefahren als auch das Freisetzungsverhalten. Bei einem Rückbezug auf die Zielsetzung der TRGS 440 (2002) – den Ersatz gefährlicher Stoffe durch weniger gefährliche Stoffe – ist die Ab-lösung des chemisch-technischen Produktionsprozesses zur Riboflavin-Herstellung

durch den biotechnischen als offensichtlicher Erfolg zu werten. Im nächsten Abschnitt wird beurteilt, ob dadurch nicht ein wesentlich höheres Gefährdungspotential im Bereich der biologischen Arbeitsstoffe eingetauscht worden ist.

7.4.3.4 Gefahrenpotential der biologischen Arbeitsstoffe

Ein wesentlicher Punkt der Verfahrensvergleiches war die Bewertung des Gefahrenpotentials, das mit den für den biotechnischen Prozess verwendeten Mikroorganismen verbunden ist. Um die im Abschnitt 7.3.5 abgeleitete Vorgehensweise bezüglich ihrer Eignung besser beurteilen zu können und zudem eine Form von Sensitivitätsanalyse durchzuführen, wurde nicht nur das vom holländischen Marktführer DSM Nutritional Products (bis September 2003 Roche Vitamine GmbH) verwendete gentechnisch veränderte Bakterium *Bacillus subtilis* betrachtet, sondern auch die beiden wichtigsten weiteren Mikroorganismen einbezogen, die im Jahr 2003 zur biotechnischen Produktion von Riboflavin eingesetzt wurden. Dabei handelt es sich zum Einen um den ebenfalls hinsichtlich seiner Produktivität gentechnisch veränderten Pilz *Ashbya gossypii* (syn. *Eremothicum gossypii*; Eriksson, 2004), der von BASF seit 1990 für die Riboflavin-Produktion aus Pflanzenölen genutzt wird (BASF, 2004). Zum Anderen wird vom amerikanischen Riboflavin-Hersteller ADM die Hefe *Candida famata* (syn. *Candida flareri*) in der biotechnologischen Riboflavin-Produktion verwendet (Schlüpen, 2003).

Weitere, hier nicht näher behandelte mikrobielle Produzenten von Riboflavin sind das bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts genutzte Bakterium *Clostridium acetobutylicum* sowie der eng mit *Ashbya gossypii* verwandte filamentöse Pilz *Eremothicum ashbyi* (Stahmann et al., 2000). Nach neueren Arbeiten käme dafür auch ein gentechnisch veränderter Stamm von *Corynebacterium ammoniagenes* in Frage, der eine Riboflavin-Bildung von 15 g/l erreicht und damit in der derzeit üblichen Größenordnung von 14 bis 20 g/l anzusiedeln ist (Schlüpen, 2003).

Bevor weiter auf das mit den biologischen Arbeitsstoffen verbundene Gefahrenpotential eingegangen wird, werden die drei betrachteten Mikroorganismen im Folgenden näher charakterisiert und so anschaulicher dargestellt:

Bacillus subtilis: Dabei handelt es sich um ein gram-positives Bakterium, das aerob lebt, Endosporen bildet und in der Natur weit verbreitet ist („Heubacillus“). Soweit be-

kannt weist es keine pathogenen oder toxischen Eigenschaften auf. *Bacillus subtilis* wird seit langem in großformatigen Fermentationsprozessen zur Herstellung von Spezialchemikalien und Enzymen - unter anderem auch zur Herstellung von Vitamin B12 und Biotin - sowie im asiatischen Bereich zur Herstellung traditioneller Lebensmittel eingesetzt. *Bacillus subtilis* ist auch bei verschiedenen Arten des Verderbens von Lebensmitteln beteiligt. Für die Riboflavin-Produktion aus Glucose wird ein Stamm eingesetzt, der keine Sporen bildet und dessen natürliche Fähigkeit zur Vitamin B2-Bildung durch Mutagenese und Selektion sowie durch gentechnische Veränderung um den Faktor 300.000 auf einen Wert von über 14 g/l gesteigert werden konnte. Dazu wurde in das Bakteriengenom stabil ein Genkonstrukt eingeführt, das aus verschiedenen Markern und einem Promoter besteht. Soweit wir dies anhand der uns vorliegenden Informationen beurteilen konnten, dient dabei vor allem *Bacillus subtilis* auch als Spenderorganismus. Um *Bacillus subtilis* beim Fermentationsprozess vor der Konkurrenz durch andere Bakterien zu schützen, werden Antibiotika zugegeben, gegenüber denen der verwendete Stamm resistent ist. Aufgrund der fehlenden Sporenbildung des verwendeten Stammes ist nach der Pasteurisierung am Ende des Produktionsprozesses eine Auskeimung nicht mehr anzunehmen. (EU, 1998; Perkins et al., 1999; Roche, 2003; Schlegel, 1992; Schlüpen, 2003; Stahmann et al., 2000).

Ashbya gossypii (syn. *Eremothicum gossypii*; Eriksson, 2004) ist ein filamentöser Pilz, der zu den Schlauchpilzen (Ascomycota) gehört und ein septiertes, sich dichotom verzweigendes Myzel mit mehrkernigen Zellen sowie nach einigen Tagen charakteristische nadelförmige Ascosporen ausbildet. In seinen natürlichen tropischen und subtropischen Lebensräumen tritt *Ashbya gossypii* als unspezifischer phytopathogener Mikroorganismus unter anderem an Baumwolle, Kaffee, Tomaten sowie verschiedenen Zitrus- und Leguminosenarten auf. Die Übertragung erfolgt durch stechend-saugende Insekten, die dem Pilz die Durchdringung der Pflanzenepidermis ermöglichen. Die durch *Ashbya gossypii* verursachte Stigmatomykose machte in den Jahren 1927 bis 1944 den Baumwollanbau in vielen afrikanischen Ländern nahezu unmöglich. Bedingt durch die Bekämpfung der übertragenden Insekten und von als Zwischenwirt dienenden, nicht im Kulturanbau genutzten Pflanzen spielt *Ashbya gossypii* heute als Schädling nur noch eine untergeordnete Rolle. Dieser Pilz produziert bereits in seiner natürlichen Form Riboflavin im Überschuss, das die Sporen vor UV-Licht schützt. Er gehört zur erst vor wenigen Jahren neu definierten Familie der Eremotheciaceae, die wieder-

um der Ordnung der Saccharomycetales zugerechnet wird, und ist unter anderem eng verwandt mit *Saccharomyces cerevisiae*, der Back- und Bierhefe. *Ashbya gossypii* ist weiter eng verwandt mit dem ursprünglich für die Riboflavin-Gewinnung eingesetzten *Eremothecium ashbyi*, dabei genetisch stabiler und damit besser für die biotechnische Riboflavin-Produktion geeignet. Durch gentechnische Veränderungen – vor allem durch die Integration von Kopien der Pilz-eigenen Riboflavin-Biosynthese-Gene - konnte diese Fähigkeit noch einmal sehr deutlich auf mindestens 20 g/l gesteigert werden. Als Fermentationsquelle wird dabei Sojaöl verwendet (Schlegel, 1992; Schlüpen, 2003; Stahmann et al., 2000).

Auch die Hefe *Candida famata* (synon. zu *Candida flarer*) ist ein natürlicher Überproduzent von Riboflavin. Sie gehört zu den sogenannten Fungi imperfecti (Deuteromycota), einer Formklasse von Pilzen, bei denen das sexuelle Stadium bisher noch nicht nachgewiesen werden konnte, die in den bekannten Stadien taxonomisch bereits eingeordneten Ascomyceten aber sehr ähnlich sind. Aufgrund des Fehlens des sexuellen Stadiums ist jedoch eine definitive Zuordnung zu einer definierten Pilzfamilie nicht sicher möglich. Bei der natürlich vorkommenden Variante von *Candida famata* setzt die Riboflavin-Produktion erst nach Unterschreiten einer Eisen-Konzentration von 10 µg/l ein. Durch die Isolierung Eisenionen-resistenter Mutanten war es möglich, die Riboflavin-Produktion von *Candida famata* auf rund 20 g/l zu steigern und damit eine industrielle biotechnische Riboflavin-Produktion zu betreiben (Schlegel, 1992; Schlüpen, 2003; Stahmann et al., 2000).

In der Literatur gab es keine Hinweise, dass an dem zur Riboflavin-Produktion verwendeten *Candida famata* – Stamm gentechnische Veränderungen vorgenommen worden sind. Andererseits ist anzunehmen, dass - falls dadurch die Ausbeute erhöht werden könnte - auch gentechnische Methoden zur Optimierung eingesetzt würden. Wir betrachten deshalb *Candida famata* analog zu den beiden anderen Mikroorganismen-Arten. Die folgende Tabelle 7-26 dokumentiert für diese drei Alternativen die Einstufungen bezüglich des Gefahrenpotentials, die entsprechend der methodischen Überlegungen im Abschnitt 7.3.5 vorgenommen wurden.

Tabelle 7-26: Gefahrenpotential der in der biotechnische Riboflavin-Produktion eingesetzten biologischen Arbeitsstoffe ohne und mit gentechnischer Veränderung (vgl. die im Abschnitt 7.3.5 beschriebene Vorgehensweise)

	<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Ashbya gossypii</i>	<i>Candida famata</i>
Tätigkeiten mit nicht gentechnisch veränderten Mikroorganismen			
Risikogruppe des Mikroorganismus nach TRBA 460 (2002) bzw. TRBA 466 (2002)	1	1	1
Sonstige Anmerkungen in TRBA 460 oder 466 (s. Legende)	+	k.A.	k.A.
Sonstige Informationen		pflanzen pathogen ¹⁾	
Schutzstufe der Tätigkeit nach BioStoffV (2003, § 6)	(1)	(1)	(1)
Gefahrenpotential analog zum Spaltenmodell der TRGS 440	D	D	D
Tätigkeiten mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen			
Einstufung nach der „Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten“ (BMGS, 2001)			
- Empfängerorganismus: Risikogruppe	1*	1**	1**
- Empfängerorganismus: Sonstige Anmerkungen	k.A.	k.A.	k.A.
- Spenderorganismus ¹⁾ : Risikogruppe	1*	1**	1**
- Spenderorganismus ¹⁾ : Sonstige Anmerkungen	k.A.	k.A.	k.A.
Risikogruppe gentechnisch veränderter Organismus ²⁾	(1)	(1)	(1)
Sicherheitsstufe nach GenTG, 2004, § 7 und GenTSV, 2002, § 7(2)	(1)	(1)	(1)
Gefahrenpotential analog zum Spaltenmodell der TRGS 440	D	D	D
Abschätzung des Gefahrenpotentials der biologischen Arbeitsstoffe in Anlehnung an das Spaltenmodell der TRGS 440 (vgl. die Beschreibung im Abschnitt 7.3.4.3):			
A sehr hoch B hoch C mittel D gering			
Sonstige Erläuterungen:			
+ In Einzelfällen (überwiegend abwehrgeminderte Menschen) nachgewiesener bzw. vermuteter Krankheitserreger; Identifizierung der Art oft nicht zuverlässig. (Anm. des Autors: Bei der biotechnischen Produktion werden in der Regel geschwächte Stämme eingesetzt; diese gibt es bei <i>Bacillus subtilis</i>)			
* Einstufung bezieht sich explizit auf biotechnische Produktion und erfüllt höhere Anforderungen als **			
** Einstufung bezieht sich auf gentechnische Arbeiten zu Forschungszwecken			
() Einstufung durch den Autor auf zwangsläufig beschränkter Informationsbasis und damit mit Vorbehalt.			
1) Annahme: Spenderorganismus und Empfängerorganismus sind identisch			
2) Annahme: Anforderungen an die Sicherheitsstufe 1 nach GenTSV (vgl. Tabelle 7-15) werden erfüllt.			

Die Informationen zum Gefahrenpotential der mikrobiellen Riboflavin-Produzenten, die in Tabelle 7-26 dokumentiert werden, zeigen ein sehr einheitliche Bild: Alle Einstufungen bewegen sich im Rahmen der Risikogruppe 1. Nach der am Ende von Abschnitt 7.3.5.4 skizzierten Vorgehensweise, die sich an dem gefahrstoffbezogenen Spaltenmodell der TRGS 440 (vgl. Abschnitt 7.3.4.3) orientiert, entspricht dies in allen Fällen einem (maximal) „geringen“ Gefahrenpotential. Bezüglich der betrachteten Mikroorga-

nismen ist uns jedoch nur eingeschränkt bekannt, inwieweit die Überlebens- und Replikationsfähigkeiten in natürlicher Umgebung aufgrund Mutation und gentechnischer Manipulation bereits vermindert sind – beispielsweise durch biologische Sicherheitsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 7.3.5.4). Aufgrund der strengen Anforderungen an die biotechnische Produktion sowie des Eigeninteresses der produzierenden Unternehmen, negative Schlagzeilen zu vermeiden, ist anzunehmen, dass entsprechende Vorsorgekriterien üblicherweise berücksichtigt werden und damit das mit dem Einsatz dieser biologischen Arbeitsstoffe verbundene Gefahrenpotential weiter reduziert wird.

Zu diskutieren bleibt der Punkt der pflanzenpathogenen Eigenschaften von *Ashbya gossypii*: Da der Pilz selbst die Epidermis von Pflanzen nicht durchdringen kann und deshalb auf die Übertragung durch stechend-saugende Insekten von Wirtspflanzen auf Kulturpflanzen angewiesen ist, scheint es jedoch unwahrscheinlich, dass aus einer biotechnischen Produktionsanlage freigesetzter *Ashbya gossypii* für diesen Übertragungsweg relevant wird. Zudem ist davon auszugehen, dass für die biotechnische Produktion ein Stamm verwendet wird, der mittels biologischer Sicherheitsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 7.3.5.3) in seiner Pathogenität abgeschwächt worden ist. Dass in der Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten (BMGS, 2001) im Zusammenhang mit der Risikoeinstufung *Ashbya gossypii* kein Hinweis auf pflanzenpathogene Eigenschaften erfolgt, deutet ebenfalls darauf hin.

Ein Verweis auf die Gesetzeslage soll abschließend an dieser Stelle die vom Gesetzgeber vertretene Einschätzung hinsichtlich des Gefahrenpotentials von Arbeiten mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen in der Sicherheitsstufe 1 verdeutlichen: So regelt die Gentechnik-Sicherheits-Verordnung (GenTSV, 2002, § 13 (2)), dass Abwasser und Abfall aus Anlagen, in denen gentechnische Arbeiten der Sicherheitsstufe 1 durchgeführt werden, ohne besondere Vorbehandlung entsorgt werden können. Voraussetzung ist, dass zur Herstellung der gentechnisch veränderten Organismen als Empfängerorganismen solche Stämme von Mikroorganismen verwendet werden, die in der Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten unter dem Punkt I (gentechnische Arbeiten zu gewerblichen Zwecken) der Risikogruppe 1 zugeordnet worden sind - wie dies für *Bacillus subtilis* der Fall ist. Solche Mikroorganismen stellen damit nach dem Stand der Wissenschaft kein Risiko für die menschliche Gesundheit und die Umwelt dar, sind nicht human-, tier- oder pflanzenpathogen, geben keine Organismen höherer Risikogruppen ab und zeichnen sich aus

durch experimentell erwiesene oder langfristig sichere Anwendung oder eingebaute biologische Schranken sowie sichere Vektoren aus. Implizit kann diese gesetzliche Vorgabe auch als Hinweis darauf dienen, dass selbst eine unbeabsichtigte Freisetzung des Fermenterinhaltens mit der darin befindlichen *Bacillus subtilis*-Population vom Gesetzgeber als unbedenklich angesehen wird. In der industriellen Praxis wird jedoch selbst im biotechnischen Riboflavin-Produktionsprozess mit *Bacillus subtilis* die Fermentationsbrühe vor einer weiteren Aufarbeitung pasteurisiert, so dass das Gefahrenpotential weiter hin in Richtung „vernachlässigbar“ reduziert wird. Die beiden anderen Varianten sollten nach den vorliegenden Informationen sich hierin nur geringfügig unterscheiden.

Fazit: Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Gefahrenpotential, das mit dem Einsatz von *Bacillus subtilis* zur biotechnischen Riboflavin-Produktion verbunden ist, maximal als „gering“ zu werten ist und eher in Richtung „vernachlässigbar“ tendiert. Dies gilt nahezu vergleichbar auch für die beiden quasi als Sensitivitätsanalyse betrachteten, ebenfalls in der biotechnischen Riboflavin-Produktion eingesetzten Mikroorganismen *Ashbya gossypii* und *Candida famata*. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Informationen zu diesem Prozess scheint es zudem so zu sein, dass diese Wertung konstant bleibt – unabhängig davon, ob die betrachteten Mikroorganismen in ihrer natürlichen Form verwendet oder gentechnisch hinsichtlich der Riboflavin-Produktion optimiert werden.

Demgegenüber besteht beim chemisch-technischen Verfahren sicher kein Gefährdungspotential durch (gezielt eingesetzte) biologische Arbeitsstoffe. Da die beim biotechnischen Prozess eingesetzten biologischen Arbeitsstoffe höchstens auf ein „geringes“ Gefahrenpotential kommen, ergibt sich dennoch nur ein (sehr) geringer Unterschied zwischen den beiden Verfahren bezüglich des Gefahrenpotentials biologischer Arbeitsstoffe.

7.4.3.5 Zusammenfassende Bewertung des Gefahrenpotentials

Das Ergebnis der vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotentials der chemisch-technischen und der biotechnischen Produktion von Riboflavin fällt sehr eindeutig aus: Das biotechnische Verfahren weist in den wesentlichen Punkten entscheidende gefahrenbezogene Vorteile auf. So ist sowohl die Anzahl der eingesetzten Chemikalien als auch das mit diesen verbundene Gefahrenpotential um Größenordnungen geringer – sowohl was akute und chronische Gesundheitsgefahren als auch Umweltgefahren, Brand- und Explosionsgefahren und Gefahren durch das Freisetzungverhalten angeht. Wird der mengenmäßig absolut dominierende Glucoseanteil – ein ungefährlicher, aus dem nachwachsenden Rohstoff Maisstärke hergestellter Stoff – außen vor gelassen, so ist auch die Menge der benötigten Chemikalien wesentlich geringer.

Aber auch der Vergleich anhand des prozessbezogenen Gefahrenpotentials spricht für das biotechnische Verfahren, auch wenn die Datenlage bezüglich dieser Fragestellung weniger gut war: Die biotechnische Produktion basiert im Wesentlichen auf einem Hauptprozess, der fermentativen Herstellung von Riboflavin aus Glucose durch einen gentechnisch veränderten *Bacillus subtilis*-Stamm. Dieser Prozess läuft im wässrigen Milieu unter Normaldruck und nahezu Umgebungstemperatur ab – und damit unter relativ ungefährlichen Bedingungen. In den für die chemisch-technische Produktion erforderlichen Prozessen ist die Temperatur dagegen deutlich höher bei bis zu 110°C oder auch wesentlich tiefer bei bis zu -15°C. Zudem ist der Druck bei diesen Prozessen üblicherweise deutlich höher als bei der Fermentation.

Andererseits werden bei der biotechnischen Produktion biologische Arbeitsstoffe eingesetzt – ein Aspekt der für den chemisch-technischen Prozess nicht relevant ist. Eine diesbezügliche Abschätzung zum Gefahrenpotential des gentechnisch veränderten *Bacillus subtilis* – Stamm hat jedoch belegt, dass das damit verbundenen Gefahrenpotential maximal gering ausfällt und vermutlich eher zu vernachlässigen ist. Nahezu vergleichbar ist auch die Verwendung zweier weiterer Riboflavin-Produzenten - *Ashbya gossypii* und *Candida famata* - zu werten. Im Vergleich zu dem beim chemisch-technischen Verfahren mehrfach mit hohem bis sehr hohem Gefahrenpotential bewerteten Chemikalieneinsatz schneidet der Ersatz durch einen der betrachteten biologischen Arbeitsstoffe deutlich besser ab.

Unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung des Gefahrenpotentials insgesamt ist die Entscheidung für die biotechnische Riboflavin-Produktion eindeutig positiv zu werten.

Angesichts der Unterschiede bei der Anzahl der Prozesse und dem damit verbundenen Gefahrenpotential ist zudem davon auszugehen, dass der Aufwand für die Prozessüberwachung beim chemisch-technischen Prozesse deutlich höher sein dürfte. Dazu kommt die beim chemisch-technischen Prozess erforderliche umfangreiche Lösemittelregenerierung, die beim biotechnischen Prozess ganz entfällt.

7.5 Fazit

Das in diesem Vorhaben entwickelte und am Beispiel der Riboflavin-Produktion getestete Konzept zur vergleichenden Bewertung des Gefahrenpotentials einer biotechnischen und einer chemisch-technischen Produktion hat sich aus unserer Sicht sehr bewährt. Auf diesem Wege war es möglich, die Unterschiede zwischen den Produktionsverfahren differenziert nach prozessbezogenen Aspekten, nach stoffbezogenen Gesichtspunkten und hinsichtlich des Einsatzes von biologischen Arbeitsstoffen transparent aufzubereiten, miteinander zu vergleichen und in einer verbal-argumentativen Gesamtbewertung zusammenzuführen. Die Ergebnisse fallen dabei eindeutig positiv für den biotechnischen Prozess aus.

Auch wenn diese Ergebnisse nicht allgemein auf andere Verfahrensvergleiche übertragen werden können, so zeigen sie, wie ein solcher Vergleich prinzipiell durchgeführt werden kann. Das für die Bestimmung des stoffbezogenen Gefahrenpotentials adaptierte Spaltenmodell nach TRGS 440 und dessen Ausweitung auf die Eingruppierung biologischer Arbeitsstoffe hat sich aus unserer Sicht als gut geeignet erwiesen. Wünschenswert wäre eine ähnliche Weiterentwicklung bezüglich des prozessbezogenen Gefahrenpotentials. Möglicherweise lässt sich aufbauend auf dem grundsätzlichen Ansatz auch ein Verfahren entwickeln, das die Aggregation der verschiedenen betrachteten Gefahrenpotentiale zu einem Indikatorwert erlaubt. Wir würden uns deshalb sehr freuen, wenn es möglich wäre, ausgehend von der Studie von Kurth et al. (2003) unter Berücksichtigung unserer Ergebnisse und Vorgehensweise diese Diskussion weiterzubringen und einen (bescheidenen) Beitrag zur Etablierung einer entsprechenden Wirkungskategorie in der Methodik der Ökobilanzierung zu leisten.

Abschließend soll noch auf eine Erkenntnis hingewiesen werden, die sich beim Schreiben dieses Projektteils verdichtet hat. So finden sich viele hilfreiche und sinnvolle Ansätze im Bereich der rechtlichen Regelungen, andererseits gibt es aber in EU-Richtlinien, Gesetzen, Verordnungen, Technischen Regeln, BG-Vorschriften, Verwal-

tungsvorschriften, etc. derart viele Überschneidungen und in weiten Teilen nahezu identische Ausführungen, dass dies für viele Anwender wohl kaum mehr überschaubar sein dürfte - ohne dass damit tatsächlich ein höheres Schutzniveau verbunden wären. Damit dürfte die Hilfe- und Orientierungsfunktion, deren grundsätzliche Strukturen prinzipiell sehr gut angelegt sind, häufig wohl nur suboptimal wirksam werden.

8 Diskussion

Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen stellte im Umweltgutachten 2002 fest: „Rund zehn Jahre nach der Verabschiedung der Agenda 21 zeigt sich in der Nachhaltigkeitsdiskussion eine problematische Entwicklung. In Deutschland wie auch in anderen Ländern zeichnet sich die Diskussion durch eine konzeptionelle und inhaltliche Konturlosigkeit sowie eine zunehmende Trivialisierung aus. Sowohl in der wissenschaftlichen als auch in der politischen Debatte wird der Ausdruck „nachhaltige Entwicklung“ inflationär und zunehmend willkürlich verwendet. Dabei sind unterschiedliche Akteure bestrebt, den Begriff gemäß ihren Interessen zu besetzen.“ Kritisiert wurde außerdem, dass beim Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit die Handlungsfelder „Ökonomie“, „Soziales“ und „Ökologie“ inzwischen nicht mehr – wie im ursprünglichen Konzept vorgesehen – gleichrangig beachten werden. Vielmehr würden ökologische Belange in der Praxis häufig nachrangig behandelt, obwohl „im Umweltschutz im Vergleich zur Umsetzung ökonomischer und sozialer Ziele der größte Nachholbedarf existiert und im Hinblick auf langfristige Stabilisierung die größten Defizite vorhanden sind“ (SRU, 2002).

In der vorliegenden Studie wurden – auftragsgemäß – ausschließlich Aspekte des Umweltschutzes ausgewertet. Ökonomische und soziale Aspekte konnten in die Betrachtungen nicht mit eingezogen: Hierfür wäre ein wesentlich größerer Bearbeitungszeitraum und -umfang notwendig gewesen. Die Bearbeitung einer entsprechend umfangreichen Themenstellung ist Gegenstand eines BMBF-Verbundvorhabens (DE-CHEMA, 2002).

8.1 Ressourcennutzung der Chemischen Industrie

Wie im Abschnitt 2 erläutert wurde, ist die Chemische Industrie ein ressourcen- und energieintensiver Wirtschaftsbereich, der mit hohen finanziellen Aufwendungen produktionsbedingte Umweltbelastungen reduzieren muss (vergl. Tabelle 2-1, Abbildung 2-3). Die meisten chemischen Produktionsverfahren weichen vor allem bei der Rohstoffwahl von den in Tabelle 8-1 zusammen gefassten „stoffökologischen Grundregeln“ ab: Über 90 % der organischen Chemieproduktion haben ihren Ursprung in nicht regenerierbaren Mineralölerzeugnissen. Rund die Hälfte des Energieverbrauchs der chemischen Industrie wird durch Erdöl oder Erdgas gedeckt (MWV, 2003). Insgesamt ver-

brauchte die chemische Industrie 2002 über 19 Millionen Mg Mineralöl. Sie war damit zu gut 15 % am gesamten Mineralölkonsum in Deutschland beteiligt. Vom Mineralöleinsatz in der Chemie dienen etwa 90 % als Rohstoff und 10 % als Energie.

Tabelle 8-1: Ökologische Grundregeln einer nachhaltigen Wirtschaftsweise

1.	Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll deren Regenerationsrate nicht überschreiten. Dies entspricht der Forderung nach Aufrechterhaltung der ökologischen Leistungsfähigkeit, d.h. (mindestens) nach Erhaltung des von den Funktionen her definierten ökologischen Realkapitals.
2.	Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
3.	Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die "stille" und empfindlichere Regelungsfunktion.
4.	Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muss im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.
5.	Gefahren und unvermeidbare Risiken für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen sind zu vermeiden.

Quelle: <http://nachhaltigkeit.aachener-stiftung.de>

Erdöl enthält 83 - 87 Gewichtsprozent Kohlenstoff, 11 - 15 Gewichtsprozent Wasserstoff, bis zu 6 Gewichtsprozent Schwefel sowie Spuren von Sauerstoff, Stickstoff und Metallen. Diese chemische Zusammensetzung, vor allem die Kohlenstoff/Wasserstoffbindung, ermöglicht theoretisch Millionen verschiedenartiger Molekülstrukturen. Die unüberschaubare Stoffvielfalt würde eine gezielte stoffliche Nutzung einzelner Inhaltsstoffe unmöglich machen. Deshalb wird Rohöl in Raffinerien in Teilfraktionen mit eingeschränkter Stoffvielfalt aufgetrennt.

Das wichtigste Einsatzprodukt der Petro-Chemie ist Rohbenzin (Naphtha). Es wird in erster Linie zu Olefinen, aber auch zu Aromaten und Synthesegase, den Primärchemikalien, verarbeitet. Aus einer kleinen Anzahl von Primärchemikalien wird dann im Rahmen unterschiedlichster chemischer Produktionsprozesse eine große Bandbreite chemischer Produkte erzeugt, wobei u.a. hohe Temperaturen und Drücke sowie technische Katalysatoren zur Reaktionsoptimierung eingesetzt werden (Abbildung 8-1). Insgesamt steht der unter stoffökologischen Gesichtspunkten problematischen Rohstoffwahl dabei eine äußerst effiziente Nutzung des Rohstoffs gegenüber.

Innerhalb der EU werden mehr als 100.000 chemische Stoffe und Zubereitungen vermarktet (Abbildung 8-2). Die Stoffvielfalt weist auf einen weiteren Problembereich hin:

Bezogen auf die Stoffanzahl liegen bis heute erst für einen kleinen Teil der vermarkteten Stoffe öffentlich zugängliche Daten zur Toxizität und Ökotoxizität vor. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur vergleichsweise wenige Chemikalien in sehr großen Mengen hergestellt werden, sodass die Datenlage zur Toxizität und Ökotoxizität bezogen auf die vermarktete Chemikalienmenge insgesamt wesentlich besser ist.

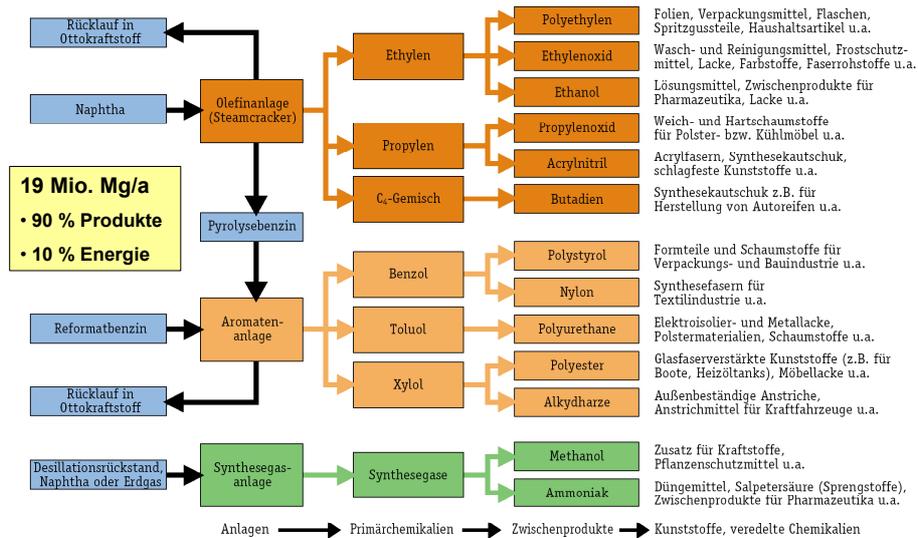


Abbildung 8-1: Schema der petrochemischen Produktionslinien (MWV, 2003)

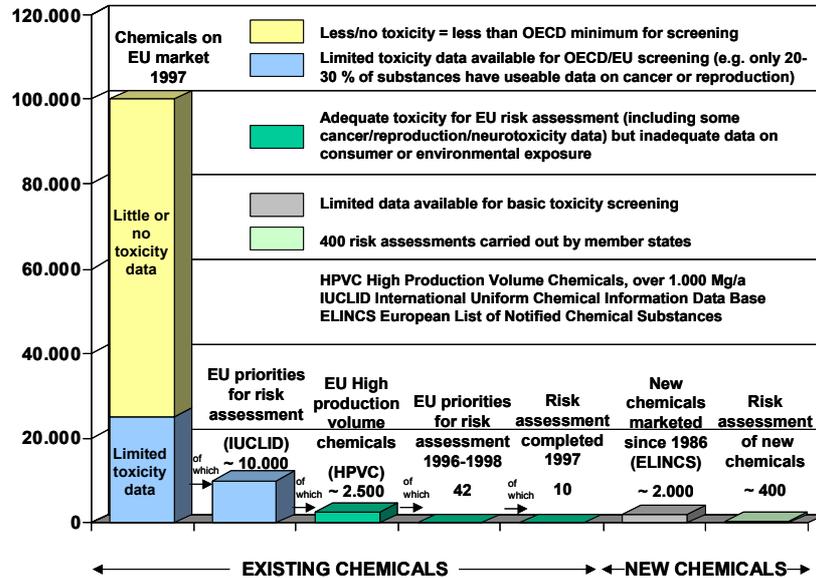


Abbildung 8-2: Daten zum Kenntnisstand chemischen Stoffe in der EU (n. EEA, 1998)

8.2 Ressourcennutzung der Biotechnologie

Die petrochemische und die biotechnische Produktion zeigen gewisse Analogien, da aus Rohstoffen mit komplexer Zusammensetzung Produkte mit definierter Zusammensetzung geschaffen werden sollen.

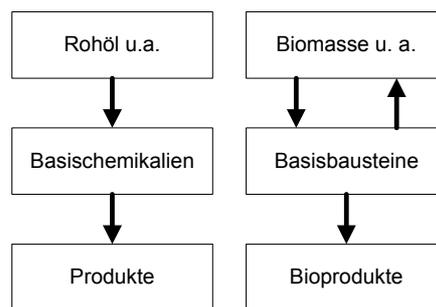


Abbildung 8-3: Analogie der petrochemischen und biotechnischen Produktion

Obwohl grundsätzlich auch Erdölbestandteile als Substrate für die Biotechnologie nutzbar sind (z.B. für die Single-Cell-Proteinherstellung), werden für biotechnische Produktionen überwiegend pflanzliche Biomassen und Biomassebestandteile als Sub-

strate eingesetzt. Pflanzliche Biomassen enthalten nur wenige chemische Elemente (C, H, O, N, P, S), doch können Biomassen eine unüberschaubare Stoffvielfalt aufweisen. Allerdings wird die stoffliche Vielfalt von Biomassen vor der Nutzung für Biosynthesen zunächst auf wenige Grundbausteine eingeschränkt: Polymere Kohlenhydrate und Proteine sowie Fette/Öle, die aus einfachen monomeren Bausteinen aufgebaut worden sind, werden beim Bioabbau wieder in niedermolekulare Stoffwechselprodukte zerlegt, die dann für die Energiegewinnung weiter abgebaut oder aber für Biosynthesen zu neuen Bioprodukten um- und aufgebaut werden. Katabolismus und Anabolismus sind bei Lebewesen somit über eine überschaubare Anzahl niedermolekularer Bausteine miteinander verknüpft.

Neben dieser formalen Analogie gibt es jedoch zwischen der chemischen Produktion und der biotechnischen Produktbildung grundlegende Unterschiede, die bereits in Tabelle 2-5 zusammen gestellt worden sind.

Aus stoffökologischer Sicht ist die überwiegende Verwendung von pflanzlichen Biomassen als Rohstoffquelle für biotechnische Produktionen grundsätzlich als vorteilhaft zu bewerten. Allerdings wird dieser Vorteil dadurch relativiert, dass auch für die Produktion und Aufarbeitung der pflanzlichen Rohstoffe Aufwendungen an fossilen Energieträgern und an weiteren Hilfsstoffen erforderlich sind. Wie in Abbildung 6-39 am Beispiel der Waschmitteltenside aufgezeigt wurde, kann der Stoff- und Energieaufwand für die Gewinnung eines Rohstoffs aus nachwachsenden Rohstoffen die gleiche Größenordnung erreichen, wie die Tensidherstellung auf Erdölbasis. Auch die Ausführungen im Abschnitt 6.1 zeigen, dass das Ausmaß der stoffökologischen Vorteile einer Nutzung nachwachsender Rohstoffe stark von der praktischen Ausgestaltung des Produktlebensweges abhängt. Unter Umweltgesichtspunkten wäre es vorteilhaft, die Stoff- und Energieaufwendungen für die Biomasseherstellung zu optimieren. Außerdem würden die Stoff- und Energiebilanzen positiv verändert, wenn die erzeugte pflanzliche Biomasse einer größtmöglichen Nutzung zugeführt würde. In diesem Zusammenhang sind die Bemühungen zum Aufschluss von Cellulosen und Lignocellulosen von größtem Interesse, denn wenn es gelänge, diese häufig ungenutzt auf den Feldern verbleibenden Biomassefraktionen als Rohstoffquelle für die biotechnische Produktion (z.B. Herstellung von Bioethanol; Gong et al., 2003; Schmitz, 2003) zu erschliessen, würden die bei Ökobilanzen zu berücksichtigenden Aufwendungen für die pflanzliche Rohstoffproduktion auf eine größere Rohstoffmenge verteilt und damit würden die spezifischen

Aufwendungen pro genutzter Biomassefraktion deutlich gesenkt. Diesbezüglich ist die Effizienz der Rohölnutzung deutlich weiter entwickelt und in Analogie hierzu sehen die Konzepte zur Realisierung sogenannter Bioraffinerien auch Verarbeitungsverbünde vor, die eine weitreichende Verwertung der produzierten Biomassen erreichen (Desais; 2002; Kamm u. Kamm, 2001, 2003; Young, 2003, 2004).

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen der petrochemischen und der biotechnischen Produktion liegt im Produktionsprozess selbst: Bei biotechnischen Prozess werden durch Biokatalyse bereits bei Raumtemperaturen und Umgebungsdruck maximale Umsatzraten erreicht, wobei Produkte mit hoher Reinheit und Stereospezifität gebildet werden können. Diesen Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber: Die für die Produktion notwendigen Biokatalysatoren müssen über den Aufbau von Biomasse des Produktionsstamms bei jedem Fermentationslauf neu hergestellt werden. Dadurch werden große Anteile des eingesetzten Rohstoffs für die Bildung des Biokatalysators verbraucht, was sich nachteilig auf die Bilanz der erzeugten Produktmenge pro Einheit des Rohstoffs auswirkt.

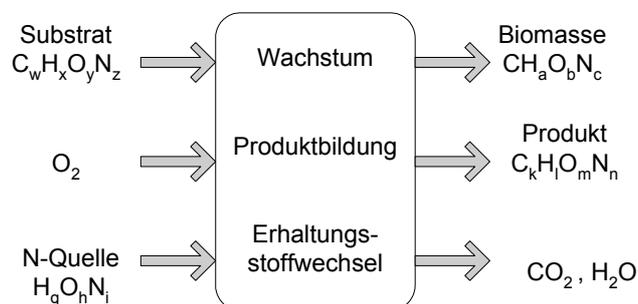


Abbildung 8-4: Schema der Stoffströme bei der Fermentation

Im Rahmen dieser Studie wurden drei Varianten für biotechnisch hergestellte Produkte betrachtet:

- Herstellung von Enzymen (s. Abschnitte 5.2 u. 6.3): Bei der Produktion von Enzymen wird nur ein relativ kleiner Anteil der erzeugten Biomasse, das gewünschte Enzym, zum eigentlichen Produkt aufgearbeitet. Die weitaus überwiegende Anteil der produzierten Biomasse kann meist nur als Düngemittel verwertet werden, woraus nur geringe Gutschriften bei der Ökobilanzierung resultieren.

- Herstellung von Stoffwechselprodukten (s. Abschnitte 5.1 u. 6.1): Bei der Herstellung von Vitamin B2 ergab die auf die Inputmassen bezogene Massenbilanz eine Ausbeute von 6 % Vitamin B2 und 34 % Biomasse (vergl. Abbildung 5-11). Die Biomasse wird als Düngemittel verwertet, die bei der Ökobilanzierung als Gutschriften (Substitution von anderen Düngemitteln) verrechnet werden. Bei der Gewinnung von Stärke wird der Rohstoff unmittelbar aus den Pflanzenteilen gewonnen, wobei jedoch ebenfalls noch erhebliche Biomassereste anderweitig verwertet werden müssen.
- Herstellung von mikrobieller Biomasse (s. Abschnitt 6.2): Unter dem Aspekt der Ressourcennutzung ist die Herstellung des Probiotikums ein Idealfall, da die gesamte produzierte Biomasse und die Fermentationsbrühe zum eigentlichen Produkt aufgearbeitet werden.

Durch bio- und gentechnische Methoden konnte die Effizienz biotechnischer Produktionsprozesse in den letzten Jahren deutlich verbessert werden. Wichtige Optimierungsmaßnahmen sind (Aristidou u. Pentilla, 2000; Chartrain et al., 2000; Chotani et al., 2000; Powell et al., 2001; Cortassa et al., 2002; Chiang, 2004):

- Optimierung der Stoffwechselwege (z.B. durch „metabolic engineering“ oder „pathway engineering“)
- Optimierung der katalytischen Aktivitäten (z.B. durch „directed evolution, gene shuffling, molecular breeding, protein engineering“)
- Optimierung des Bioreaktorbetriebs (z.B. durch „high density cultivation“)
- Optimierung der Produktgewinnung

Weitere Optimierungsarbeiten haben zum Ziel, die Produktbildung unmittelbar in Pflanzen durchzuführen („molecular farming“), so dass der ressourcenintensive Fermentationsschritt ausgelassen werden kann (Fischer et al., 1999a-e; Fischer u. Schillberg, 2004). Außerdem gibt es Bemühungen, „künstliche Produktionsstämme“ zu schaffen, deren metabolisches Inventar auf die unmittelbare Produktionsaufgabe beschränkt ist (Chotani et al., 2000).

Die verfügbaren Optimierungswerkzeuge („toolbox“) haben dazu beigetragen, dass die zukünftige Entwicklung der biotechnischen Produktion heute deutlich positiver eingeschätzt wird (Danner u. Braun, 1999; Wilke, 1999; Chotani et al., 2000; Bachmann et

al. 2002; Festel et al., 2004; Young, 2003, 2004) als noch vor einem Jahrzehnt (Hinmann, 1991).

Biotechnische Produktionsverfahren werden derzeit zudem durch umweltpolitische Zielvorgaben gefördert. So laufen in Deutschland, Europa und den USA zahlreiche Forschungsprojekte, die eine kostengünstige Massenproduktion von Bioethanol zum Ziel haben, da dieser aus Klimaschutzgründen Teile des fossilen Treibstoffs ersetzen soll (US-DOE, 2001, 2003; Gong et al., 2003; Schmitz, 2003; Vorlop u. Wilke, 2003; EU, 2004). Die SÜDZUCKER AG (2004) hat den Bau einer großtechnischen Bioethanolproduktionsanlage in Deutschland aufgenommen. Die kanadische Firma Iogen betreibt seit Frühjahr 2004 eine Pilotanlage, in der aus Cellulose-haltigen Biomassen Bioethanol hergestellt wird. Erste Fahrzeuge von VW und DaimlerChrysler wurden bereits in Deutschland mit diesem Ethanol betrieben (Iogen, 2004).

8.3 Einsatz von Verfahrens- und Produktvergleichen

Die in dieser Studie durchgeführten vergleichenden ökobilanziellen Auswertungen sollten aufzuzeigen, ob – und wenn ja – in welchem Ausmaß Umweltentlastungen erzielt werden können, wenn ein chemisch-technisches Verfahren oder Produkt durch eine biotechnische Alternative substituiert wird.

Hierbei ist zu beachten, dass die Spannbreite der Anwendungen chemisch-technischer und biotechnischer Verfahren und Produkte außerordentlich groß ist, so dass die durchgeführten Auswertungen nur exemplarischen Charakter haben können. Es wurde aber versucht, Beispiele für den Vergleich auszuwählen, die unterschiedlichste Anwendungsfelder abdecken (Herstellung von Vitamin, Leder, Verpackungsmaterial, Futtermittelzusatzstoffen und gereinigter Wäsche).

Da zudem Verfahrens- und Produktvergleiche durchgeführt werden sollten, mussten Anwendungen recherchiert werden, für die es chemisch-technische und biotechnische Lösungsansätze gab (s. Abschnitt 3). Somit blieben bei den Auswertungen jene „Domänen“ unberücksichtigt, in denen ausschließlich eine der Herstellungsvarianten vorhanden ist. Beispielsweise ist die Anwendung biotechnischer Herstellungsverfahren im Nahrungsmittelsektor unumstritten; chemisch-technische Herstellungsverfahren stehen hier - aus unterschiedlichen Gründen - nicht zur Verfügung. Biotechnische Varianten

fehlen dagegen in den Chemiesparten der Petrochemie und der Herstellung anorganischer Grundchemikalien.

Bei den durchgeführten vergleichenden Auswertungen ist weiter zu beachten, dass der jeweilige Istzustand von real existierenden Verfahren und Produkten betrachtet worden ist. Die derzeit betriebenen Verfahren wurden bisher jedoch nicht hinsichtlich der Minimierung der Umweltbelastungen optimiert, so dass der aktuelle Entwicklungsstand bislang nicht ausgeschöpfte Umweltentlastungspotentiale nicht berücksichtigt. Insofern sind weitergehende Aussagen hinsichtlich etwaiger grundsätzlicher Vorteile einer Herstellungsvariante auf der bestehenden Datenbasis nicht möglich. Wie die obigen Ausführungen gezeigt haben, können technische Fortschritte in relativ kurzer Zeit Nachteile einer Verfahrensvariante eliminieren: Die stürmische Entwicklung der Molekularbiologie und der Gentechnik hat die Wiedereinführung der biotechnischen Vitamin B₂-Produktion ermöglicht; die in Abbildung 6-42 dargestellten Verbesserungen der Ausbeute der Enzymproduktion gehen ebenfalls überwiegend auf die Verbesserung des Produktionsstammes zurück.

Die Ergebnisse der durchgeführten Verfahrens- und Produktvergleiche sollten deshalb primär dazu dienen, jene Abschnitte im Lebensweg eines Produktes zu identifizieren, die ein hohes Umweltbelastungspotential aufweisen. Diese Erkenntnis kann dann Ausgangspunkt für zukünftige zielgerichtete Optimierungen des Ressourcenbedarfs und der Emissionen sein. Aufgrund der begrenzten Projektressourcen waren ursprünglich lediglich Vergleiche von Stoff- und Energiebilanzen vorgesehen. Im Projektverlauf wurden die Auswertungen jedoch um Wirkungsabschätzungen ergänzt, da es irreführend sein kann, wenn Massenbilanzen miteinander verglichen werden, ohne zu berücksichtigen, dass es sich um Substanzen mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften handelt.

Die in dieser Studie angewandten ökobilanziellen Betrachtungen sowie die sektorale Darstellung der Ergebnisse gestatten eine rasche Beurteilung, ob die Ausgangsstoffe (Vorketten), der Herstellungsprozess bzw. die Entsorgung das Gesamtergebnis maßgeblich beeinflussen (s. Abschnitt 4.3). Wenn die Ergebnisse für betriebsinterne Auswertungen genutzt werden, wäre eine noch detailliertere Darstellung hilfreich, wie sie z.B. Renner u. Klöpffer (2003) für das Beispiel der Indigoherstellung gewählt haben. Aus Vertraulichkeitsgründen mussten für unsere öffentlich zugänglichen Auswertungen jedoch summarische Darstellungen gewählt werden, aus denen keine vertraulichen Betriebsdaten entnommen werden können.

Die Ergebnisse der Auswertungen haben bei den betrachteten Beispielen für die Mehrzahl der Parameter beim untersuchten biotechnischen Verfahren oder Produkt reduzierte Umweltbelastungen ergeben. Wie bereits im Abschnitt 2.3 dargestellt wurde, hat auch die OECD (2001) in 21 Fallstudien aufzeigen können, dass durch die Anwendung moderner biotechnischer Verfahren eine Reduktion der Umweltbelastungen und der Betriebskosten erzielt werden kann (s. Tabelle 2-4). Die derzeit realisierten biotechnischen Verfahren und Produkte sind jedoch unter Umweltgesichtspunkten nicht immer vorteilhaft: Analysen der BASF AG haben ergeben, dass die aktuellen chemisch-technischen Varianten der Herstellung von Astaxanthin und von Indigo die bessere Ökoeffizienz aufweisen (Baker u. Saling, 2003; BASF, 2004a, b). Auswertungen von Gerngross (1999) ergaben für die biotechnische Biopolymerproduktion höhere Umweltauswirkungen als die Polymerproduktion auf Erdölbasis.

9 Literatur

- ABAS – Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (2003): Beschluss 606 - Biologische Arbeitsstoffe mit sensibilisierenden Wirkungen. BArbBl. 3/2003. www.baua.de, 28.05.2004
- Aehle, W. (ed.) (2004): *Enzymes in Industry – Production and Application*. Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KG, Weinheim
- AISE (2001a): *The Life Cycle Assessment of European Clothes Laundering - Report 1: Goal & Scope of Project*
- AISE (2001b): *The Life Cycle Assessment of European Clothes Laundering - Report 2: LCA of compact fabric washing powder & main wash process*. October 2001
- AISE (2001c): *The Life Cycle Assessment of European Clothes Laundering - Report 3: LCA of Fabric conditioner Product*
- AISE (2001d): *The Life Cycle Assessment of European Clothes Laundering - Report 4: Washing, Drying and Ironing of Clothes*
- AISE (2003): *Implementation of the A.I.S.E. CODE OF GOOD ENVIRONMENTAL PRACTICE for household laundry detergents in Europe*. A.I.S.E. 1996/2001 Final report, January 2003
- ANS - Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e. V. (1995): *Anaerobe Bioabfallbehandlung in der Praxis*, Heft 30
- ArbSchG - Arbeitsschutz-Gesetz (2004): *Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit*. Stand 23.04.2004. www.umwelt-online.de
- Aristidou, A.; Penttilä, M. (2000): *Metabolic engineering applications to renewable resource utilization*. *Current Opinion in Biotechnology*, 2000, 11, p. 187-198
- Ast, A. u. Sell, D. (1998): *Einsatz von gentechnisch veränderten Organismen (GVOs) zur Verringerung von Umweltbelastungen*. Forschungsbericht 108 02 903 zum Vorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin
- AWT - Arbeitsgemeinschaft für Wirkstoffe in der Tierernährung e. V. (Hrsg.) (1999): *Probiotika in der Tierernährung*. Informationsschrift der AgriMedia Buchedition in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Fachverlag, Frankfurt
- BACAS - Royal Belgian Academy Council of Applied Sciences (2004): *Industrial Biotechnology and Sustainable Chemistry*
- Bachmann, R.; Bastianelli, E.; Riese, J.; Schlenzka, W. (2000): *Using plants as plants*. *The McKinsey Quarterly*, 2, p. 92-99
- Bader (2003): *Prozessdaten zum Gerbprozess*. *Mitteilungen zum praktizierten Gerbprozess bei den Baderwerken, Ichenhausen*; persönliche Mitteilungen im November/Dezember 2003
- Bahn, M. u. Intemann, K. (1997): *Life Cycle Assessment of Proteases Used in Detergents*. In: van Ede, J. H.; Misset, O.; Baas, E. J. (ed.): *Enzymes in Detergency*. Marcel Dekker, S. 341-357
- Baker, R.; Saling, P. (2003): *Comparing natural with chemical additive production*. *Feed Mix*, 11, p. 12-14

- Barth, Uli; Hesener, Ute; Kaufmann, Martin; Blum, Carsten; Wörsdorfer, Klaus (2001): Untersuchung und Übertragbarkeit der in chemischen Anlagen üblichen Sicherheitsbetrachtungen auf biotechnische Anlagen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – Forschung Fb 938. BAuA, Dortmund und Berlin
- BASF AG (2004): Fermentation – Produktion von Vitamin B2. Internetdarstellung der Firma BASF unter www.basf.de, 10.05.2004
- BASF AG (2004a): Label Eco-Efficiency Analysis Astaxanthin
- BASF AG (2004b): Die Ökoeffizienz-Analyse – Ein Werkzeug für die Zukunft. Powerpoint-Präsentation; Quelle: www.oekoeffizienzanalyse.de
- BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2003): Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe nach Anhang I der Richtlinie 67/548/EWG, 6. Abschnitt der Gefahrstoffverordnung und TRGS 905. Stand August 2003. www.baua.de
- BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2004): Sicherheit in verfahrenstechnischen Anlagen. Internetseite. Stand Mai 2004, www.baua.de
- BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2004a): Praxishilfen zur Anwendung der TRGS 300 – Sicherheitstechnik – Grundsätzliches. Broschüre Technik 29. Bearbeitet von Bock, F.; Kühnreich, K.; Haverkamp, K.; Shahvardian, A. – TÜV Rheinland Anlagentechnik GmbH. BAuA, Dortmund
- BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2004b): Praxishilfen zur Anwendung der TRGS 300 – Sicherheitstechnik – TÜV Rheinland-Methode zur Bewertung des Gefahrenpotentials. Broschüre Technik 30. Bearbeitet von Bock, F. und Kühnreich, K. – TÜV Rheinland Anlagentechnik GmbH. BAuA, Dortmund
- BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2004c): Praxishilfen zur Anwendung der TRGS 300 – Sicherheitstechnik – Hoechst-Gefahrenanalyse zur Bewertung des Gefahrenpotentials. Broschüre Technik 31. Bearbeitet von Bock, F.; Kühnreich, K.; Haverkamp, K.; Shahvardian, A. – TÜV Rheinland Anlagentechnik GmbH. BAuA, Dortmund
- BayVAwS - Anlagenverordnung (2003): Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. Letzte Änderung vom 07.08.2003. www.umwelt-online.de
- Bekanntmachung des Bundesministeriums für Gesundheit: "Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten". Bundesgesundheitsblatt 3/2001, S. 246 - 304, auch unter www.rki.de, Stichwort Gentechnik, im Internet
- Berth, P. (1970): Chemie und Technologie moderner Waschmittel. Chemiker-Zeitung, 94 , Nr. 23/24, S. 974-981
- Berth, P.; Heidrich, J.; Jakobi, G. (1980): Der Einsatz von Tensiden in Waschmitteln, gestern - heute - morgen. Tenside Detergents, 17, S. 228-235
- BetrSichV - Betriebssicherheitsverordnung (2004): Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes. Letzte Änderung vom 06.01.2004. www.umwelt-online.de

- BGCh - Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (1992): BG-Information "Sichere Biotechnologie – Betrieb – Ausstattung und organisatorische Maßnahmen" (BGI 630), Jedermann-Verlag, Heidelberg
- BGCh - Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (1993): BG-Information "Sichere Biotechnologie Einstufung gentechnischer Arbeiten: Gentechnisch veränderte Organismen" (BGI 635), Jedermann-Verlag, Heidelberg
- BGCh - Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (2002): BG-Information "Sichere Biotechnologie - Einstufung Biologischer Arbeitsstoffe: Pilze" (BGI 634), Jedermann-Verlag, Heidelberg
- BGCh - Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (2002a): BG-Information "Sichere Biotechnologie - Einstufung Biologischer Arbeitsstoffe: Bakterien" der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BGI 633). Jedermann-Verlag, Heidelberg
- BIA – Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (2002): Gefahrstoffe ermitteln und ersetzen. Eine Anleitung zur Gefahrstoffermittlung und Ersatzstoffsuche. Überarbeitete Fassung nach Neufassung der TRGS 440 im März 2001. BIA-Report 2/2002. www.hvbg.de
- BIA – Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (2003): Grenzwerteliste 2003. Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit. BIA-Report 2/2003. www.hvbg.de
- BIA – Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (2003b): Liste der krebserzeugenden, erbgut-veränderlichen oder fortpflanzungsgefährdenden Stoffe (KMR-Liste). Stand: 17.09.2003. www.hvbg.de
- BIA – Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (2004): Gefahrstoffliste 2004 – Gefahrstoffe am Arbeitsplatz. BIA-Report 1/2004. www.hvbg.de
- BIA – Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (2004a): GESTIS-Stoffdatenbank – Gefahrstoffinformationssystem der gewerblichen Berufsgenossenschaften. www.hvbg.de
- BIA – Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (2001): Das Spaltenmodell. Eine Hilfestellung zur Gefahrenermittlung und Ersatzstoffprüfung nach § 16 Gefahrstoffverordnung. BIA, Sankt Augustin. www.hvbg.de
- Bidlingmair, W.; Müsken, J. (1994): Handbuch Abfall. Vergärung und Kompostierung von Bioabfällen – Methodenvergleich. Landesanstalt für Umweltschutz BadenWürttemberg (Hrsg.), Karlsruhe
- Binder, R. (2004): persönliche Mitteilung am UBA-Fachgespräch (Projektbesprechung), Augsburg, 22.06.2004
- BIO – Biotechnology Industry Organization (2004): Internetpräsentation unter www.bio.org
- BioStoffV – Biostoff-Verordnung (2003): Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen. Letzte Änderung vom 25.11.2003. www.umwelt-online.de
- BMGS - Bundesministerium für Gesundheit und soziale Sicherung (2001): Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten. Bekanntmachung nach § 5 Absatz 6 Gentechnik-Sicherheitsverordnung. Fassung vom 01.03.2001. www.rki.de , 10.05.2004
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2004a): Fakten zur nachhaltigen Abfallwirtschaft. Stand: 01. März 2004. Internetpräsentation

- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2004b): Entwicklung der Erneuerbaren Energien im Jahr 2003 in Deutschland. Erste vorläufige Abschätzung (Stand Februar 2004)
- BMWA - Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (2003): Energieindikatoren Deutschland, Stand April 2003
- Böhme, H.; Fleckenstein, J.; Hu, Z.; Schnug, E. (2002): Bilanzversuche zum Einsatz von Seltenen Erden in der Schweinemast. Vortragsmanuskript zum 114. VDLUFA-Kongress Ressourcen und Produktsicherheit – Qualitätssicherung in der Landwirtschaft, 16.-20. September 2002, Leipzig
- Bollschweiler, K. (2002): With biocatalysis en route to industrial sustainability. Beitrag zur Konferenz "The role of biotechnology in industrial sustainability", Antwerpen, 16.05.-17.05.2002
- Borger, C. (2003): Alternative Methoden in der Schweinemast: Untersuchungen zum leistungssteigernden Potential Seltener Erden und zur Jodanreicherung im Gewebe durch die Verfütterung von Meeresalgen. Dissertation an der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München
- Brandt, C. (2002): Die chemische Industrie auf einem Weg in eine grüne Zukunft ? Sustainable Development und Responsible care. Chemie in unserer Zeit, 36, Nr. 4; S. 214-224
- Bron, S.; Meima, R.; Maarten van Dijl, J.; Wipat, A.; Harwood, C. R. (1999): Molecular Biology and Genetics of Bacillus spp.. In: Demain, Arnold L.; Davies, Julian E.: Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology. Second Edition. ASM Press, Washington D.C.. S. 392 - 416
- Bundesamt für Gesundheit (2001): Gesuch der F. Hoffmann – La Roche AG (seit 1. Juli 2001: Roche Vitamins AG), Basel. Zulassungsbescheid des Schweizerischen Bundesamtes für Gesundheit. Verfügbar über www.transgen.de, 19.05.2004. www.transgen.de/Zulassung/Lebensmittel/vitaminb2_not.html, 10.05.2004
- Bundesregierung Deutschland (2002): Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Download von <http://www.nachhaltigkeitsrat.de>
- BUWAL – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2003): Einstufung von Organismen – Bakterien. Richtlinie im Bereich Vollzug Umwelt. BUWAL, Bern (Schweiz)
- CEFIC – European Chemical Industry Council (2004): Facts and Figures: The European chemical industry in a worldwide perspective. January 2004. Download von <http://www.cefic.org>
- Chartrain, M.; Salmon, P. M.; Robinson, D. K.; Buckland, B. C. (2000): Metabolic engineering and directed evolution for the production of pharmaceuticals. Current Opinion in Biotechnology, 11, p. 209-214
- ChemFinder (2004): ChemFinder.Com. Database and Internet Searching. CambridgeSoft Corporation. <http://chemfinder.cambridgesoft.com>
- ChemG – Chemikaliengesetz (2003): Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen. Letzte Änderung vom 25.11.2003. www.juris.de
- Chen, H.-F. (1997): Influence of rare earth compounds on the growth of pigs. J. Chin. Rare Earth Society, 15, p. 441-443
- Chevita (2003): Informationsgespräche zum Herstellungsprozess und der dafür verwendeten Stoffströme zwischen der Chevita GmbH und der BlfA GmbH, Pfaffenhofen, 14.05.2004 und 16.12.2004

- Chiang, S.-J. (2004): Strain improvement for fermentation and biocatalysis processes by genetic engineering technology. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 31, p. 99-108
- Chotani, G.; Dodge, T.; Hsu, A.; Kumar, M.; LaDuca, R.; Trimbur, D.; Weyler, W.; Sanford, K. (2000): The commercial production of chemicals using pathway engineering. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1543, p. 434-455
- Christ, C. (2000): Umweltschonende Technologien aus industrieller Sicht – Verfahrensverbesserungen und Stoffkreisläufe. *Chemie Ingenieur Technik*, 72, 1+2, S. 42-57
- Christner, J. (1988): The Pros and Cons of Hair-Save Process in Beamhouse. *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, 83 (1988), p. 183-192; zit. bei FILK (1993)
- Christner, J. (1990): Qualitätsverbesserung und Abwasserentlastung mit einem neuen haarerhaltenden Äscherverfahren. *Das Leder - Fachzeitschrift für die Chemie der Lederherstellung – Mitteilungsblatt des Vereins für Gerberei-Chemie und -Technik e. V. (VGCT)*, Darmstadt, 9, S. 177-183
- CIS – International Occupational Safety and Health Information Centre (2004): International Chemical Safety Cards (ICSC). International Labour Organization. www.ilo.org
- CML - Center of Environmental Science; TNO - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research; B&G - Fuels and Raw Materials Bureau (1992): Environmental life cycle assessment of products - Guide and Backgrounds, Leiden
- Cortassa, S.; Aon, M. A.; Iglesias, A. A.; Lloyd, D. (2002): An Introduction to Metabolic & Cellular Engineering. World Scientific Publishing Co., Inc.
- D'Aquino, R. (2003): Green Factories for Pharmaceuticals. *CEP*, 1, p. 34S-36S
- Danner, H. u. Braun, R. (1999): Biotechnology for the production of commodity chemicals from biomass. *Chem. Soc. Rev.*, 28, p. 395-405
- Datar, R. V. u. Rosén, C. (1993): Cell and Cell Debris Removal: Centrifugation and Crossflow Filtration. In: Stephanopoulos, G. (Ed.): *Biotechnology – Vol. 3 Bioprocessing*. Second, compl. rev. Edition. VCH, Weinheim. S. 469 – 503
- Dechema (2000): Nachhaltige Biotechnologie zum Schutz der Umwelt zum Beispiel Vitamin B2. Faltblatt des Netzwerkes Umweltbiotechnologie, veröffentlicht unter: <http://www.dechema.de/biotech.htm>
- Dechema (2002): Simulationsgestützte Bewertung der Nachhaltigkeit biotechnologischer Produktion. <http://kwi.dechema.de/biovt/deutsch/bioben.htm>
- Del Bino, G.; Broecker, B.; Binetti, R.; King, N. (1995): Products. In: Elvers, B.; Hawkins, S.; Russey, W. (Ed.): *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Vol. B8 – Environmental Protection and Industrial Safety II. VCH, Weinheim. S. 181 - 211
- Desai, P. (2002): Bio-Products and Agriculture. Präsentation, Edmonton, 6. August. Download <http://www.avacltd.com/pastevents/PeteDesaisMemberMeetingEdmonton020806.pdf>
- Destatis (2002): Bevölkerungsentwicklung, <http://www.destatis.de/-indicators/d/vgr910ad.htm>, download
- Di Francesco, C. A.; Hedrick, J. B. (2002): Rare Earth Statistics, U.S. Geological Survey, USGS Open-File Report 01-006
- DIN - Deutsches Institut für Normung DIN e. V. (1997): DIN EN ISO 14040 - Umweltmanagement - Produkt-Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin

- DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. (1999): DIN EN ISO 14041 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Beuth Verlag, Berlin
- DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. (2000): DIN EN ISO 14042 - Umweltmanagement - Ökobilanz – Wirkungsabschätzung. Beuth Verlag, Berlin
- DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. (2000a): DIN EN ISO 14043 - Umweltmanagement - Ökobilanz – Auswertung. Beuth Verlag, Berlin
- DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. (2003): Waschmaschinen für den Hausgebrauch - Verfahren zur Messung der Gebrauchseigenschaften (IEC 60456:1998, modifiziert) Deutsche Fassung EN 60456:1999 + A11:2001 + A12:2001 + A13:2003 EN 60456
- DSM (2003): persönliche Mitteilung der Firma DSM Nutritional Products (vormals Roche Vitamine GmbH), Grenzach-Wyhlen
- DVT (2003): Mischfutter als Teil der Futtermittelwirtschaft. Deutscher Verband Tiernahrung e. V., Bonn; 15.11.2003, Informationsangebot im Internet unter: www.dvtiernahrung.de
- Eberle, U. u. Grieshammer, R. (2001): Ökobilanzierung zu Wasch- und Reinigungsmittelrohstoffen und deren Anwendung in der gewerblichen Wäscherei. Schriftenreihe Texte des Umweltbundesamtes, 43/01, Berlin
- EEA – European Environment Agency (1998): Chemicals in the European Environment: Low Doses, High Stakes? The EEA and UNEP Annual Message 2 on the State of Europe's Environment
- EEA - European Environment Agency (2003): Europe's environment: the third assessment. Environmental assessment report No. 10. Download von <http://www.eea.eu.int>
- EG (1999): ENTSCHEIDUNG DER KOMMISSION vom 17. Dezember 1999 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des Umweltzeichens der Gemeinschaft für Waschmaschinen (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(1999) 4650) (Text von Bedeutung für den EWR) (2000/45/EG)
- EG (2003): ENTSCHEIDUNG DER KOMMISSION vom 14. Februar 2003 zur Festlegung überarbeiteter Umweltkriterien zur Vergabe des EG-Umweltzeichens für Waschmittel und zur Änderung der Entscheidung 1999/476/EG. (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2003) 143) (Text von Bedeutung für den EWR) (2003/200/EG)
- Eisele, N. (2003): Untersuchungen zum Einsatz Seltener Erden als Leistungsförderer beim Schwein. Dissertation an der Tierärztlichen Fakultät der LMU München
- Eriksson, O.E. (2004): Myconet – SSU rDNA sequences from Ascomycota. ISSN 1403-1418. <http://www.umu.se/myconet>, Stand 25.05.2004
- ERRMA - European Renewable Resources & Materials Association (2002): Current Situation and Future Prospects of EU Industry Using Renewable Raw Materials. A Status Report On A Novel Industry Sector
- EU – The European Commission – Scientific Committee on Food (1998): Opinion on Riboflavin as a colouring matter authorized for use in foodstuffs produced by fermentation using genetically modified bacillus subtilis (expressed on 10 december 1998). http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/out18_en.html
- EU – European Commission (2004) : Biomass for Fuel, Fibre, Fertiliser and Feed. CD-ROM
- EUROPABIO (2002): Cleaner detergents. White biotech fact sheet “Enzymes and detergents”. <http://www.europabio.org>

- Europäische Kommission (2003): Mitteilung der Kommission über den nicht verbindlichen Leitfaden für bewährte Verfahren im Hinblick auf die Durchführung der Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können. KOM/2003/0515 endg.. Europäische Kommission, Brüssel
- Fachverband Biogas e. V. (2004): Anlagenstatistik. Internetpräsentation unter <http://www.biogas.org>
- Feikes, L. (1990): Ökologische Probleme der Lederindustrie. In: Herfeld (Hrsg): Bibliothek des Leders, Band 8
- Festel, G.; Knöll, J.; Götz, H.; Zinke, H. (2004): Der Einfluss der Biotechnologie auf Produktionsverfahren in der Chemieindustrie. Chemie Ingenieur Technik, 76, 3, S. 307-312
- FILK (1993): Abfallvermeidung und –verwertung in der Lederindustrie. Ökologische Gesamtbilanz der lederherstellenden Industrie, Forschungsinstitut für Leder- und Kunstledertechnologie GmbH (FILK)
- FILK (1998): Vergleich der verschiedenen Gerbarten auf ihre ökologische Gesamtwirkung. Abschlussbericht des AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10613 B, 27.02.1998, FILK gGmbH – Forschungsinstitut für Leder- und Kunstledertechnologie gGmbH – An-Institut der TU Bergakademie Freiberg
- Fischer, R.; Drossard, J.; Commandeur, U.; Schillberg, S.; Emans, N. (1999a): Towards molecular farming in the future: moving from diagnostic protein and antibody production in microbes to plants. Biotechnol. Appl. Biochem., 30, p. 101–108
- Fischer, R.; Drossard, J.; Commandeur, U.; Schillberg, S.; Emans, N. (1999b): Towards molecular farming in the future: moving from diagnostic protein and antibody production in microbes to plants. Biotechnol. Appl. Biochem., 30, p. 101-108
- Fischer, R.; Drossard, J.; Emans, N.; Commandeur, U.; Hellwig, S. (1999c): Towards molecular farming in the future: Pichia pastoris-based production of single-chain antibody fragments. Biotechnol. Appl. Biochem., 30, p. 117–120
- Fischer, R.; Emans, N.; Schuster, F.; Hellwig, S.; Drossard, J. (1999d): Towards molecular farming in the future: using plant-cell-suspension cultures as bioreactors. Biotechnol. Appl. Biochem., 30, p. 109-112
- Fischer, R.; Schillberg, S. (eds.) (2004): Molecular Farming - Plant-made Pharmaceuticals and Technical Proteins. Wiley-VCH, Weinheim
- Fischer, R.; Vaquero-Martin, C.; Sack, M.; Drossard, J.; Emans, N.; Commandeur, U. (1999e): Towards molecular farming in the future: transient protein expression in plants. Biotechnol. Appl. Biochem., 30, p. 113-116
- Franke, M.; Klüppel, H.; Kirchert, K.; Olschewski, P. (1995): Ökobilanzierung - Sachbilanz für die Waschmittel-Konfektionierung. Tenside Surf. Det., 32, 6, S. 508-514
- Freitag, M.; Hensche, H.-U.; Schulte-Sienbeck, H.; Reichelt, B. (1998): Kritische Betrachtung des Einsatzes von Leistungsförderern in der Tierernährung. Fortschrittsberichte des Fachbereiches Agrarwirtschaft Soest Universität – Gesamthochschule Paderborn Nr. 8; zit. bei Schneider-Böttcher (2001)
- Fürst, E. (1992): Untersuchung umweltrelevanter Parameter im Bereich eines lederherstellenden Betriebes. Reports UBA-91-053, Umweltbundesamt Wien, (Januar 1992)
- GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker (2003): Green Chemistry – Nachhaltigkeit in der Chemie. Wiley-VCH, Weinheim

- GefStoffV – Gefahrstoffverordnung (2004): Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen. Letzte Änderung vom 25.02.2004. www.juris.de
- GenTG – Gentechnikgesetz (2004): Gesetz zur Regelung der Gentechnik. Letzte Änderung vom 22.03.2004. www.juris.de
- GenTSV – Gentechnik-Sicherheitsverordnung (2002): Verordnung über die Sicherheitsstufen und Sicherheitsmaßnahmen bei gentechnischen Arbeiten in gentechnischen Anlagen. Letzte Änderung vom 16.08.2002. www.bmu.bund.de
- Gerngross, T. U. (1999): Can biotechnology move us toward a sustainable society? *Nature Biotechnology*, 17, 6
- Gong, C. S.; Cao, N. J.; Du, J.; Tsao, G. T. (2003): Ethanol Production from Renewable Resources. *Advances in biochemical engineering, biotechnology*, 65, p. 207 – 241
- GPSG - Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (2004): Gesetz über technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte. Stand 06.01.2004. BGBl I 2004, Nr. 1, S. 2 – 20, 09.01.2004
- Greife, H.A. u. Berschauer, F. (1988): Leistungsförderer in der Tierproduktion: Stand und Perspektiven. *Übersicht zur Tierernährung*, 16, S. 27-77; zit. bei Borger (2003)
- Grieshammer, R.; Bunke, D.; Gensch, C.-O. (1997): Produktlinienanalyse Waschen und Waschmittel. *Schriftenreihe Texte des Umweltbundesamtes*, 1/97, Berlin
- Günther, H. (2001a): Gefährdungsbeurteilung. Stand August 2001. UB-Media Fachdatenbank Arbeitsschutz. www.e-lex.de , 05.02.2004
- Günther, H. (2001b): Gefährdungsfaktoren. Stand August 2001. UB-Media Fachdatenbank Arbeitsschutz. www.e-lex.de , 05.02.2004
- Halle, I.; Fleckenstein, J.; Hu, Z.; Flachowsky, G.; Schnug, E. (2002): Untersuchungen zum Einfluss von Seltenen Erden auf das Wachstum und die Schlachtleistung von Broilern. Vortragsmanuskript zum 114. VDLUFA-Kongress Ressourcen und Produktsicherheit – Qualitätssicherung in der Landwirtschaft, 16. – 20. September 2002, Leipzig
- Hauber, C. u. Schröer, T. (2002): Das EU-Merkblatt zu den „Besten verfügbaren Techniken für die Gerbung von Häuten und Fellen“ und seine Bedeutung für die Genehmigungsanforderungen in der Lederindustrie. *Leder & Häute Markt*, 6/2002, S. 29-40
- He, M. L. u. Rambeck, W. A. (2000): Rare Earth Elements – a new generation of growth promoters for pigs? *Arch. Anim. Nutr.*, 53, S. 323-334
- He, M. L.; Ranz, D.; Rambeck, W. A. (2001): Study on the performance enhancing effect of rare earth elements in growing and fattening pigs. *J. Anim. Physiol. Nutr.*, 85
- Hedrick, J. B. (1999): Rare Earths. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook – 1999
- Hedrick, J. B. (2003): Rare Earths. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2003
- Heid, A.; Wettig, E. (2000): Konzentrationstendenzen im Weltbergbau. *Wochenbericht 3/00*, dargestellt Im Internet unter: <http://www.diw.de/deutsch/publikationen/wochenberichte/docs/00-03-1.html>
- Henning, M. (2003): Huhn und Schwein und Seltene Erden. Natürliche Alternativen zu antibiotischen Futterzusätzen. *Wissenschaft erleben. Magazin der FAL Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft*, Ausgabe 1/2003
- Herfeld, H. (Hrsg): *Bibliothek des Leders*, Band 1 – 10, 2. Auflage 1990, Umschau Verlag, Frankfurt a. M.

- Hinman, R.L. (1991): The Chemical Industry. In: U.S. Congress – Office of Technology Assessment: Biotechnology in a Global Economy. Chapter 7, p. 118-125; Report Number OTA-BA-494, Washington
- Hoppenheidt, K. u. Mücke, W. (1999): Behandlung von Bioabfällen und organischen Gewerbeabfällen durch Co-Vergärung. BIfA-Texte Nr. 11. Veröffentlicht unter: <http://www.bifa.de>
- Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs D. J.; Noguer, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A. (2001): Climatic Change 2001 - The Scientific Basis. Report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), University Press, Cambridge
- Hüsing, B.; Gießler, S.; Jaeckel, G. (1998): Stand der Möglichkeiten von prozessintegrierten biotechnischen Präventivtechniken zur Vermeidung oder zur Verminderung von Umweltbelastungen. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung Karlsruhe (ISI). UBA-Texte 68/98; Forschungsbericht 108 02 902 alt/296 94 902 neu UBA-FB 98-094
- Ifeu (1994): ifeu Studie „POP in Deutschland“ in Vogt et al. (2002)
- ifu - Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH u. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2002): Umberto 4.1 – Software für das betriebliche Stoffstrommanagement, Hamburg, Heidelberg
- IKW - Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V. (2004): Internetpräsentation der Marktdaten zu Waschmitteln. <http://www.ikw.org>
- Iogen (2004): First cellulose ethanol demonstration in European vehicles. Pressemitteilung von 01.06.2004, veröffentlicht unter <http://www.iogen.ca>
- IPCC - Intergovernmental Panel on the Climatic Change (1995): Climate change 1994, University Press, Cambridge
- IPTS - Institute for Prospective Technological Studies (1998): Biocatalysis: State of the art in Europe - Economic and environmental benefits of a process integrated technology. IPTS Project: Modern Biotechnology and the Greening of Industry. Sevilla
- IPTS - Institute for Prospective Technological Studies (2001): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for the Tanning of Hides and Skins. European Commission, Directorate-General JRC, Joint Research Center, Institute for Prospective Technological Studies, Seville; Technologies for Sustainable Development, European IPPC Bureau, Seville, May 2001
- IPTS - Institute for Prospective Technological Studies (2002): The Assessment of Future Environmental and Economic Impacts of Process-Integrated Biocatalysts. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), Seville, July 2002 (Report EUR 20407 EN)
- ISI – Informationsstelle für Sicherheitsdatenblätter (2004): Online-Datenbank für Sicherheitsdatenblätter. www.baua.de
- IVSS – Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie (1997): Gefahrenermittlung und Gefahrenbewertung - Praxisbewährte systematische Methoden. ISSA Prevention Series No. 2027 (G). IVSS, Heidelberg
- IVSS – Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie (1999): Sicherer Umgang mit biologischen Agenzien – Biotechnologie, Gentechnologie. ISSA Prevention Series No. 2039 (G). IVSS, Heidelberg

- IVSS – Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie (2000): Das PAAG-Verfahren - Methodik, Anwendung, Beispiele. 3. Auflage. ISSA Prevention Series No. 2002 (G). IVSS, Heidelberg
- Jacobi, G.; Löhr, A.; Schwuger, M. J.; Jung, D.; Fischer, W. K.; Gerike, P.; Künstler, K. (1987): Detergents. In: Gerhartz, W. (Hrsg.): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 5. Aufl., Bd. 8A, VCH, S. 315-448
- Kamm, B. u. Kamm, M. (2001): Biobasierte Industrielle Produkte und Bioraffinerie-Systeme - Ein Weg in die industrielle Zukunft des 21. Jahrhunderts? Download von <http://www.biorefinery.de>
- Kamm, B. u. Kamm, M. (2003): Bioraffinerie – Prinzipien. Mitteilungen der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie, 9. Jahrg., Nr. 4
- Kaplan, F. F. (1988): The Processing of Rare Earth Minerals. In: Bautista, R. G. u. Wong, M. M.: TMS 1988. S. 317
- Klöpffer, W.; Renner, I. (1995): Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien. UBA-Texte 23/95, Berlin
- Klüppel, H.-J. (1993): Ökobilanzen von Waschmitteln - Perspektiven und Grenzen. SEPAWA-Jahrestagung; Bad Dürkheim, 14.-15. Oktober
- Kottwitz, B. u. Upadek, H. (1994): Einsatz und Nutzen von Enzymen in Waschmitteln. SÖFW-Journal, 120, 13, S. 794-800
- Krings, P.; Sandkühler, P. (2003): Waschen und Waschmittel im Wandel der Zeit. SÖFW-Journal, 129, Nr. 5, S. 63-71
- Kurth, R.; Paust, J.; Hähnlein, W. (1996): Riboflavin. In: Eggersdorfer, M. et al.: Vitamins. S. 521 – 530. In: Elvers, B.; Hawkins, S. (Ed.): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol. A27 – Thorium and Thorium Compounds to Vitamins. VCH, Weinheim. S. 443 – 613
- Kurth, S. u. Schüler, D.; Renner, I. u. Klöpffer, W. (2003): Entwicklung eines Modells zur Berücksichtigung der Risiken durch nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände von Industrieanlagen im Rahmen von Ökobilanzen (Vorstudie). Endbericht – Hauptteil. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen (UFOPLAN) 201 48 309. Öko-Institut, Freiburg – Darmstadt – Berlin, und CAU, Dreieich
- LASI - Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (2001): Handlungshilfe zur Umsetzung der Biostoffverordnung. LASI-Veröffentlichung LV 23. <http://lasi.osha.de> , 14.04.2004
- Lederhaus (2003): Informationsangebot des Lederhauses Duisburg. Internetdarstellung unter: <http://www.lederhaus.de/wissen/#geschichte>
- Lehmann, H. J. (1973): Moderne Waschmittel. Chemie in unserer Zeit , Nr. 3, S. 82-89
- Leuchtenberger, A. (1998): Grundwissen zur mikrobiellen Biotechnologie. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig
- Losand, B. (2000): Schweineernährung ohne Leistungsförderer? Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Heft 21, Februar 2000
- Maeting, I.; Schmidt, G.; Sahm, H.; Revueltac, J.; Stierhofd, Y-D.; Stahmann, K.-D. (1999): Isocitrate lyase of *Ashbya gossypii* - transcriptional regulation and peroxisomal localization. FEBS Letters, 444, p. 15-21

- Manneck, H. (1956): Herstellung und Zusammensetzung pulverförmiger Wasch-, Reinigungs- und Spülmittel
- Massey, V. (2000): The Chemical and Biological Versatility of Riboflavin. *Biochemical Society Transactions*, 28, 4, p. 283-296
- Maurer, K. (1999): Einsatz technischer Enzyme im Bereich Wasch- und Reinigungsmittel. In: Heiden, S.; Bock, A.-K.; Antranikian, G. (Hrsg.): Industrielle Nutzung von Biokatalysatoren: ein Beitrag zur Nachhaltigkeit. Erich Schmidt-Verlag, S. 173-185
- Menke, K.-H.; Huss, W. (1980): Tierernährung und Futtermittelkunde. UTB Uni-Taschenbücher 63, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Merck (2004): Die Merck Chemie Datenbanken – ChemDAT-online. <http://chemdat.merck.de>
- Meyer, M. (1996): Xylidines. In: Elvers, B.; Hawkins, S. (Ed.): *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Vol. A28 – Water to Zirconium and Zirconium Compounds. VCH, Weinheim. S. 455 – 460
- Moch, E. u. Stephan, T. (2001): Entwicklung von Arbeitshilfen zur Erstellung und Prüfung des Konzeptes zur Verhinderung von Störfällen. Abschlußbericht zum FE-Vorhaben 299 48 324 des Umweltforschungsplans des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. RWTÜV Anlagentechnik GmbH, Essen
- Monschau, N.; Sahm, H.; Stahmann, K.-P. (1999): Threonine Aldolase Overexpression plus Threonine Supplementation Enhanced Riboflavin Production in *Ashbya gossypii*. *Applied and Environmental Microbiology*, 64, 11, 4283-4290
- Moore, P. R.; Enenson, A.; Luckey, T. D.; McCoy, E.; Elvehjem, C. A.; Hart, E. B. (1946): Use of sulfasuxidine, streptothricin and streptomycin in nutritional studies with the chick. *J. Biol. Chem.*, 16, S. 437-441; zit. bei Borger (2003)
- Muroma, A. (1958): Studies on the bactericida action of salts of certain rare earth metals. *Ann. Med. Exp. Biol. Fenn.*, 36 (Suppl. 6), p. 1-54; zit. bei Borger (2003)
- MWV - Minerölwirtschaftsverband e. V. (2003): Mineralöl und Raffinerien. <http://www.mwv.de>
- N.N. (1998): China Guangxi Liuzhou Rare Earth Animal & Plant Additive Group Co. Ltd., Firmenschrift 1998; zit. bei Richter (2002)
- N.N. (2003a): Produktinformation der Fa. Chevita GmbH, Pfaffenhofen a. d. Ilm. Internetdarstellung unter: <http://www.chevita.com/oralin/index.html>
- N.N. (2003b): Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über Zusatzstoffe zur Verwendung in der Tierernährung, Amtsblatt der Europäischen Union L 268/29, 18.10.2003
- Nagel, S. (2004): persönliche Mitteilung am UBA-Fachgespräch (Projektbesprechung), Augsburg, 22.06.2004
- Nagel, S. u. Albus, D. (2003): Fachgespräch zur Projektausgestaltung und Datenerhebung mit der Fa. Schill+Seilacher, Böblingen, 30.09.2003
- Novozyme (2002): Detergent Enzymes. Presentation dated 12.12.2002; published <http://www.novozymes.com>
- Novozyme (2003): Production optimisation. Presentation dated April 2003; published <http://www.novozymes.com>
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (1998): *Biotechnology for Clean Industrial Products and Processes - Towards Industrial Sustainability*

- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2001): The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability
- Özbas, T. u. Kutsal, T. (1986): Comparative study of riboflavin production from two microorganisms: *Eremothecium ashbyi* and *Ashbya gossypii*. *Enzyme Microb. Technol.*, 8, p. 593-596
- Pauckner, W.; Rein, E.; Herfeld, H. (1988): Umweltbeeinträchtigende Stoffe im Abwasser der Leder-, der Pelzveredelungs- und der Lederfaserwerkstoffindustrie. Westdeutsche Gerberschule Reutlingen
- Perkins, J. B.; Sloma, A.; Hermann, T.; Theriault, K.; Zachgo, E.; Erdenberger, T.; Hannett, N.; Chatterjee, N. P.; Williams II, V.; Rufo Jr., G. A.; Hatch, R.; Pero, J. (1999): Genetic engineering of *Bacillus subtilis* for the commercial production of riboflavin. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 22, p. 8-18
- Pfisterer, H. (1986): Energieeinsatz in der Lederindustrie. In: Herfeld, H. (Hrsg.): Bibliothek des Leders. Umschau Verlag, Frankfurt a. M.
- Pförtner, M. (1995): Ausgangsmaterialsuche und Bestimmung strategischer Bindungen in der computergestützten Syntheseplanung. Diplomarbeit im Fach Organische Chemie. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. www2.chemie.uni-erlangen.de/services/dissonline, 10.05.2004
- Pilz, V.; Bender, H.; Müller, M.; Conrad, D.; Berthold, W.; Wandrey, P.; Steinbach, J.; Hagen, H.; Schacke, H.; Viard, R.; Schrörs, B.; Drees, S.; Hesse, G.; Förster, H.; Bartels, K.; Widmer, U.; Geiger, A.; Noha, K.; Müller, E.; Grenner, D.; Schulz, N.; Zimmermann, J.; Harbordt, J.; Walper, M. (1995): Plant and Process Safety. In: Elvers, B.; Hawkins, S.; Russey, W. (Ed.): *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Vol. B8 – Environmental Protection and Industrial Safety II. VCH, Weinheim. S. 311 - 429
- Plinke, E.; Schonert, M.; Meckel, H.; Detzel, A.; Giegrich, J.; Fehrenbach, H.; Ostermayer, A.; Schorb, A.; Heinisch, J.; Luxenhofer, K.; Schmitz, S. (2000): Ökobilanz für Getränkeverpackungen II – Hauptteil. UBA-Texte 37/00, Umweltbundesamt Berlin
- Pollak, P. (1990): Malonic Acid and Derivatives. In: Elvers, B.; Hawkins, S.; Schulz, G. (Ed.): *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Vol. A16 – Magnetic Materials to Mutagenic Agents. VCH, Weinheim. S. 63 – 75
- Powell, K. A.; Ramer, S. W.; del Cardayré, S. B.; Stemmer, W. P. C.; Tobin, M. B.; Longchamp, P. F.; Huisman, G. W. (2001): Gerichtete Evolution und Biokatalyse. *Angewandte Chemie*, 113, S. 4068-4080
- Rambeck, W. (2004): Persönliche Mitteilung zum Leistungspotenzial Seltener Erden-Produkte. Telefonat vom 21.01.2004
- Rambeck, W. A. u. Wehr, U. (2004): Abstimmung zum Leistungspotenzial des Handelsproduktes Lancer in Bezug auf aktuelle Fütterungsversuche. Telefonat vom 01.03.2004
- Rambeck, W. A.; He, M. L.; Chang, J.; Arnold, R.; Henkelmann, R.; Süß, A. (1999): Possible role of Rare Earth Elements as growth promoters. *Vitamine und Zusatzstoffe in der Ernährung von Mensch und Tier*, 7. Symposium, Jena: S. 311-317; zit. bei Borger (2003)
- Rehm, H. J. (1980): Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag
- Reich, G. (2000): Ökologische Aspekte wichtiger Gerbverfahren. Eine vergleichende Betrachtung der Chromgerbung und chromfreier Gerbverfahren. Hrsg.: Forschungsgemeinschaft Leder e. V., Frankfurt a. M.

- Renner, I. u. Klöpffer, W. (2003): Untersuchung der Anpassung von Ökobilanzen an spezifische Erfordernisse biotechnischer Prozesse und Produkte. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 201 66 306
- Richter, H. (2003a): Persönliche Mitteilung, München, 09.10.2003
- Richter, H. (2003b): Bemerkungen zur Gewinnung von SE-Produkten für die Tierernährung, Literaturangaben, Wittenberg, 26.10.2003
- Riedel-Caspari, G. (1988): Unentbehrlich aber problematisch. *Krafffutter* 11, S. 603-605; zit. bei Borger (2003)
- Risikokommission - ad hoc-Kommission "Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risikobewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz der Bundesrepublik Deutschland (2002): Erster Bericht über die Arbeit der Risikokommission. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Risikokommission, Salzgitter
- Risikokommission - ad hoc-Kommission "Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risikobewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz der Bundesrepublik Deutschland (2003): Abschlussbericht der Risikokommission. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit und Soziale Sicherung sowie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Risikokommission, Salzgitter.
- RL 2000/54/EG (2000): Richtlinie 2000/54/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 18.09.2000 über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* Nr. L 262/21 vom 17.10.2000. www.umwelt-online.de
- RL 67/548/EWG (2003): Richtlinie 67/548/EWG des Rates vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoff. Einschließlich der Änderungen bis zum 16.05.2003. www.umwelt-online.de
- RL 98/81/EG (1998): Richtlinie 98/81/EG des Rates vom 26. Oktober 1998 zur Änderung der Richtlinie 90/219/EWG über die Anwendung genetisch veränderter Mikroorganismen in geschlossenen Systemen. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften*, 05.12.1998, L 330/13. www.rki.de , 10.05.2004
- Roche (2003): Persönliche Mitteilung
- Rothermel, J. (2003): Nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie. In: *Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie*. Tagungsband zum 8. Symposium am 26./27. März 2003 in Tübingen, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 22, S. 17-31
- Saling (2002): Vitamin B2: Comparisation of Chemistry and Biotechnology. BASF AG - Produktsicherheit, *Chemikalienrecht, Toxikologie und Ökologie*
- Sauter, E. u. van Hoof, G. (2002): A Database for the Life-Cycle Assessment of Procter & Gamble Laundry Detergents. *Int. J. LCA*, 7, 2, p. 103-114
- Sauter, E.; van Hoof, G.; Feijtel, T. C. J.; Owens, J. W. (2002): The Effect of Compact Formulations on the Environmental Profile of Northern European Granular Laundry Detergents Part II: Life Cycle Assessment. *Int. J. LCA*, 7, 1, p. 27-38
- Sauter, E.; van Hoof, G.; Pittinger, C. A., Feijtel, T. C. J. (2001): The Effect of Compact Formulations on the Environmental Profile of Northern European Granular Laundry Detergents Part I: Environmental Risk Assessment. *Int. J. LCA*, 6, p. 1-10

- Schäfer, T.; Dalboge, H. (1999): Perspectives for Industrial Enzymes – The Key to Sustainable Solutions. In: Heiden, S.; Bock, A.-K.; Antranikian, G. (Hrsg.): Industrielle Nutzung von Biokatalysatoren. Ein Beitrag zur Nachhaltigkeit – 15. Osnabrücker Umweltgespräche, Schriftenreihe Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 14, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, S. 115-157
- Schill+Seilacher (2003a): Wasserwerkstatt Technologie – Innovative Technologien für Leder (WG/03). Produktinformationen der Fa. Schill+Seilacher AG, Böblingen, Powerpointpräsentation, übermittelt am 18.07.2003
- Schill+Seilacher (2003b): Versuchsdokumentation – Interne Dokumentation der Versuche im halbertechnischen Maßstab zum enzymgestützten und enzymfreien Äschern; durchgeführt im Entwicklungslabor der Fa. Schill+Seilacher AG, Böblingen, im Oktober/November 2003
- Schill+Seilacher (2003c): Vertrauliche telefonische Mitteilungen über die Zusammensetzung der Handelsprodukte für den Einsatz beim Weichen und Äschern, Böblingen, im Oktober/November 2003
- Schlegel, H. G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. 7. überarbeitete Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Schlüpen, C. (2003): Untersuchungen zur Bedeutung verschiedener Enzyme des Glycin-Stoffwechsels für die Riboflavin-Bildung in *Ashbya gossypii*. Dissertation. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. www.ub.uni-duesseldorf.de/ebib/diss, 10.05.2004.
- Schmid, R. D. (2002): Taschenatlas der Biotechnologie und Gentechnik. Kapitel: Enzyme zur Leder- und Textilbehandlung, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, S. 96-97
- Schmidt, A. u. Henriksen, J. (1997): Life cycle assessment of Savinase 10 TA+, a detergent enzyme. SETAC-Congress, Amsterdam
- Schmidt, M. u. Schorb, A. (1995): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits
- Schmidt, R. D. (2003): Pocket Guide to Biotechnology and Genetic Engineering. Wiley-VCH, Weinheim
- Schmitz, N. (Hrsg.) (2003): Bioethanol in Deutschland. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Bd. 21, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster
- Schmitz, S.; Oels, H.-J.; Tiedemann, A. (1995): Ökobilanz für Getränkeverpackungen I. UBA-Texte 52/95, Umweltbundesamt Berlin
- Schuller, S. (2001): Seltene Erden als Leistungsförderer beim Geflügel. Untersuchungen an Broilern und Japanischen Wachteln. Dissertation am Institut für Physiologie, Physiologische Chemie und Tierernährung der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität, München
- Schuller, S.; Borger, C.; He, M. L.; Henkelmann, R.; Jadamus, A.; Simon, O.; Rambeck, W. A. (2002): Untersuchungen zur Wirkung Seltener Erden als mögliche Alternative zu Leistungsförderern bei Schweinen und Geflügel. Berliner Münchner Tierärztliche Wochenschrift 115, S. 16-23
- SFK – Störfallkommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002): Leitfaden Schritte zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik. SFK-GS-33. SFK, Bonn
- SFK – Störfallkommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2000): Leitfaden Ermittlung von Betriebsbereichen im Sinne der Störfall-Verordnung 2000 (Anwendung der Additions-/Quotientenregel) des Arbeitskreises Seveso-II-Richtlinie der SFK. Stand Mai 2000. SFK-GS-27. SFK, Bonn

- SFK – Störfallkommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1995): Leitfaden Anlagensicherheit. Stand November 1995. SFK-GS-06. SFK, Bonn
- Shimizu, S. (1996): Vitamins and Related Compounds: Microbial Production. In: Elvers, B. u. Hawkins, S. (ed.): Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Vol. A 27, 5th edition, p. 443ff
- Siebenlist, H. (2004): Persönliche Mitteilung von Dr. Hans Siebenlist, Fa. Chevita GmbH, Pfaffenhofen (Telefonat vom 14. Januar 2004)
- Sijbesma, F. (2003): White Biotechnology: Gateway to a More Sustainable Future. EuropaBio-Präsentation, BioVisions, 10. April 2003, Lyon
- Smulders, E. (2002): Laundry Detergents. Wiley-VCH, Weinheim
- Spök, A. (1998): Enzyme in Wasch- und Reinigungsmitteln. Technikfolgenabschätzung und -bewertung unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung der Gentechnologie. Endbericht. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Band 29/1998, Wien
- SRU – Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1999): Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen. Sondergutachten. Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart
- SRU - Rates von Sachverständigen für Umweltfragen (2002): Umweltgutachten 2002 - Für eine neue Vorreiterrolle. Deutscher Bundestag, Drucksache 14/8792
- Stache, H. u. Großmann H. (1985): Waschmittel – Aufgaben in Hygiene und Umwelt. Springer-Verlag
- Stahmann, K.-P.; Revuelta, J. L.; Seulberger, H. (2000): Three biotechnical processes using *Ashbya gossypii*, *Candida famata* or *Bacillus subtilis* compete with chemical riboflavin production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 53, 509-516
- Stalmans, M.; Berenbold, H.; Berna, J. L.; Cavalli, L.; Dillarstone, A.; Franke, M.; Hirsinger, F.; Janzen, D.; Kosswig, K.; Postlethwaite, D.; Rappert, Th.; Renta, C.; Scharer, D.; Schick, K.-P.; Schul, W.; Thomas, H.; van Sloten, R. (1995): European Life Cycle Inventory for Detergent Surfactants Production. *Tenside Surf. Det.*, 332, 2, p. 84-109
- Statistisches Bundesamt (1995): Arbeitskreis Wasserwirtschaft: Statistik der öffentlichen Abwasserbeseitigung für das Jahr 1991, Statistisches Bundesamt 1995
- Statistisches Bundesamt (2004): Landwirtschaft in Zahlen 2003. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Januar 2004
- StörfallV - Störfall-Verordnung (12. BImSchV) (2000): Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Artikel 1 der Verordnung zur Umsetzung EG-rechtlicher Vorschriften betreffend die Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen). Stand 26.04.2000. BGBl I 2000, 603, 03.05.2000
- StörfallVwV - Störfall-Verwaltungsvorschrift (2003): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Störfall-Verordnung (StörfallVwV) – Entwurf. Stand 10.12.2003. Berlin
- Storhas, W. (2003): Bioverfahrensentwicklung. Wiley-VCH, Weinheim
- Südzucker AG (2004): Grundsteinlegung Südzucker-Bioethanolanlage am 6. Februar 2004. Pressemitteilung
- SUVA – Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (2003): Kennen Sie das Gefahrenpotential im Betrieb? Das Gefahrenportfolio schafft einen Überblick. www.suva.ch, 16.05.2004
- TRAS 410 – Technische Regel für Anlagensicherheit (2000): Erkennen und beherrschen exothermer chemischer Reaktionen. Endfassung vom April 2000

- TRBA 400 - Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe (2001): Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen. Erstellt vom ABAS - Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe. Letzte Änderung vom 01.03.2002. www.baua.de
- TRBA 450 - Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe (2002): Einstufungskriterien für Biologische Arbeitsstoffe. Erstellt vom ABAS - Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe. www.baua.de
- TRBA 460 - Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe (2002): Einstufung von Pilzen in Risikogruppen. Erstellt vom ABAS - Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe. Ausgabe vom Oktober 2002. www.baua.de
- TRBA 466 - Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe (2002): Einstufung von Bakterien in Risikogruppen. Erstellt vom ABAS - Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe. Ausgabe vom Oktober 2002. www.baua.de
- TRGS 200 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2003): Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen, Zubereitungen und Erzeugnissen. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe März 2002 – berichtigt BArbBl. Heft 1/2003. www.baua.de
- TRGS 300 - Technische Regel für Gefahrstoffe (1995): Sicherheitstechnik. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe Januar 1994 mit Änderungen und Ergänzungen Mai 1995. www.baua.de
- TRGS 400 - Technische Regel für Gefahrstoffe (1999): Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen durch Gefahrstoffe am Arbeitsplatz: Anforderungen. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe März 1998 – mit Änderung und Ergänzungen BArbBl. Heft 3/1999. www.baua.de
- TRGS 420 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2003): Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen durch Gefahrstoffe am Arbeitsplatz: Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien (VSK) für die betriebliche Arbeitsbereichsüberwachung. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe September 1999 – zuletzt geändert BArbBl. Heft 1/2003 – berichtigt BArbBl. Heft 2/2003. www.baua.de
- TRGS 440 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2002): Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen durch Gefahrstoffe am Arbeitsplatz: Ermitteln von Gefahrstoffen und Methoden zur Ersatzstoffprüfung. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe März 2001 – zuletzt geändert BArbBl. Heft 3/2002. www.baua.de
- TRGS 540 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2000): Sensibilisierende Stoffe. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe Februar 2000. www.baua.de
- TRGS 614 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2001): Verwendungsbeschränkungen für Azofarbstoffe, die in krebserzeugende aromatische Amine gespalten werden können. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe März 2001. www.baua.de
- TRGS 900 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2003): Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz „Luftgrenzwerte“. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe Oktober 2000 – zuletzt geändert BArbBl. Heft 9/2003. www.baua.de
- TRGS 903 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2002): Biologische Arbeitsplatztoleranzwerte – BAT-Werte. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe April 2001 – zuletzt geändert BArbBl. Heft 10/2002 – berichtigt BArbBl. Heft 1/2003. www.baua.de
- TRGS 905 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2003): Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe März 2001 – zuletzt geändert BArbBl. Heft 9/2003. www.baua.de

- TRGS 907 - Technische Regel für Gefahrstoffe (2002): Verzeichnis sensibilisierender Stoffe. Erstellt vom AGS – Ausschuss für Gefahrstoffe. Ausgabe Oktober 2002. www.baua.de
- Trommer, B.; Kellert, H.-J. (1999): Ökologischer Vergleich verschiedener Gerbarten. Leder & Häute Markt, 6/99, S. 25-36
- Trommer, B.; Kleinwechter, S.; Giersberg, R. (1995): Nachweis der Aktivität von Proteasen in Prozessflotten der Wasserwerkstatt. Das Leder - Fachzeitschrift für die Chemie der Lederherstellung – Mitteilungsblatt des Vereins für Gerberei-Chemie und –Technik e. V. (VGCT), Darmstadt, 9/1995, S. 210-216
- UBA - Umweltbundesamt (1993): Daten zur Umwelt 1992/93
- UBA - Umweltbundesamt (1996): Daten zur Umwelt 1996
- UBA - Umweltbundesamt (2002): Umweltdaten Deutschland 2002
- UBA – Umweltbundesamt (2003): Internet-Präsentation unter <http://www.umweltbundesamt.de>
- UBA – Umweltbundesamt (2004): Fachinformation zum Thema Biologische Sicherheit/ Gentechnik – Bewertung gentechnisch veränderter Organismen. www.umweltbundesamt.de
- UBA - Umweltbundesamt (2004): Umweltdaten Deutschland Online, <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/dispatcher?event=WELCOME&redirect=event%3DCATALOGUE%26catalogueId%3D0%26termId%3D2374m>, download Juli 2004
- UBA – Umweltbundesamt (2004): Veröffentlicht unter <http://www.umweltbundesamt.de>
- UGR – Umweltökonomische Gesamtrechnung (2003): Umweltnutzung und Wirtschaft – Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2003. Statistisches Bundesamt. Download von <http://www.destatis.de>
- UK-CC - UK Competition-Commission (2001): BASF AG and Takeda Chemical Industries Ltd: A report on the acquisition by BASF AG of certain assets of Takeda Chemical Industries Ltd
- UNEP - United Nations Environment Programme (1991): Tanneries and the environment. A technical guide to reducing the environmental impact of tannery operations. UNEP/IEO - United Nations Environment Programme / Industry and Environment Office, Paris, Technical Report Series N. 4
- UNEP - United Nations Environment Programme (2002): Global Environment Outlook 3 - Past, present and future perspectives. Earthscan Publications Ltd., London
- Upadeck, H. u. Kottwitz, B. (1996): Umweltaspekte bei Waschmittel-Enzymen. Vortragsmanuskript, GDCh "Umwelt & Chemie"
- US-DOE - U.S. Department of Energy (1998): Plant/Crop-based Renewable Resources 2020 - A Vision to Enhance U.S. Economic Security through Renewable Plant/Crop-based Resource use. <http://www.oit.doe.gov/agriculture/>
- US-DOE - U.S. Department of Energy (2001): The Technology Roadmap for Plant/Crop-based Renewable Resources 2020 – Research Priorities for Fulfilling a Vision to Enhance U.S. Economic Security through Renewable Plant/Crop-based Resource use. <http://www.oit.doe.gov/agriculture/>
- US-DOE - U.S. Department of Energy (2003): Industrial Bioproducts: Today and Tomorrow. Report prepared by Energetics Incorporated, Columbia, Maryland for the DOE, Washington
- US-NRC – National Research Council (2000): Biobased Industrial Products. Priorities for research and Commercialization. National Academy of Sciences, Washington

- Van Ee, H.; Missel, O.; Baas, E. J. (1997): Enzymes in Detergency. Surfactant Science Series, Bd. 69, Marcel Dekker Inc.
- Van Hoek, H.; Aristidou, A.; Hahn, J. J.; Patist, A. (2003): Fermentation goes large-scale. CEP, 1, p. p. 37S-42S
- VCI – Verband der chemischen Industrie e. V. (1998): Konzept für die Zusammenlagerung von Chemikalien - Leitfaden. Stand Juli 1998. www.vci.de , 10.05.2004
- VCI – Verband der chemischen Industrie e. V. (2004): Expositions-kategorien: Mensch und Umwelt gezielt schützen. Ein Konzept für die sichere Anwendung chemischer Stoffe durch Charakterisierung und Kommunikation ihrer Risiken zur Umsetzung von REACH - vorgeschlagen von der chemischen Industrie. www.vci.de, 25.05.2004
- VCI – Verband der Chemischen Industrie e. V. (2003a): Chemiewirtschaft in Zahlen. Ausgabe 2003
- VCI – Verband der Chemischen Industrie e. V. (2003b): Responsible Care-Bericht. Ausgabe 2003
- Vogt, R.; Knappe, F.; Giegrich, J.; Detzel, A. (2002): Ökobilanz Bioabfallverwertung, Untersuchung zur Umweltverträglichkeit von Systemen zur Verwertung von biologisch-organischen Abfällen, Initiativen zum Umweltschutz Band 52, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Vorlop, K.-D. u. Wilke, T. (2003): Industrielle Biokonversion nachwachsender Rohstoffe als Alternative zu klassischen chemischen Verfahren. In: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie – 8. Symposium 2003. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Heft 22, S. 55-79
- VwVwS – Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (1999): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen. Stand 17.05.1999. Bundesanzeiger, 29.05.1999, Jg. 51, Nr. 98a
- Wagner, G. (1993): Waschmittel - Chemie und Ökologie. 1. Aufl., Ernst Klett Schulbuchverlag: Stuttgart
- WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1999): Welt im Wandel - Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998, Springer, Berlin
- WCED – World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future. Oxford University Press
- Wiemer, K.; Kern, M.; Mayer, M. (1996): Leitfaden Bioabfallvergärung. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.), Schriftenreihe Luft, Boden, Abfall, Heft 45, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart
- Wilke, D. (1999): Chemicals from biotechnology: molecular plant genetics will challenge the chemical and the fermentation industry. Applied Microbiology and Biotechnology, 52, 2, p. 135-145
- Wittlinger, R. (2002): Ökoeffizienz-Analyse zur Ledergerbung. Leder- und Häutemarkt, 5/2002, S. 31-40
- Wollweber, H. (1989): Hypnotics. In: Elvers, B.; Hawkins, S.; Ravenscroft, M.; Schulz, G. (Ed.): Ullmann's Encyclopdia of Industrial Chemistry. Vol. A13 – High Performance Fibers to Imidazole and Derivatives. VCH, Weinheim. S. 533 – 561

- Wubbolts, M. (2002): Integration of Chemical and Biotechnological Disciplines for Improvement of Industrial Processes. Conference "The Role of Biotechnology in Industrial Sustainable Development", 16-17 May 2002, Antwerpen, Belgien
- Würdinger et al. (2003): Würdinger, E.; Roth, U.; Reinhardt, G.A.; Detzel, A.; Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol: spezifische Ergebnisse und allgemeine Hinweise für eine nachhaltige Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Kunststoffbereich. In: Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie, 8. Symposium 2003, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 22 (2003) in Tübingen, Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, März 2003
- Würdinger, E.; Roth, U.; Wegener, A.; Peche, R.; Rommel, W.; Kreibe, S.; Nikolakis, A.; Rüdener, I.; Pürschel, C.; Ballarin, P.; Knebel, T.; Borken, J.; Detzel, A.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Möhler, S.; Patyk, A.; Reinhardt, G. A.; Vogt, R.; Mühlberger, D.; Wante, J. (2002): Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Vergleichende Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol. Endbericht zum Vorhaben Az. 04763 im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Textfassung unter: <http://www.bifa.de>
- Young, A. L. (2003): Biotechnology for Food, Energy, and Industrial Products – New Opportunities for Bio-based Products. Environ. Sci. Pollut. Res., 10, 5, p. 273-276
- Young, A. L. (2004): The Future Biotechnology in Support of Bio-based Industries – The US Perspective. Environ. Sci. Pollut. Res., 11, 2, p. 71-72
- Yu Zongsun u. Chen Minbo (1995): Rare Earth Elements and their Applications. Metallurgical Industry Press, Beijing 1995, Processing of mixed ore of bastnasite and monazite, p. 44-57
- Zehentmayer, M. (2004): Persönliche Mitteilung zum Stand der Zulassung des Handelsproduktes Lancer®. Email vom 5. April 2004, Fa. Zehentmayer AG, Brühl 8, CH-9305 Berg, SG
- Zissel, A. (1988): Arbeiten der Wasserwerkstatt bei der Lederherstellung. In: H. Herfeld (Hrsg.): Bibliothek des Leders. Bd. 2, Umschau Verlag, Frankfurt a. M.

10 Anhang

Die umfangreichen Anhänge befinden sich in Dateiform auf der beiliegenden CD.