

Entlastungseffekte für die Umwelt durch Enzymeinsatz in Vollwaschmitteln

- Ergebnisse eines Produktvergleiches -

Udo Roth, Dr. Klaus Hoppenheidt, Sarah Hottenroth, Rene Peche

Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und –technik – BIfA GmbH

Am Mittleren Moos 46, D-86167 Augsburg

Vorbemerkungen

Der Tagungsbeitrag von Hoppenheidt et al. (2004a) hat in knapper Form die Aufgabenstellung, die methodische Vorgehensweise sowie ausgewählte Ergebnisse einer umfassenden Studie vorgestellt (Hoppenheidt et al. 2004b)*.

In diesem Beitrag werden Teilergebnisse dieser Studie vorgestellt. Am Beispiel von Pulverwaschmitteln wurde ein sogenannter Produktvergleich durchgeführt, mit dem überprüft wurde, in wieweit Entlastungseffekte für die Umwelt erzielt werden können, wenn traditionelle Waschmittelrezepturen durch moderne enzymhaltige Waschmittel substituiert werden.

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).

Im Verlauf der Entwicklung der Pulverwaschmittel wurde deren Effektivität laufend verbessert. In den letzten 50 Jahren ist der Bedarf an Waschpulver für einen Waschgang

* Diese Studie wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplanes – Förderkennzeichen 202 66 326 erstellt und mit Bundesmitteln finanziert.

von 409 g im Jahr 1953 auf 109 g gesunken. Neben den Waschmittelrezepturen haben sich in den letzten 50 Jahren auch die Waschmaschinen beständig fortentwickelt. Standardisierte Anwendungsprüfungen für Waschmaschinen (und Waschmittel) beschreibt eine aktuelle DIN-Norm (DIN - 60456, 2003).

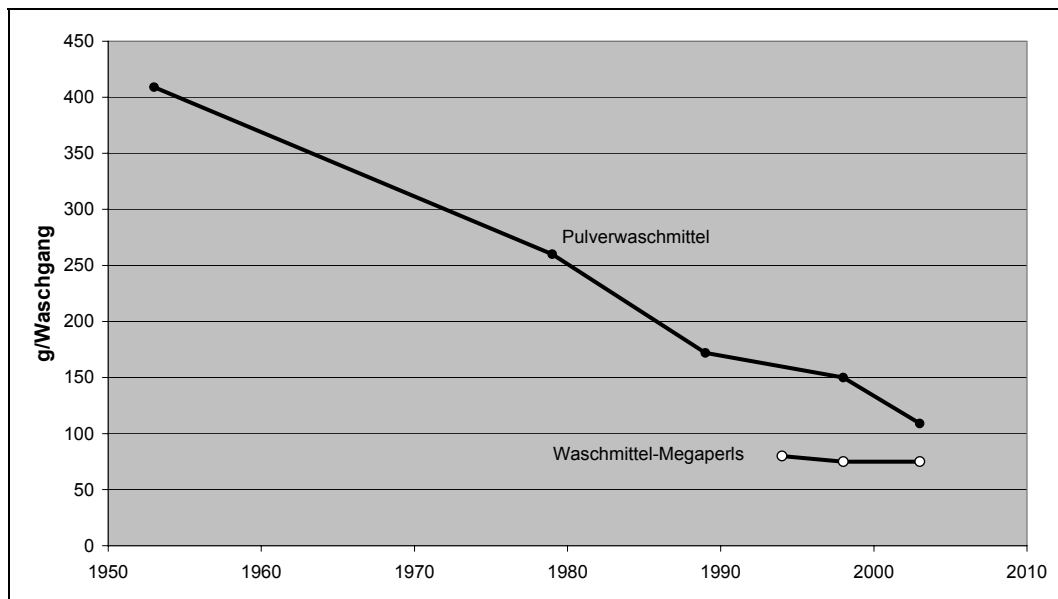


Abbildung 1: Veränderung der Waschmitteleinsatzmenge pro Waschgang am Beispiel des Produktes Persil als Pulver bzw. als Megaperls (Daten: Henkel)

Bedeutung von Waschmittelenzymen

Der rasante Anstieg enzymhaltiger Waschmittelformulierungen wurde 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). 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).

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.

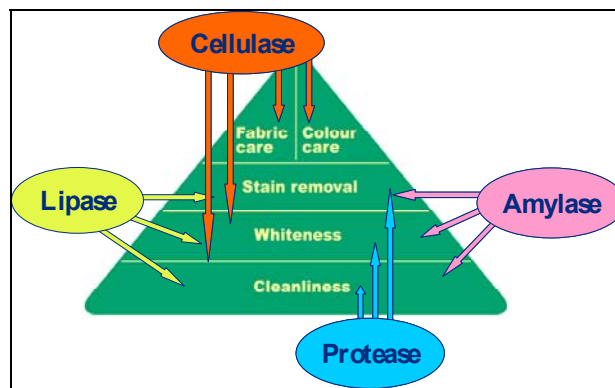


Abbildung 2: Wirkungsfelder von Waschmittelenzymen (Novozymes, 2002)

Die positiven Beiträge von Enzymen zur Waschleistung von Waschmitteln erfordern jedoch die Einhaltung für Enzyme günstiger Rahmenbedingungen. 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. Durch die Absenkung der Waschttemperaturen lässt sich zudem ein Großteil der Energie für die Wäsche einsparen.

Umweltrelevanz der Textilwäsche

Auswertungen der führenden europäischen Waschmittelhersteller haben gezeigt, dass vor allem die Herstellung der Waschmittelrohstoffe und die Anwendung der Waschmittel umweltrelevant sind (Abbildung 3).

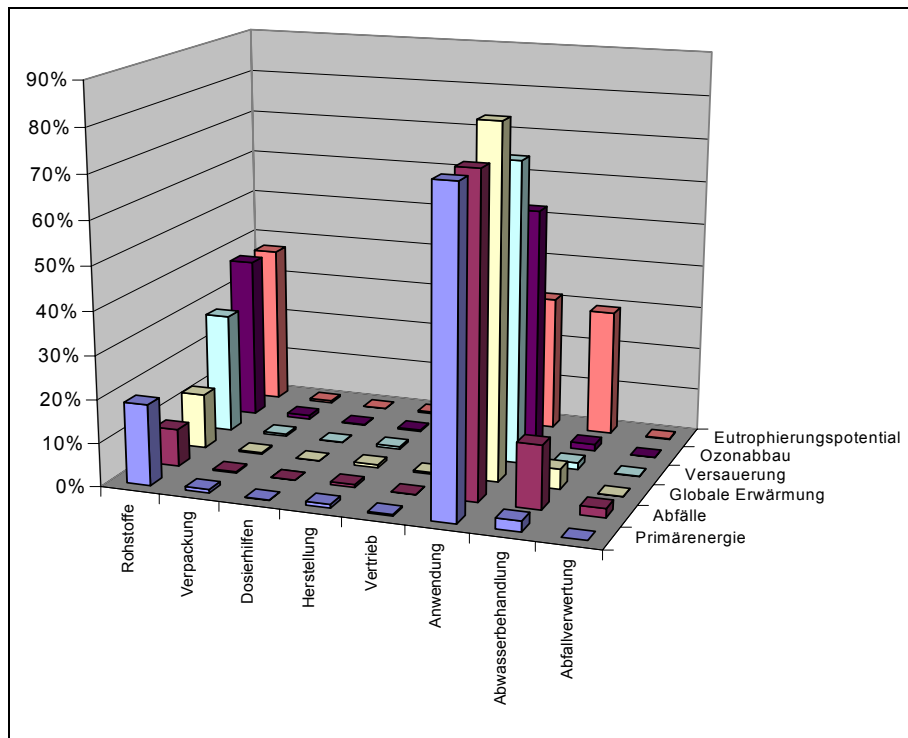


Abbildung 3: Anteilige Verteilung der Umweltbelastungen eines Waschgangs in Deutschland mit einem Kompaktwaschmittel im Jahr 1998 (Daten: AISE, 2001b)

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 4 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.

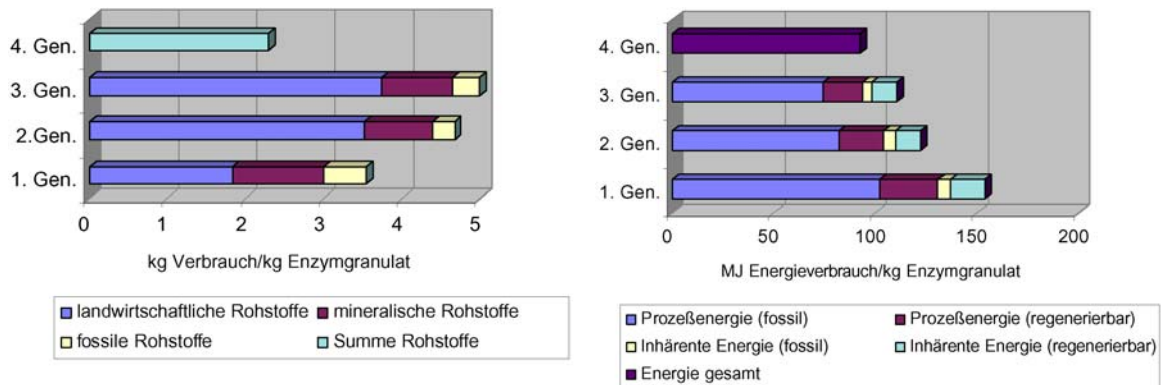


Abbildung 4: Ressourcennutzung und Energieeinsatz für die Herstellung von Proteasegranulaten sowie Änderung dieser Parameter während der Prozessentwicklung (1. – 4. Generation); nach Daten von Cognis; zitiert aus Spök (1998)

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. Vor allem aber tragen sie Wascheigenschaften zur Rezeptur bei, die auf andere Weise nicht erreichbar wären (z.B. Faserglättung durch Cellulasen).

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).

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 aktuel-

len Waschmitteln nicht frei verfügbar, sondern allenfalls den Waschmittelherstellern bekannt. 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 1 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.

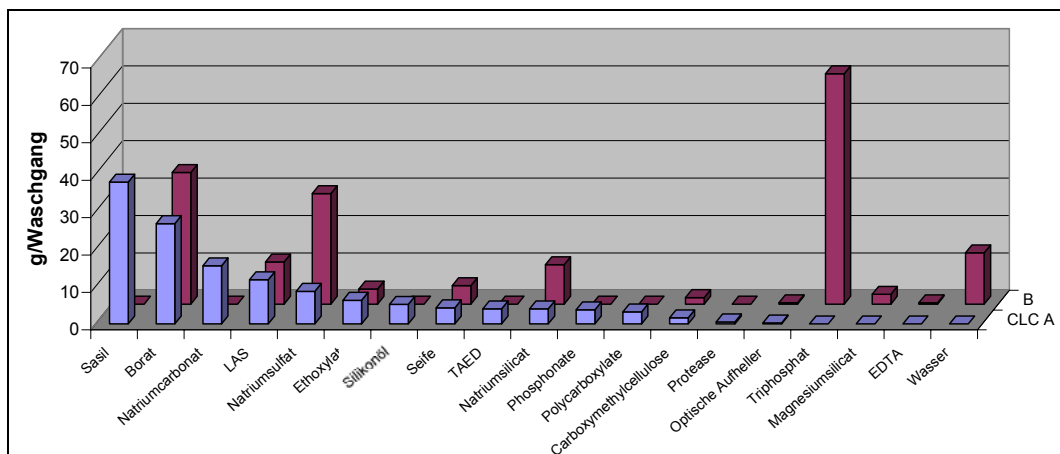


Abbildung 5: Mengen an Waschmittelbestandteilen pro Waschgang für die Referenzwaschmittel CLC A und B

Für den Produktvergleich wurden die Referenzwaschmittel CLC A und B herangezogen. Zu diesem Wandel der Waschmittelrezepturen haben Waschmittelenzyme beige-

tragen. 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 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.

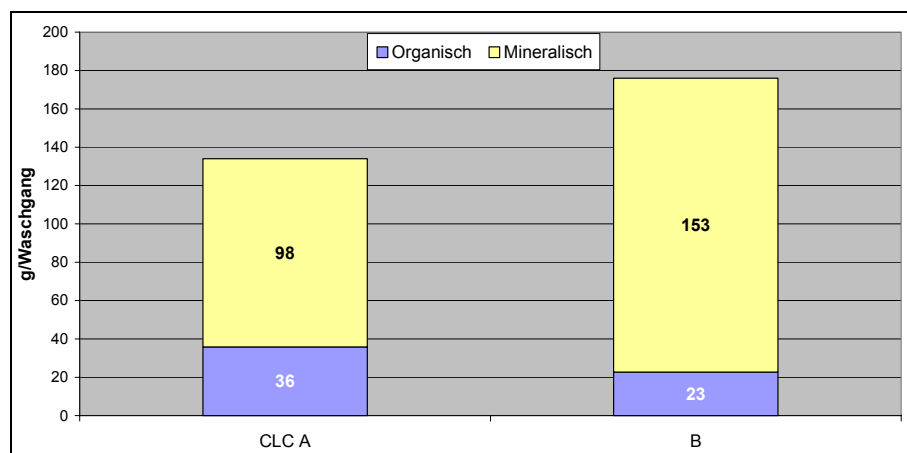


Abbildung 6: Einsatz organischer und mineralischer Waschmittelbestandteile pro Waschgang für die Referenzwaschmittel CLC A und B

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.

Vorstellung der Szenarien des Produktvergleichs

Für den Produktvergleich wurden - aus den oben beschriebenen Gründen - zwei Szenarien definiert, in denen je ein Waschvorgang mit einem enzymfreien (traditionellen) und einem enzymhaltigen (modernem) Waschmittel modelliert wurden.

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 dar-

über 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.

Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wurde **ein Waschgang** betrachtet. Die Füllmenge an Schmutzwäsche betrug 5 kg Weißwäsche aus Baumwolle. Es wurde davon ausgegangen, dass eine funktionelle Äquivalenz der betrachteten Szenarien hinsichtlich der Waschleistung besteht.

Modellspezifische Anmerkungen zur Systemgrenze

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 mitbetrachtet, da die zu vergleichenden Waschmittel aufgrund ihrer unterschiedlichen Inhaltsstoffe verschiedene Waschprogramme bedingen und zu abweichenden Abwasserzusammensetzungen führen. Der Bezugsraum für Rohstoffdaten ist meistens Westeuropa. 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.

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

Die Zusammensetzungen der modellierten Waschmittel sind in Tabelle 1 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.

Tabelle 1: 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 (TAED, 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

In Abbildung 7 sind die wichtigsten Ausgangsdaten (Stoff- und Energieflüsse) für den Waschprozess dargestellt. 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.

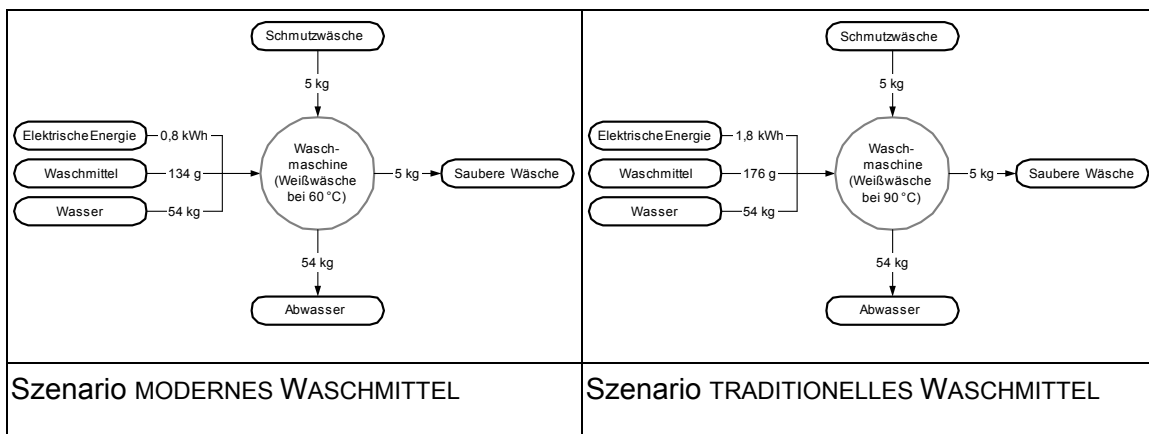


Abbildung 7: In-/Outputdiagramm mit den erhobenen Ausgangsdaten für den Waschprozess der Szenarien

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 das Pentanatriumtriphosphat vollständig ins Abwasser gelangt.

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. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Schmutzwäsche einen ähnlichen Teil am CSB und BSB beiträgt, wie die Waschmittel. In Tabelle 2 sind die so berechneten Abwasserparameter im Einlauf der Kläranlage aufgelistet.

Tabelle 2: 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 ebenfalls in Tabelle 2 aufgelistet.

Detaildarstellung ausgewählter Bilanzierungsergebnisse

Insgesamt wurden im Rahmen der Wirkungsabschätzung der ökobilanziellen Untersuchung sechs sogenannte Wirkungskategorien sowie weitere human- und ökotoxische Einzelparameter ausgewertet. Beispielhaft werden nachfolgend Detailauswertungen für die Wirkungskategorien Treibhauseffekt und aquatisches Eutrophierungspotential vorgestellt.

Treibhauseffekt

Abbildung 8 zeigt, dass im Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL etwa doppelt so viele treibhausrelevante Emissionen entstehen als im Szenario MODERNES WASCHMITTEL. 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.

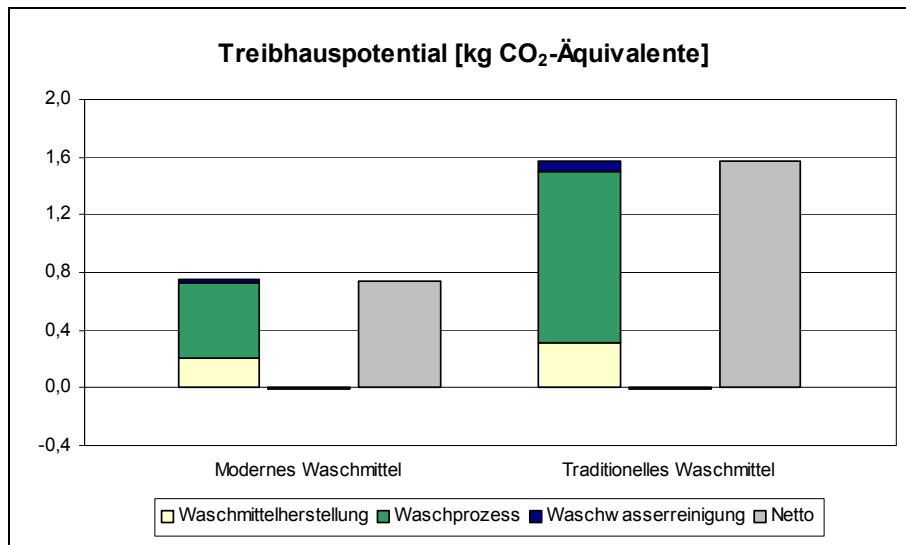


Abbildung 8: Treibhauspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

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 3: 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 ²²⁾	0,056 kg CO ₂ -Äqu.	7 %
TAED (Tetra-Azethyl-Ethylen-Diamin) ²²⁾	0,029 kg CO ₂ -Äqu.	4 %
Natrium-Perborattetrahydrat ²²⁾	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

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 8).

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.

Aquatische Eutrophierung

Abbildung 9 zeigt, dass das aquatische Eutrophierungspotential beim Szenario TRADITIONELLES WASCHMITTEL um ein Vielfaches größer ist, als beim Szenario MODERNES WASCHMITTEL.

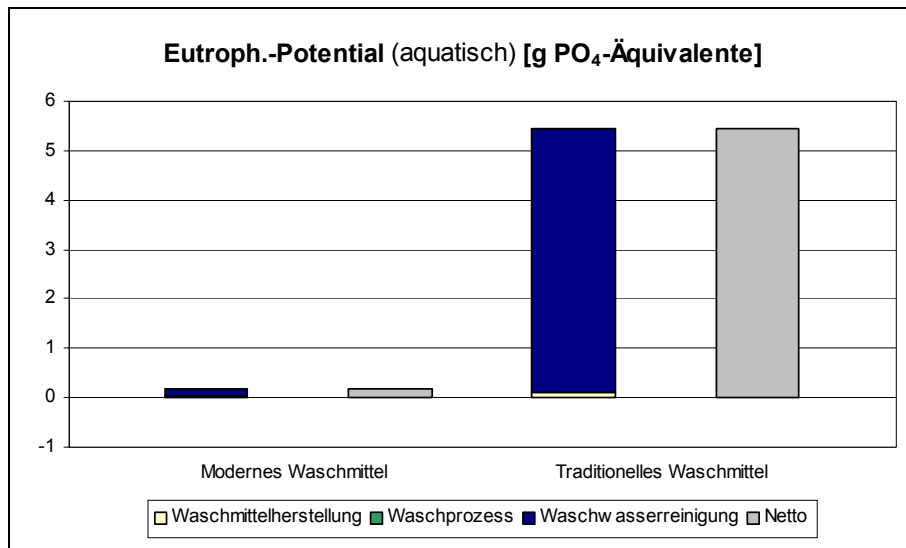


Abbildung 9: Aquatisches Eutrophierungspotential - Vergleich der Szenarien bezogen auf die funktionelle Einheit

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 4: 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

Die Brutto- und Netto-Ergebnisse beider Szenarien sind fast identisch, da nur sehr geringe Gutschriften anfallen (vgl. Abbildung 9).

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.

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.

Kurzdarstellung sämtlicher Bilanzierungsergebnisse

Sämtliche Ergebnisse der durchgeführten Wirkungsabschätzung für den Vergleich enzymfreier und enzymhaltiger Waschmittel durch die Szenarien MODERNES WASCHMITTEL und TRADITIONELLES WASCHMITTEL sind in Tabelle 5 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 Kohlenwasserstoffe (W) waren die Unterschiede der Daten sehr gering.

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.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

		Modernes Wasch mittel	Traditionel- les Wasch mittel	Modernes Wasch mittel	Traditionel- les Wasch mittel	Differenz (Mod. - Trad.)
	Einheit			10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW
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

Literatur

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
- 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
- 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
- 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
- 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
- EUROPABIO (2002): Cleaner detergents. White biotech fact sheet "Enzymes and detergents". <http://www.europabio.org>
- Franke, M.; Klüppel, H.; Kirchert, K.; Olschewski, P. (1995): Ökobilanzierung - Sachbilanz für die Waschmittel-Konfektionierung. Tenside Surf. Det., 32, 6, S. 508-514
- Grieshammer, R.; Bunke, D.; Gensch, C.-O. (1997): Produktlinienanalyse Waschen und Waschmittel. Schriftenreihe Texte des Umweltbundesamtes, 1/97, Berlin
- Hoppenheidt et al. (2004a): Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische – vergleichende Analyse. Ausgewählte Ergebnisse aus Hoppenheidt et al. (2004b).
- Hoppenheidt et al. (2004b): Entlastungseffekte für die Umwelt durch die Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnologische Verfahren, Schlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 202 66 326, Augsburg, Juli 2004.
- IKW - Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V. (2004): Internetpräsentation der Marktdaten zu Waschmitteln. <http://www.ikw.org>
- 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
- Lehmann, H. J. (1973): Moderne Waschmittel. Chemie in unserer Zeit , Nr. 3, S. 82-89
- Manneck, H. (1956): Herstellung und Zusammensetzung pulverförmiger Wasch-, Reinigungs- und Spülmittel

- 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
- 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>
- Saouter, 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
- Saouter, 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
- Saouter, 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
- Schmidt, A. u. Henriksen, J. (1997): Life cycle assessment of Savinase 10 TA+, a detergent enzyme. SETAC-Congress, Amsterdam
- Schmidt, R. D. (2003): Pocket Guide to Biotechnology and Genetic Engineering. Wiley-VCH, Weinheim
- 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
- Stache, H. u. Großmann H. (1985): Waschmittel – Aufgaben in Hygiene und Umwelt. Springer-Verlag
- 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
- UBA – Umweltbundesamt (2003): Internet-Präsentation unter <http://www.umweltbundesamt.de>
- Van Ee, H.; Missel, O.; Baas, E. J. (1997): Enzymes in Detergency. Surfactant Science Series, Bd. 69, Marcel Dekker Inc.