

## **Kurzfassung zum Projektbericht**

### Energetische Verwertung heizwertreicher Abfälle in bayerischen Müllverbrennungsanlagen: Beurteilung der Energie-, Abfall- und Emissionsbilanz

erarbeitet im Auftrag des Bayerischen  
Landesamtes für Umweltschutz, Augsburg

finanziert durch das Bayerische  
Staatsministerium für Landesentwicklung und  
Umweltfragen, München

Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und  
Verpackung IVV, Freising  
Dipl.-Ing. Till Nürrenbach  
Dr. rer. nat. Michael Menner

Technische Universität München,  
Lehrstuhl für Wassergüte- und Abfallwirtschaft,  
Garching  
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich  
Dr. rer. silv. Gabriele Weber-Blaschke  
Dipl.-Ing. Florian Ramsl

Freising und Garching  
Dezember 2001

Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung  
Giggenhauser Straße 35  
85354 Freising  
Telefon 08161 491 – 0  
Telefax 08161 491-491

Lehrstuhl für Wassergüte- und Abfallwirtschaft  
Technische Universität München  
Am Coulombwall  
85748 Garching  
Telefon 089-289-1 37 00  
Telefax 089-289-1 37 18  
E-mail [wga@bv.tum.de](mailto:wga@bv.tum.de)

## Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund der Studie	4
2	Ziel und Umfang der Untersuchung	5
3	Datenerhebung und Analyse der bayerischen thermischen Abfallbehandlungsanlagen und deren Einbindung in die regionale Infrastruktur	7
4	Mengenanalyse für Restabfall und Mischkunststoffe aus Haushaltssammlungen	15
5	Ökologische und ökonomische Beurteilung	18
6	Resümee	30

## 1 Hintergrund der Studie

Kunststoff-Verpackungsabfälle aus DSD-Sammlungen sind nach der Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (VerpackV) entweder werkstofflich oder rohstofflich zu verwerten. Über die Mindestquote für die stoffliche Verwertung (60 %) hinausgehende Mengen können auch energetisch verwertet werden.

Die Verbrennung von unter die Mindestverwertungsquote fallenden Verpackungsabfallmengen aus DSD-Sammlungen (speziell der Mischkunststofffraktion) zusammen mit dem Hausmüll in Müllverbrennungsanlagen (MVA) wird als alternative Verwertungsoption viel diskutiert. Der Umweltrat empfiehlt im Umweltgutachten 2000, die getrennte Erfassung und (stoffliche) Verwertung von Kunststoffverpackungen auf großvolumige Hohlkörper und Folien zu begrenzen. Kleinteilige Kunststoffverpackungen sollten im Rahmen der Restabfallentsorgung erfasst und in MVA energetisch verwertet werden.

Bei bisher durchgeführten Untersuchungen zur energetischen Verwertung der Mischkunststofffraktion in MVA wurden Einzelanlagen oder der BRD-Durchschnitt betrachtet. Sie zeigten, dass der ökologische Nutzen der Verwertung in MVA entscheidend davon abhängig ist, welcher Anteil der erzeugten Energie aufgrund der Standortbedingungen vermarktet werden kann. Das betrifft v.a. die Wärmenutzung. Im Vergleich zu rohstofflichen Verwertungsverfahren zeigte sich, dass bei einem hohen energetischen Gesamtnutzungsgrad die Müllverbrennung energetisch gleichwertig mit den besten rohstofflichen Verfahren einzustufen ist.

Die ökologische Bewertung der Verbrennung von Kunststoff-Verpackungsabfällen in Müllverbrennungsanlagen hängt also sehr stark von der jeweiligen Anlagenkonfiguration, von der regionalen Entsorgungsstruktur und von der regionalen Struktur des Energiemarktes der Einzelanlage ab.

Eine speziell auf die Situation in Bayern bezogene Studie zur Analyse dieser Parameter und zur ökologischen Bewertung der energetischen Verwertung in MVA ist bisher nicht erarbeitet worden.

## 2 Ziel und Umfang der Untersuchung

Mit der vorliegenden Untersuchung soll eine für die Situation in Bayern spezifische Betrachtung zur Entsorgung der Mischkunststofffraktion aus gebrauchten Kunststoffverpackungen vorgenommen werden. Die bayerischen Randbedingungen sollen ermittelt und berücksichtigt werden, v.a. hinsichtlich der Abfallströme, Energienutzungsgrade und Anlagenkonfigurationen der MVA sowie der Transportentfernungen.

**Ziel** der Untersuchung war es, für **Mischkunststoffe** die **Verbrennung** in den bayerischen MVA mit der **rohstofflichen Verwertung und der Verwertung nach Status quo** (Mix aus roh- und werkstofflicher Verwertung) zu **vergleichen**.

Die Verwertungsoptionen wurden dazu **ökologisch und ökonomisch untersucht und** beurteilt.

In der Untersuchung wurden für die in Bayern im Jahr 1999 gültigen Randbedingungen

- die Reduzierungseffekte bei Ressourcenverbrauch, Emissionen und Abfallaufkommen quantifiziert, die durch die Verwertung von Mischkunststoffen aus DSD-Sammlungen in den bayerischen Müllverbrennungsanlagen ausgelöst würden,
- die Reduzierungseffekte mit analogen Werten zu den stofflichen Verwertungsverfahren verglichen,
- die Kosten der energetischen Verwertung von Kunststoff-Verpackungsabfällen in MVA auf der Basis von (Markt)-Preisen der entsprechenden Logistik- und Entsorgungsleistungen in Bayern analysiert,
- die Kosten für die stoffliche Verwertung der Mischkunststoffe im Status quo aus den Lizenzgebühren des DSD quantifiziert,
- das Kosten-Nutzen-Verhältnis der jeweiligen Verwertungsmaßnahme durch Vergleich der ermittelten Umweltlastenreduktionen in Relation zu den Kosten für die energetische Verwertung der Mischkunststoffe in bayerischen MVA und für die stofflichen Verwertungsverfahren dargestellt.

Die Ermittlung der ökologischen Effekte für die Behandlung in den MVA fand anhand ausgewählter Anlagen statt, die stellvertretend für die Gesamtheit der bayerischen MVA untersucht wurden. Dazu

wurden die bayerischen MVA nach sinnvollen Kriterien in "Clustern" gruppiert und für jeden Cluster eine repräsentative Anlagen ausgewählt.

### **Aufbau der Untersuchung**

Als Grundlage für die Clusterbildung sowie für die ökologische und ökonomische Beurteilung waren spezifische Daten der betrachteten Verwertungsoptionen und Prozesse sowie der relevanten Abfallmengen notwendig.

Diese Daten wurden in einer Fragebogenaktion bei den einzelnen MVA sowie aus aktuellen Statistiken und Literaturstellen gewonnen.

Die Untersuchung war in drei große Arbeitspunkte unterteilt:

- Datenerhebung und Analyse der bayerischen thermischen Abfallbehandlungsanlagen und deren Einbindung in die regionale Infrastruktur.  
Hier wurden grundlegende Daten zur Anlagenkonfiguration der MVA und zu ihrer Einbindung in die Entsorgungsstruktur sowie in die Energieversorgung erhoben. Die Daten wurden in den folgenden Arbeitspunkten weiterverarbeitet.
- Mengenanalyse für Restabfall und Mischkunststoffe aus Haushaltssammlungen.  
In diesem Arbeitspunkt wurden die für Bayern relevanten Abfallmengen sowie Transportentfernungen ermittelt. Diese Angaben gingen in die ökologische und ökonomische Beurteilung ein.
- Ökologische und ökonomische Beurteilung.  
Die betrachteten Verwertungsoptionen wurden auf der Basis der in den vorangegangenen Schritte erhobenen Daten beurteilt. Für die ökologische Beurteilung wurden Untersuchungen vom Typ "Ökobilanzen" (in Anlehnung<sup>1</sup> an DIN ISO 14040 ff) durchgeführt.

---

<sup>1</sup> Entsprechend Auftrag ohne Norm-Konformität hinsichtlich einer Außendarstellung, d.h. ohne Critical Review

### 3 Datenerhebung und Analyse der bayerischen thermischen Abfallbehandlungsanlagen und deren Einbindung in die regionale Infrastruktur

Untersuchungsgegenstand waren die 15 bayerischen Müllverbrennungsanlagen und die MVA Ulm (weil dort auch bayerische Abfälle verbrannt werden). Sie wurden hinsichtlich einer möglichen energetischen Verwertung der DSD-Mischkunststofffraktion untersucht.

Hierzu wurden jeweils die Anlagenkonfiguration sowie die Einbindung in die regionale Infrastruktur erfasst. Die erforderlichen Daten wurden mit Hilfe eines Fragebogens, Vorortbegehung der Anlagen und durch Gespräche mit den Betreibern erhoben. Alle Anlagenbetreiber haben Daten zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspunkts bildeten die Grundlage für den ökologischen und ökonomischen Vergleich zwischen der energetischen Verwertung in den bayerischen MVA und den rohstofflichen bzw. Status-quo-Verwertungsverfahren (Kapitel 5).

Auf Grundlage der erhobenen Daten wurde eine Beschreibung und Darstellung jeder einzelnen Anlage erstellt incl. der jeweiligen Stoff- und Energieströme und relevanten Prozessparameter. Diese sind Ausgangswerte für die ökologische Beurteilung.

Eine wichtige Frage war, ob die **Kapazitäten** der bayerischen Müllverbrennungsanlagen ausreichen würden, um die jährlich in Bayern anfallende Menge an DSD-Mischkunststoffen zu verbrennen. Dazu wurde auch die **Auslastung** der Anlagen ermittelt.

Die Kapazität der einzelnen Anlagen reicht von 45.000 Mg/a in Landshut bis 700.000 Mg/a in München-Nord (Abb. 3.1).

Die installierte MVA-Kapazität in Bayern (mit MVA Ulm) beträgt 2.988.500 Mg/a. Im Jahr 1999 wurden 2.756.607 Mg Restabfall und Abfälle zur energetischen Verwertung verbrannt. Die Anlagen waren 1999 somit im Durchschnitt mengenmäßig zu 92,2% ausgelastet. Die geringste Auslastung beträgt dabei 81,3%, die höchste 109,4 % (Abb. 3.2).

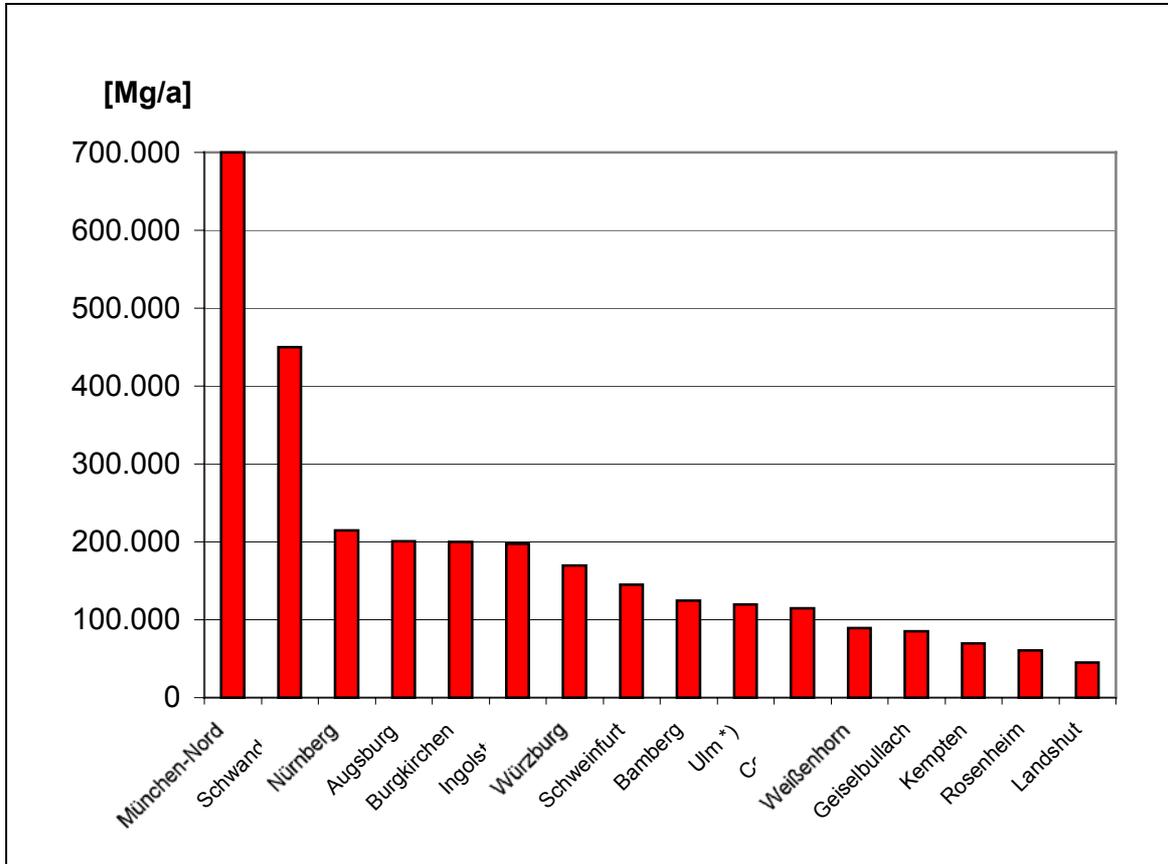


Abb. 3.1: Auslegungs-Kapazität der bayerischen MVA (1999)

Neben der Abfallmengen-Auslastung ist auch die energetische Auslastung zu berücksichtigen. Sie errechnet sich als Verhältnis von tatsächlicher Energiemenge zur Auslegungs-Energiemenge. Die tatsächliche energetische Auslastung kann bei hoher Verfügbarkeit (Betriebsstunden) und „Kessel-Überlast“ auch über dem Auslegungswert (100%) liegen.

Im Durchschnitt waren die Anlagen im Jahr 1999 energetisch zu 93,6% ausgelastet. Die energetische Auslastung reichte bei den einzelnen Anlagen von 82,9% bis 115,6% Abb. 3.2).

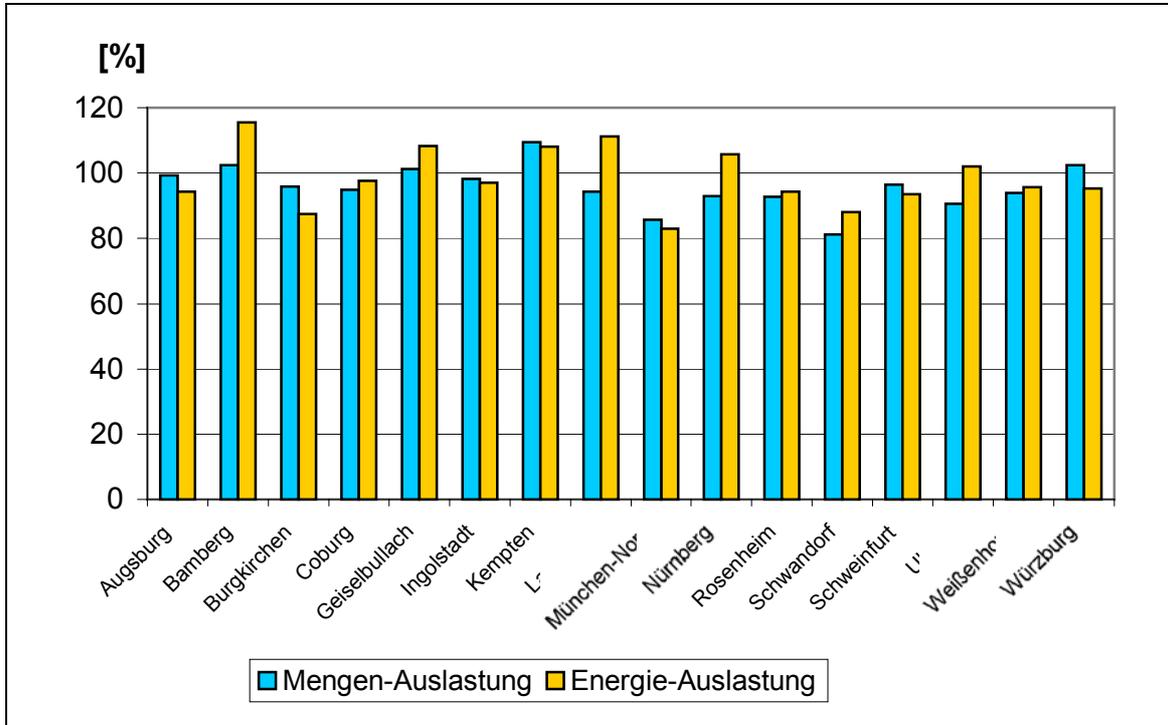


Abb. 3.2: Auslastung der bayerischen Müllverbrennungsanlagen (1999)

Energetisch betrachtet bleibt für die Gesamtheit der bayerischen Anlagen zwischen Auslegungs- und Betriebswert eine Differenz von 540.927 MWh/a (1.947.337 GJ/a). Bei einem Heizwert von 30.000 MJ/Mg für Mischkunststoffe entspricht dies der Energie aus 64.900 Mg Kunststoff.

Die anfallende Menge an Misch-Kunststoff aus der DSD-Sammlung in Bayern (ca. 60.000 Mg/a, vgl. Kapitel 4) könnte also verbrannt werden.

Durch den hohen Heizwert der Kunststoffe würde der mittlere Heizwert des Abfalls von etwa 10.400 MJ/Mg um 4% auf etwa 10.800 MJ/Mg ansteigen.

Zur Beurteilung der Auslastung (s.o.) und für die Ermittlungen der ökologisch relevanten Größen wurden die Betriebsstunden und Verbrennungsparameter der einzelnen Verbrennungslinien erfasst.

Die meisten Anlagen fahren ihre Verbrennungslinien im Dauerbetrieb und schalten diese nur für nötige Revisionen oder bei Betriebsstörungen ab.

Die Linien waren 1999 im Mittel 7.159 Stunden in Betrieb. Dies entspricht einer Verfügbarkeit von 81,7%.

Der Luftüberschuss in der Verbrennung beträgt im Mittel  $\lambda = 1,68$ .

In den Kesseln wird die Wärme aus der Feuerung genutzt und Hochdruckdampf erzeugt. Als wichtige technische Daten wurden die Mengen des erzeugten Dampfes sowie die Dampfparameter Druck und Temperatur erhoben. Der oft genutzte Kompromiss zwischen Betriebsicherheit und Wirkungsgrad lag bei 400 °C Temperatur und 40 bar Druck. Zehn der 16 Anlagen arbeiten mit Parametern in dieser Größenordnung. Über allen Anlagen liegen die Parameter im Bereich von 20 bis 80 bar Druck und 225 bis 450 °C Temperatur.

Mit der in den Kesseln gewonnenen Energie decken die Anlagen nicht nur ihren Eigenbedarf, sondern koppeln auch Strom, Fernwärme und Prozessdampf aus (Abb. 3.3). Die Energieaukopplung ist ein wichtiger Punkt für die ökologische Beurteilung der MVA.

In drei der 16 Anlagen (Geiselbullach, Landshut und Weißenhorn) findet eine reine Stromauskopplung statt. In diesen relativ kleinen Anlagen wurden nur 8% der gesamten Abfallmenge verbrannt. Eine Anlage (Nürnberg) erzeugt nur Prozessdampf. In 9 MVA, in denen 63% der Abfälle verbrannt wurden, findet neben der Strom- auch eine Fernwärmeabgabe statt. Drei dieser letztgenannten Anlagen geben zusätzlich Prozessdampf ab (Abb. 3.4).

Der energetische Gesamt-Nutzungsgrad (bezogen auf den Gesamtinput aus Abfall und Brennstoffen) der einzelnen Anlagen reicht von 9,4% bei reiner Stromauskopplung bis 78,7% bei reiner Dampfauskopplung (Abb. 3.5).

Der mittlere energetische Gesamt-Nutzungsgrad (nach Abfallmenge gewichtet) der untersuchten Anlagen betrug im Jahr 1999 41,3%. Er setzt sich zusammen aus den Nutzungsgraden 8,7% Strom, 21,2% Fernwärme und 11,4% Prozessdampf.

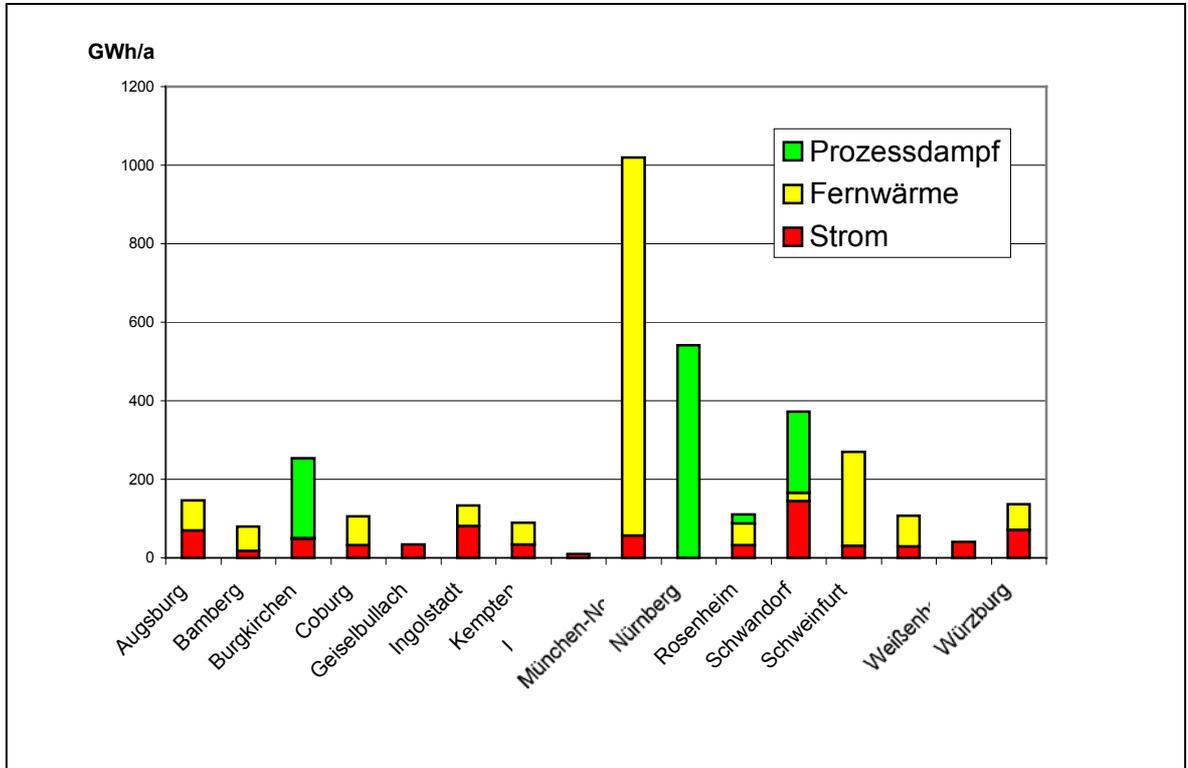


Abb. 3.3: Ausgekoppelte Energiemengen der bayerischen MVA (1999)

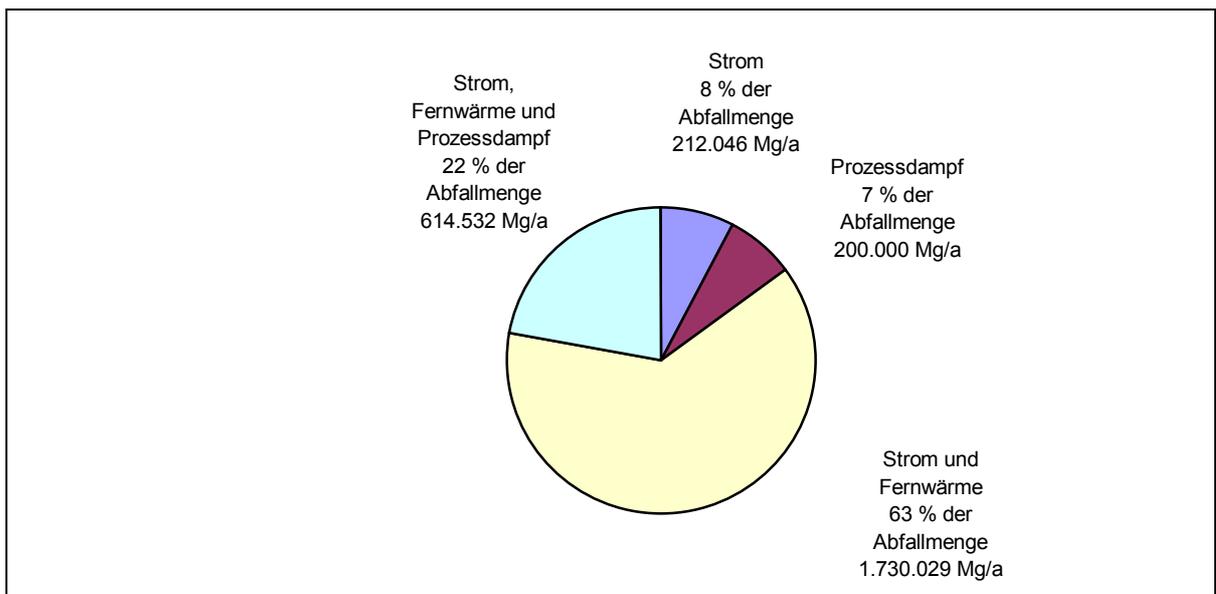


Abb. 3.4: Art der Energieabgabe der bayerischen MVA und der MVA Ulm (BW), bezogen auf die Abfallmengen (1999)

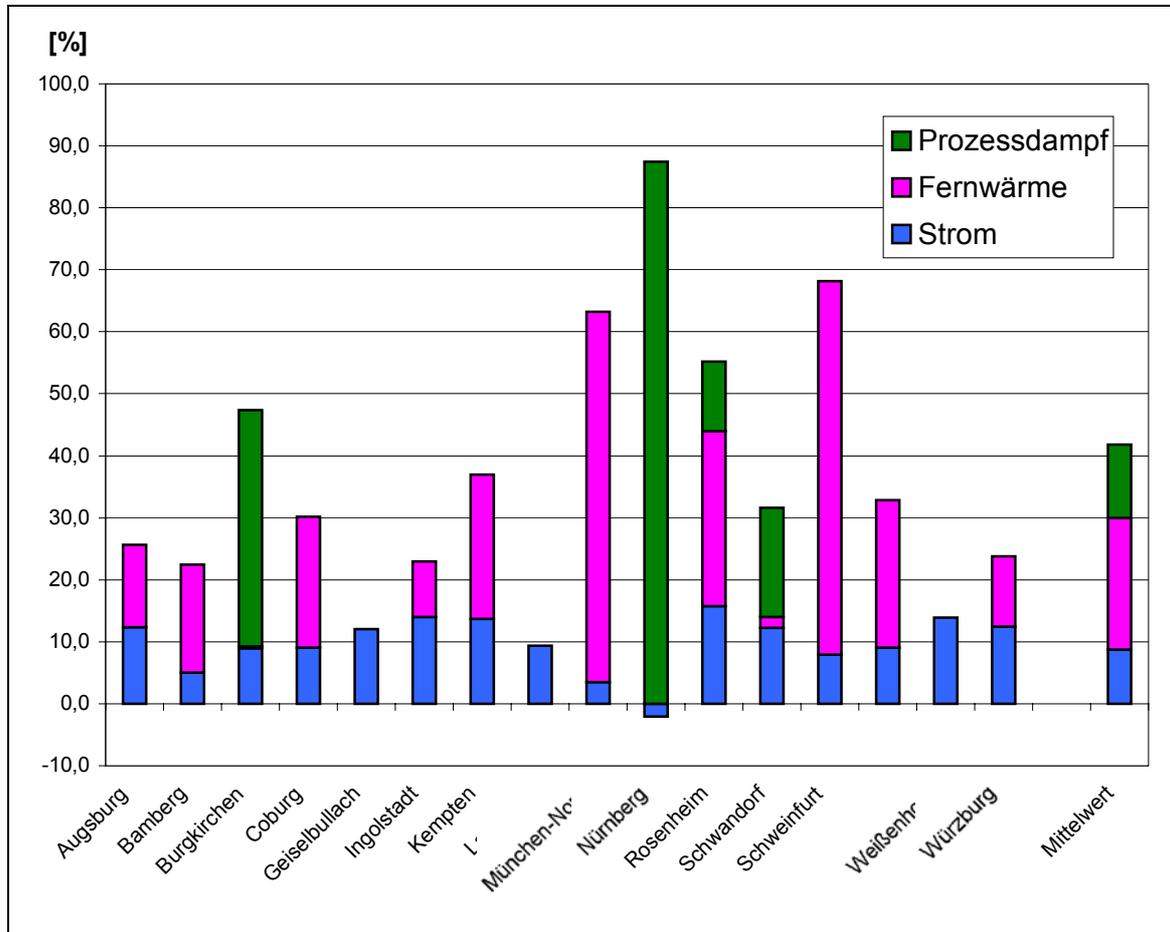


Abb. 3.5: Energetische Gesamt-Nutzungsgrade der bayerischen MVA (1999)

Bemerkung:

Prozessdampf der MVA Nürnberg wird in einem benachbarten Kraftwerk in Strom und Fernwärme umgewandelt

Neben der Energieerzeugung wurde auch der Energieabsatz untersucht. Strom wird meist kontinuierlich, also als Grundlast, in das vorhandene Netz eingespeist. Teilweise wird darauf geachtet, bei hohem Strombedarf volle Leistung zu erbringen.

Bei der Fernwärmeerzeugung decken einige Anlagen vor allem den Grundlastbereich des Fernwärmenetzes ab. Die Wärme-Energie wird dadurch auch in der warmen Jahreszeit genutzt. Die Spitzenlast an kalten Tagen wird durch zusätzliche Heizwerke mit fossilen Brennstoffen abgedeckt. Die Betreiber des Fernwärmenetzes und der Müllverbrennungsanlage sind oft identisch (z.B. Stadtwerke München). Es besteht daher kein Interesse, die Fernwärme-

Grundlast mit fossilen Energieträgern zu erzeugen und die Wärme aus Müll nur zur Spitzenlast zu verwenden und sonst ungenutzt zu lassen.

Durch die in den MVA erzeugte Energie werden andere Brennstoffe und die mit ihrer Bereitstellung und Umwandlung verbundenen Emissionen eingespart. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei der ökologischen Beurteilung. Soweit dies identifizierbar war, wurden deswegen die jeweils substituierten Energieträger, wie Kohle, Erdgas oder Erdöl (die ohne die MVA in anderen Energieumwandlungsanlagen zum Einsatz kämen) ermittelt.

Die Betrachtung der Abgasreinigungsanlagen gibt Aufschluss über die Art und Menge der eingesetzten **Betriebsstoffe** sowie der entstehenden **Rückstände** und **Emissionen**, die für die ökologische Auswertung von Bedeutung sind. Der Aufbau der Reinigungsanlagen ist sehr unterschiedlich, es werden sowohl Trocken-, Quasitrocken- und Nass-Reinigungsverfahren sowie Kombinationen dieser Verfahren eingesetzt.

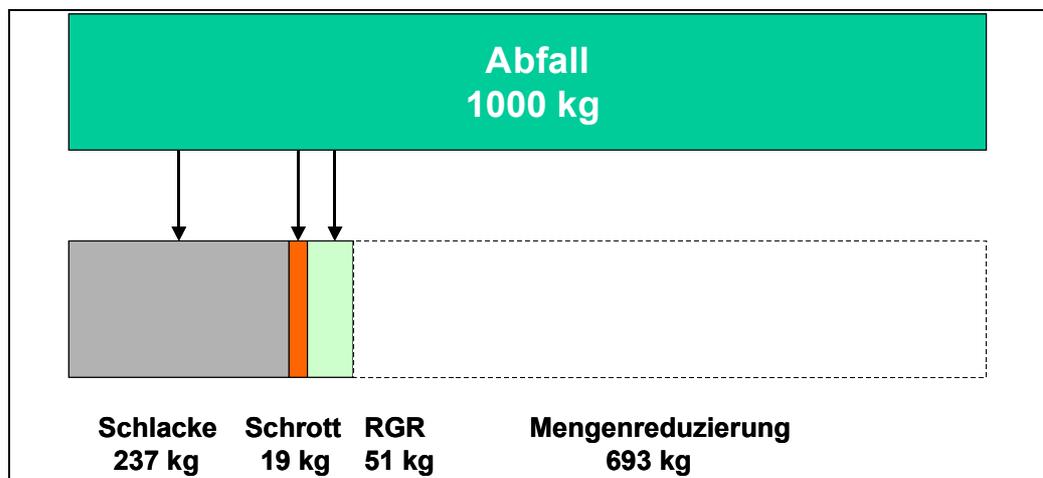


Abb. 3.6: Rückstände aus der Müllverbrennung (Durchschnitt)  
 [RGR: Rückstände aus der Abgasreinigung]

Die eingesetzten Betriebsstoffe sind entsprechend der unterschiedlichen Konzepte der Abgasreinigung nach Art und Menge sehr verschieden.

Die anfallende Rohschlackemenge incl. Schrott reicht von 208 bis 291 kg/Mg Abfall und liegt im Mittel bei 256 kg/Mg Abfall (Abb. 3.6). Die aus der Rohschlacke gewonnenen Schrottmengen schwanken stärker. Hier liegen die Werte zwischen 4 und 36 kg/Mg Abfall.

Die Aufbereitung der Schlacke erfolgt teilweise in betriebseigenen Anlagen, teilweise außerhalb durch Fremdfirmen. Verwendung findet Schlacke im Straßen- und Deponiebau oder im Bergversatz. Die Verwertungswege werden in der Ökobilanz berücksichtigt.

Fast alle Abgasreinigungsanlagen arbeiten abwasserfrei. Die entstehenden festen Rückstände werden meist in „Big Bags“ verpackt und im Untertage-Bergversatz verwertet. Einige Rückstände, wie Salze oder Gips, finden Verwendung in der Industrie.

Bei einigen Anlagen sind Angaben zu Frachten sowohl im Rohgas als auch im Reingas verfügbar, woraus sich Reinigungsleistungen zur Berechnung der ökologisch relevanten Emissionen ableiten lassen.

## 4 Mengenanalyse für Restabfall und Mischkunststoffe aus Haushaltssammlungen

Im Rahmen der Mengenanalyse wurden die notwendigen Daten für die ökologische und ökonomische Beurteilung (Kap. 5) ermittelt:

- Mengenströme von Restabfall (Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle),
- verwendete Transportmittel und Transportentfernungen zur MVA,
- Masse der Kunststoffverpackungen und Mischkunststoffe in der DSD-Sammlung und im Hausmüll.

Im Bezugsjahr 1999 wurden nach Angaben der bayerischen MVA 2.096.189 Mg Restabfall thermisch behandelt, davon 1.563.724 Mg Hausmüll. Das sind jeweils ca. 85 % des insgesamt zu behandelnden Restabfalls. Die Mengen entsprechen durchschnittlichen, einwohnerspezifischen Mengen von 173,6 kg/Ew\*a Restabfall bzw. 129,5 kg/Ew\*a Hausmüll. Die Restabfallmenge lastet zusammen mit den Abfällen zur energetischen Verwertung die in Bayern installierte MVA-Kapazität mengenmäßig zu 92,2% und energetisch zu 93,6 % aus (vgl. Kap. 3).

Diese Daten wurden spezifisch für die bayerischen Kreise ermittelt und als summarische, durchschnittliche Größen für Bayern dargestellt (Tab. 4.1).

Als mittlere, gewichtete Transportentfernungen für die Anlieferung des Abfalls zur jeweiligen MVA wurden ermittelt:

- 1,6 - 80,8 km für den LKW-Transport und
- 20,0 - 82,5 km für den Bahn-Transport.

Einige MVA werden per LKW und Bahn beliefert (vgl. Tab. 4.1).

Verbrauchsverpackungen aus Kunststoffen werden, wie auch andere Verpackungsmaterialien, getrennt erfasst und einer Verwertung zugeführt. Für Bayern wurden für das Bezugsjahr 1999 folgende Mengen an getrennt erfassten Verpackungs- bzw. Mischkunststoffen ermittelt:

- |                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 1) Verpackungskunststoffe, insgesamt: | 93.000 Mg/a  |
| 2) Mischkunststoffe (anteilig aus 1)  | 60.000 Mg/a. |

Tabelle 4.1: Thermisch behandelte Abfälle 1999, Transportwege und mittlere Transportentfernungen (TE)

MVA Anlage	therm. behand. Restabfall (Mg/a)	therm. behand. Hausmüll (Mg/a)	Hausmüll zur MVA.: Anteil Straße (Mg)	Hausmüll zur MVA.: Anteil Schiene (Mg)	Straße mittlere TE (km) gewichtet	Schiene mittlere TE (km) gewichtet
Augsburg	166.628	134.191	134.191		21,9	
Bamberg	115.305	86.472	61.622	24.850	47,1	39,0
Burgkirchen	146.739	128.920	19.109	109.811	1,6	82,5
Coburg	102.359	56.313	31.304	25.009	21,0	36,3
Geiselbullach	51.520	40.116	40.116		13,3	
Ingolstadt	102.889	85.803	85.803		36,2	
Kempten	57.118	36.284	22.109	14.175	21,4	20,0
Landshut	42.463	26.905	26.905		11,3	
Landshut						
München N.	481.353	419.586	419.586		34,9	
Neufahrn	22.739	22.739	22.739		15,0	
Nürnberg	161.000	111.000	111.000		11,2	
Rosenheim	37.757	21.693	21.693		15,4	
Schwandorf	364.968	215.160	50.476	164.684	80,8	50,3
Schweinfurt	114.587	84.568	84.568		77,0	
Weißenhorn	38.853	30.863	30.863		27,9	
Würzburg	83.700	56.900	56.900		18,2	
Ulm (Anteil MM)	6.211	6.211	83.128		4,4	
<b>Summen</b>	<b>2.096.189</b>	<b>1.563.724</b>	<b>1.225.195</b>	<b>338.529</b>		

Bei 12,07 Mio. Einwohnern in Bayern entspricht das durchschnittlichen, einwohnerspezifischen Mengen von 7,71 kg/Ew\*a Verpackungskunststoffen bzw. 4,97 kg/Ew\*a Mischkunststoffen. Die angegebenen Mengen sind Mittelwerte. Sie basieren auf 3 unabhängigen Berechnungswegen. Es wird deshalb von hoher Plausibilität ausgegangen.

Eine Menge von 60.000 Mg/a Mischkunststoff des Verpackungsabfalls könnte gegebenenfalls mit dem Hausmüll erfasst und behandelt werden. Sie wäre dann Bestandteil des Restabfalls und wäre 1999 in Bayern zu 85% (ca. 51.000 Mg/a) in den MVA mit Energienutzung beseitigt und zu 15% (ca. 9.000 Mg/a) auf Deponien abgelagert worden.

Die **derzeitige Verwertung dieser Mischkunststoffe** aus getrennter Sammlung erfolgt nach Sortierung sowohl werkstofflich als auch rohstofflich. Mit einem Anteil von etwa 84% überwiegt dabei das rohstoffliche Recycling:

- rohstofflich: 48,4 % Hochofen  
35 % SVZ Schwarze Pumpe
- werkstofflich: 8,4 % Substitut für Kunststoff  
8,2 % Substitut für Holz/Beton.

Die getrennte Erfassung der gebrauchten Verkaufsverpackungen aus Kunststoff in den privaten Haushaltungen ist nicht vollständig. Je nach Konsequenz der Abfalltrennung ist ein mehr oder weniger großer Anteil Bestandteil des Haus-/Geschäftsmülls. Es war deshalb zu ermitteln, welche Anteile der Abfallverpackungen aus Kunststoff zur Zeit im Restabfall sind. Zur Ermittlung wurden unabhängig voneinander Angaben und Daten aus zwei Quellen ausgewertet. Beide Auswertungen führten zu sehr unterschiedlichen Mengen.

Aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen wird von folgenden Mengen an Mischkunststoffen im Restabfall ausgegangen (Tab. 4.2:

- 31.000 Mg (2,58 kg/Ew\*a) Verpackungskunststoffe
- 20.000 Mg (1,65 kg/Ew\*a) Mischkunststoffe.

Tabelle 4.2: Mengenbilanz: Kunststoffverpackungen, Bayern, 1999

		Menge pro Einwohner (kg/Ew)	Menge in Bayern (Mg)	Anteil (%)
Verpackungskunststoffe	getrennt erfasst	7,71	93.072	75
	im Restabfall	2,58	31.145	25
	Gesamt	10,29	124.217	100
Mischkunststoffe (anteilig in Verpackungs-KS)	getrennt erfasst	4,97	59.996	75
	im Restabfall	1,65	19.918	25
	Gesamt	6,62	79.914	100

Insgesamt ergeben sich damit für das Jahr 1999 etwa 80.000 Mg/a Mischkunststoffe in Bayern:

- 60.000 Mg in getrennter Sammlung
- 20.000 Mg im Restabfall.

## 5 Ökologische und ökonomische Beurteilung

Gemäß den Ergebnissen aus der Datenerhebung wurden die bayerischen MVA nach Art und Höhe der Nutzenergieauskopplung in folgende **Cluster** gruppiert:

- Anlagen mit reiner Stromauskopplung
- Anlagen mit reiner Wärmeauskopplung
- Anlagen mit gemischter Energieauskopplung. Hier wurde zusätzlich in Anlagen mit mittlerer (20-50%) und hoher (> 50%) Energienutzung unterschieden.

Für die Untersuchungen zur energetischen Verwertung von Mischkunststoffen in MVA wurden folgende "**repräsentative Anlagen**" ausgewählt:

- MVA "**A**"  
(Auskopplung von Strom;  
geringe Energienutzung (12,1%))
- MVA "**B**"  
(Auskopplung von Strom und Fernwärme;  
hohe Energienutzung (63,2%))
- MVA "**C**"  
(Auskopplung von Strom und Prozessdampf;  
mittlere Energienutzung (31,6%))
- MVA "**D**"  
(Auskopplung von Prozessdampf;  
sehr hohe Energienutzung (78,7%)).

In diesen ausgewählten Anlagen wurden 1999 ca. 50% der in bayerischen MVA eingesetzten Abfallmenge verbrannt.

Bei den **rohstofflichen Verfahren** zur Verwertung der Mischkunststoffe wurde

- die Vergasung im Sekundärrohstoff-Verwertungs-Zentrum Schwarze Pumpe (SVZ) sowie
- der Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen untersucht.

Als (hypothetisches) Referenzsystem wurde außerdem die vollständige **Deponierung** der Mischkunststoffe betrachtet.

Zu jeder dieser Entsorgungs-/Verwertungsoptionen wurden die zugehörigen **Prozessketten** ab der Erfassung der Mischkunststoffe

und bis zur Erzeugung von marktfähigen Verwertungsprodukten aufgebaut und in Ökobilanzen ausgewertet. In den Prozessketten wurden - soweit erforderlich<sup>2</sup> - die Sammlung, Sortierung und Aufbereitung der Mischkunststoffe sowie die Verwertung bzw. Beseitigung in einem der genannten Prozesse (vier MVA, SVZ, Hochofen, Deponie) berücksichtigt - incl. der zugehörigen speziellen Transporte und der Bereitstellung notwendiger Prozessenergien. Die spezifischen Randbedingungen für Bayern wurden dabei berücksichtigt.

Zur Beschreibung der jeweils beteiligten Stoff- und Energieströme bei den MVA, der SVZ-Vergasung, dem Hochofen und der Deponie wurden Mischkunststoff-spezifische **Prozessmodelle** auf der Basis der Ergebnisse der Kapitel 3 und 4 sowie zusätzlicher Datenerhebungen erstellt und für die Berechnung angesetzt.

In den Bilanzrechnungen wurden für die Prozessketten jeweils die mit ihnen verbundenen Umweltlasten ermittelt. Für die in den Prozessketten erzeugten Verwertungsprodukte wurden ökologische Gutschriften entsprechend ihrem Potential zur Substitution primärer Rohstoffe erteilt.

Für alle MVA sowie die rohstofflichen bzw. Status-quo-Verfahren wurden in der **Sensitivitätsbetrachtung** folgende Varianten betrachtet:

1. Substitution von Strom, Dampf und Fernwärme aus Steinkohle (relevant für MVA und SVZ),  
Substitution von Methanol aus Schweröl (relevant nur für SVZ),  
Substitution von Schweröl als Reduktionsmittel (relevant nur für Hochofen).
2. Substitution von Strom, Dampf und Fernwärme aus dem jeweiligen Erzeugungs- Mix<sup>3</sup> (relevant für MVA und SVZ),  
Substitution von Methanol aus einem Erzeugungs- Mix (nur SVZ).
3. Substitution von Strom aus dem Erzeugungs- Mix,  
Substitution von Dampf und Fernwärme aus Gas,  
Substitution von Methanol aus einem Erzeugungs- Mix.

Mit den ausgewählten Verwertungsoptionen und den dazu durch-

---

<sup>2</sup> separate Sammlung, Sortierung und Aufbereitung bei Verwertung in SVZ und Hochofen

<sup>3</sup> Der Erzeugungs- Mix gibt an, mit welchen Anteilen verschiedene Rohstoffe (z.B. Erdgas, Steinkohle, Erdöl) an der Erzeugung eines Produkts (z.B. Strom, Dampf) beteiligt sind.

geführten Sensitivätsbetrachtungen wurden für die Verwertung von Mischkunststoffen in bayerischen MVA und in rohstofflichen bzw. Status-quo-Verfahren **Bandbreiten** hinsichtlich der **Umwelteffekte** gegenüber der (hypothetischen) Deponierung abgebildet und verglichen.

Aufgrund der gewählten repräsentativen MVA-Anlagen und der Sensitivätsbetrachtungen kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse für die anderen bayerischen MVA mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der ermittelten Bandbreiten liegen.

Die Umwelteffekte wurden in folgenden Wirkungskategorien betrachtet:

- Primärenergiebedarf (Summe aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren energetisch bewertbaren Ressourcen),
- Summe der Wasserentnahme (ohne Kühlwasser),
- Beitrag zum Treibhauseffekt (Global Warming Potential GWP),
- Potentieller Beitrag zur Versauerung,
- Potentieller Beitrag zur Eutrophierung,
- Siedlungsabfallmenge,
- Sonderabfallmenge,
- Menge an radioaktivem Abfall.

In dieser Kurzfassung wird nachfolgend nur auf den Primärenergiebedarf und das Versauerungspotential näher eingegangen.

Zunächst wurden die **Umwelteffekte pro kg Mischkunststoff** und **für ein einzelnes Verfahren** bestimmt.

Das Gesamtergebnis wird beispielhaft an den folgenden zwei Abbildungen erläutert. Sie zeigen die Umwelteffekte für die Wirkungskategorien Primärenergiebedarf (Abb. 5.1) und Versauerungspotential (Abb. 5.2). Für jedes untersuchte Verfahren (Ausnahme Hochofen) sind die Ergebnisse pro kg Mischkunststoff für die drei oben genannten Varianten ausgewiesen. Die Effekte können direkt miteinander verglichen werden. Da Effekte gegenüber der Deponie (als Referenz) abgebildet werden, ist die Deponie selbst durch die "Null-Linie" (x-Achse) repräsentiert. Umweltentlastungseffekte sind mit negativem Vorzeichen nach oben, Mehrbelastungen (positives Vorzeichen) nach unten aufgetragen.

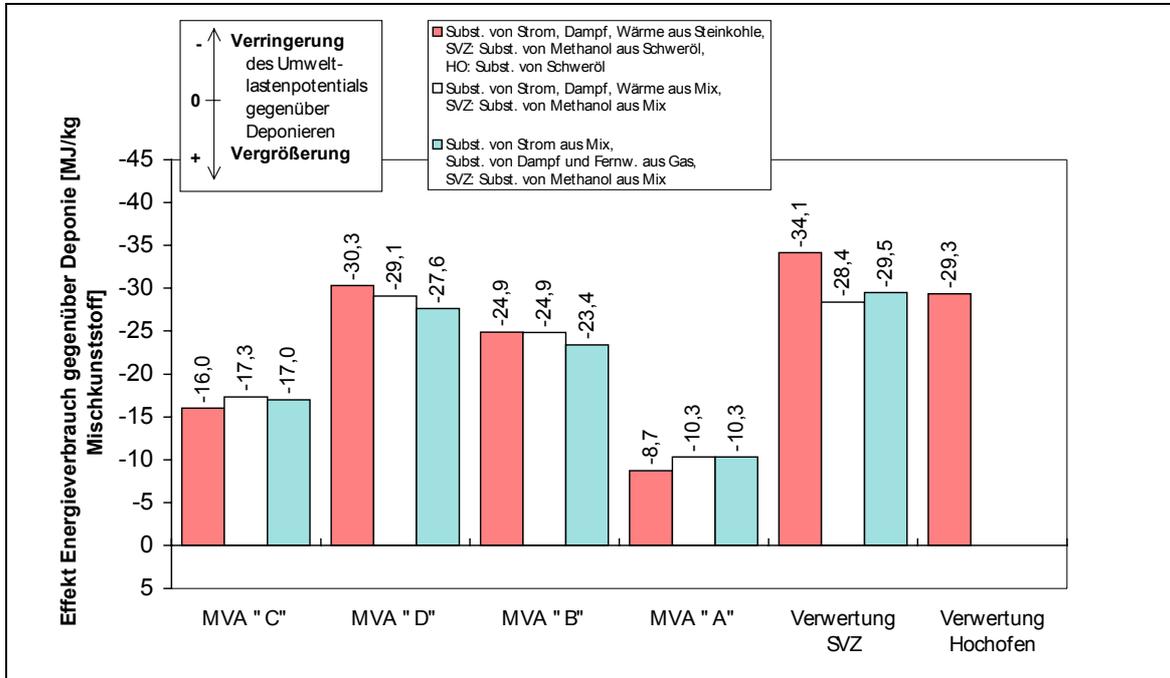


Abb. 5.1: Effekte gegenüber der Deponierung bzgl. Primärenergiebedarf

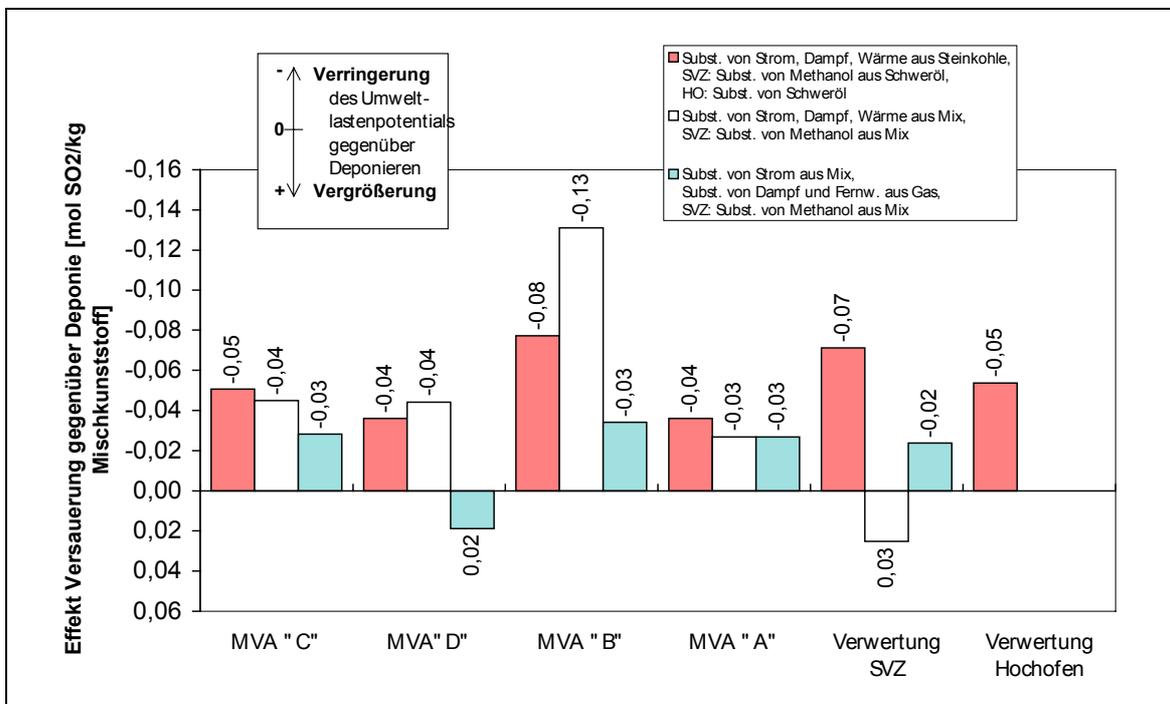


Abb. 5.2: Effekte gegenüber der Deponierung bzgl. Versauerungspotential

In vielen der betrachteten Wirkungskategorien überschneiden sich die Bandbreiten von rohstofflicher Verwertung und der energetischen Verwertung in der MVA.

Eindeutige oder generelle Vorteile für eines der betrachteten Verfahren lassen sich nicht erkennen. Die standortspezifischen Randbedingungen, z.B. die Energienutzung oder die substituierten Produkte aus primären Rohstoffen, haben teilweise großen Einfluss auf diesen Vergleich. Der Vergleich zwischen den MVA und den rohstofflichen Verfahren liefert auch qualitativ nicht für alle Wirkungskategorien das gleiche Resultat.

Bei einigen Wirkungskategorien ergeben sich gegenüber der Deponie zusätzliche Umweltbelastungen in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen. Das gilt sowohl für die rohstofflichen Verfahren als auch für die Verbrennung in den MVA.

Eine hohe oder sehr hohe/effiziente? Energienutzung in den MVA führt aufgrund der höheren Gutschriften zu höheren Entlastungseffekten und damit zu einer ökologischen Verbesserung der MVA im Vergleich zu den rohstofflichen Verfahren.

Die unterschiedlichen Transportentfernungen und die Auslastung der Transportmittel spielen für den Vergleich zwischen rohstofflichen Verfahren und dem Einsatz in den MVA nur bei den Wirkungskategorien Versauerungs- und Eutrophierungspotential eine Rolle. Transporte sind aber auch dort nicht so entscheidend, dass sich der Vergleich bei anderen realistischen Transportbedingungen qualitativ ändern würde.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden für verschiedene Verwertungssysteme die **Umwelteffekte** für die **Mischkunststoffen (MK) in Bayern** ermittelt.

Die folgenden **Verwertungssysteme** wurden in Absprache mit dem Auftraggeber für die Gesamtmenge von 80.000 t Mischkunststoffen betrachtet:

"IST Status Quo": 60.000 t Status Quo<sup>4</sup> Verwertung,  
17.000 t in MVA,  
3.000 t auf Deponie.

"IST Rohstofflich": 60.000 t rohstoffliche Verwertung,  
17.000 t in MVA,  
3.000 t auf Deponie.

---

<sup>4</sup> Status quo = ca. 83 % rohstofflich und ca. 17 % werkstofflich.

"MK in MVA": 68.000 t in MVA<sup>5</sup>,  
12.000 t auf Deponie.

Diese drei Verwertungssysteme wurden wieder gegenüber dem hypothetischen Referenzsystem beurteilt:

"Deponie": 80.000 t auf Deponie.

Die Verteilung der Mischkunststoffe in den Verwertungssystemen auf die einzelnen Verfahren ergab sich aus den Ergebnissen der Kapitel 3 und 4. In der "Status Quo Verwertung" wurde der für 1999 gültige Mix aus rohstofflicher und werkstofflicher Verwertung von Mischkunststoffen berücksichtigt.

Für den Vergleich der Verwertungssysteme ergeben sich wieder Bandbreiten, die aus den Ergebnissen pro t Mischkunststoff und den oben genannten Mengen resultieren.

Die folgenden zwei Diagramme zeigen beispielhaft wiederum die Ergebnisse für die Kategorien Primärenergiebedarf (Abb. 5.3) und Versauerungspotential (Abb. 5.4). Die Deponie wird durch die x-Achse repräsentiert.

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Verwertungssysteme im Wesentlichen durch die Verfahren geprägt sind, die in den einzelnen Systemen hauptsächlich Anwendung finden.

Die Ergebnisse aus dem Verfahrensvergleich pro t Mischkunststoff lassen sich daher auf den Vergleich der Verwertungssysteme weitgehend übertragen. Leichte Verschiebungen ergeben sich vor allem aus den unterschiedlichen Mengen, die deponiert werden.

Aus **ökologischer Sicht** lässt sich für 1999 kein genereller Vorteil für ein Verwertungssystem oder Verfahren erkennen (Abb. 5.3 und Abb. 5.4). Die spezifischen Standortbedingungen haben großen Einfluss auf die Ergebnisse. Die teilweise großen Bandbreiten spiegeln das wider.

Bei der Primärenergieeinsparung (Abb. 5.3) lässt sich tendenziell erkennen, dass mit der Verwertung in der MVA nur bei günstigen Randbedingungen (Energieauskopplung) ähnliche Effekte erzielt werden können wie bei rohstofflicher Verwertung. Umgekehrt bedeutet das, dass die energetische Verwertung in MVA für Bayern

---

<sup>5</sup> Derzeit werden ca. 17.000 t mit dem Restabfall erfasst und in den MVA verbrannt. Weitere 51.000 t aus DSD-Sammlungen wären zusätzlich in MVA einzusetzen. Die MVA-Kapazitäten dafür reichen aus (64.900 t wären zusätzlich möglich, vgl. Kap- 3).

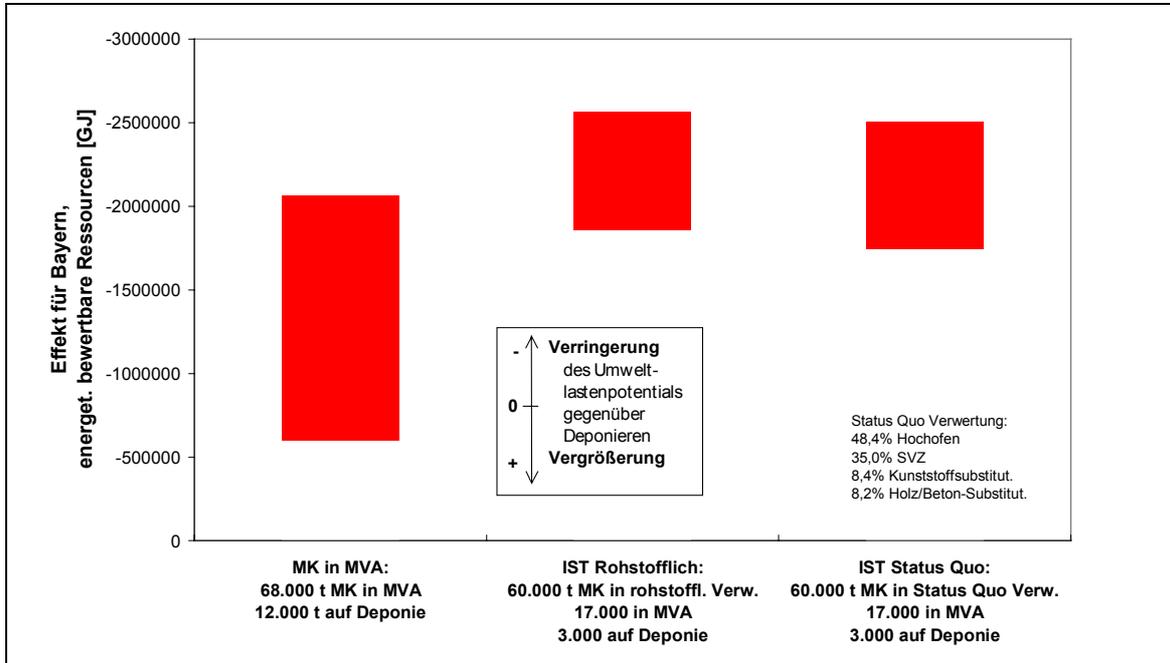


Abb. 5.3: Bandbreiten der Effekte bzgl. des Primärenergiebedarfs in Bayern für verschiedene Verwertungskonzepte

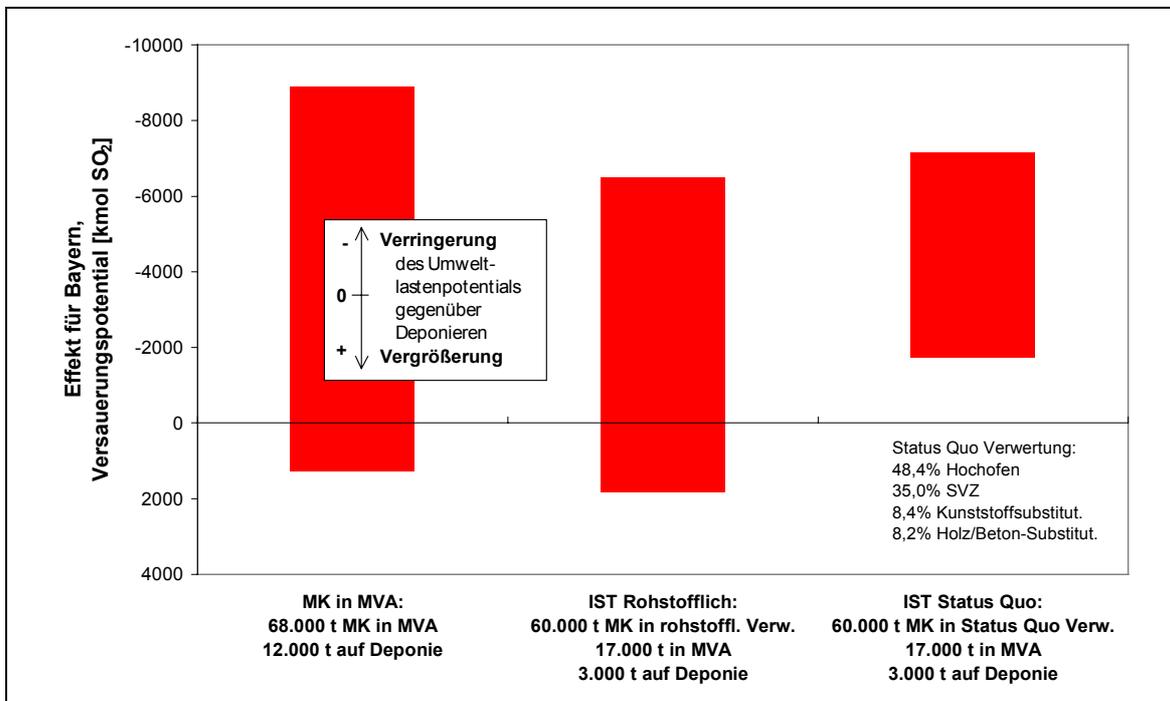


Abb. 5.4: Bandbreiten der Effekte bzgl. des Versauerungspotentials in Bayern für verschiedene Verwertungskonzepte

eine aus ökologischer Sicht gleichwertige Alternative zu den rohstofflichen Verfahren immer dann sein kann, wenn eine günstige Einbindung in die regionale Energieversorgung gewährleistet ist.

In der **ökonomischen Beurteilung** wurden für dieselben Prozessketten und Verwertungssysteme, die ökologisch untersucht wurden, die Kosten auf der Basis von Preisen abgeschätzt.

Die für die Untersuchung relevanten **Preise pro t MK** liegen bei

- der Verbrennung in den MVA zwischen 300 DM/t und 650 DM/t,
- der rohstofflichen und Status-Quo-Verwertung zwischen 1.750 und 2.500 DM/t<sup>6</sup> und
- der Deponie bei etwa 400 DM/t.

Auch in der ökonomischen Betrachtung wurden Differenzen gegenüber der Deponierung errechnet. Sie liegen

- zwischen –100 DM/t (Einsparung) und 250 DM/t (Mehrkosten) für die Verbrennung in den MVA und
- zwischen 1.350 DM/t und 2.100 DM/t Mehrkosten für die rohstofflichen Verfahren und die Status-Quo-Verwertung.

Für die Gesamtmengen in Bayern ergeben sich folgende **Kosten-effekte** in den Verwertungssystemen (Tab. 5.1):

Im System "MK in MVA" liegen sie zwischen einer Einsparung von rund 7 Mio. DM und Mehrausgaben von etwa 17 Mio. DM. In den Systemen mit vorwiegend rohstofflicher Verwertung ergeben sich Mehrkosten zwischen etwa 80 und 130 Mio. DM.

---

<sup>6</sup> Inklusive der Kosten für die getrennte Sammlung, Sortierung und Transport

Tabelle 5.1: Mehr- bzw. Minderkosten gegenüber der Deponierung für die Gesamtmengen MK in Bayern

Verwertungssystem	Mehrkosten (+) bzw. Minderkosten (-) gegenüber Deponie* [DM]
MK in MVA	-6,80 Mio. bis +17,00 Mio.
IST Rohstofflich	+79,30 Mio. bis +130,25 Mio.
IST Status Quo	+79,30 Mio. bis +130,25 Mio.

\* Basis 400 DM/t für Deponie

In erster Näherung war also 1999 die rohstoffliche Verwertung der Mischkunststoffe in der Größenordnung von 100 Mio. DM teurer als es eine Verbrennung in den bayerischen MVA gewesen wäre.

Die Ergebnisse aus der ökologischen und der ökonomischen Beurteilung wurden in einer **Kosten-Nutzen-Betrachtung** zusammengeführt. Es wurden Effizienzen, d.h. pro DM erzielbare Umweltentlastungen in den einzelnen ökologischen Kategorien, abgeleitet.

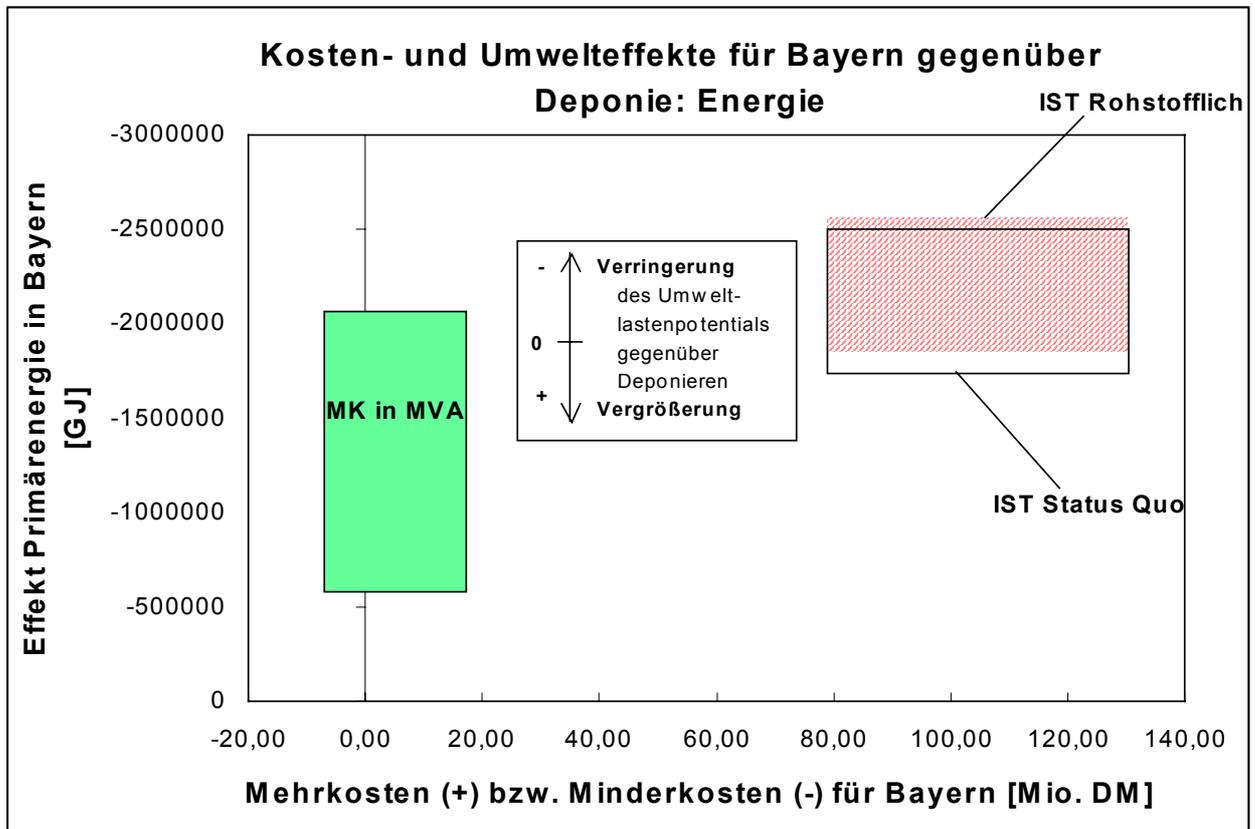


Abb. 5.5: Kosten- und Umwelteffekte bzgl. Primärenergiebedarf für die Gesamtmengen MK in Bayern

Die Ergebnisse werden wiederum beispielhaft für den Primärenergiebedarf (Abb. 5.5) und das Versauerungspotential (Abb. 5.6) gezeigt. Die ökologischen Bandbreiten der Entsorgungssysteme sind dabei über den zugehörigen ökonomischen Bandbreiten aufgetragen.

Der Bezugspunkt "Deponie" wird in den Abbildungen 5.5 und 5.6 durch den Nullpunkt abgebildet. Im Diagramm befinden sich daher Verfahren mit gleicher Effizienz in gleichem Abstand zum Nullpunkt.

Die Effizienz gegenüber der Deponie ist definiert als Umwelteffekt gegenüber der Deponie dividiert durch den Kosteneffekt gegenüber der Deponie.

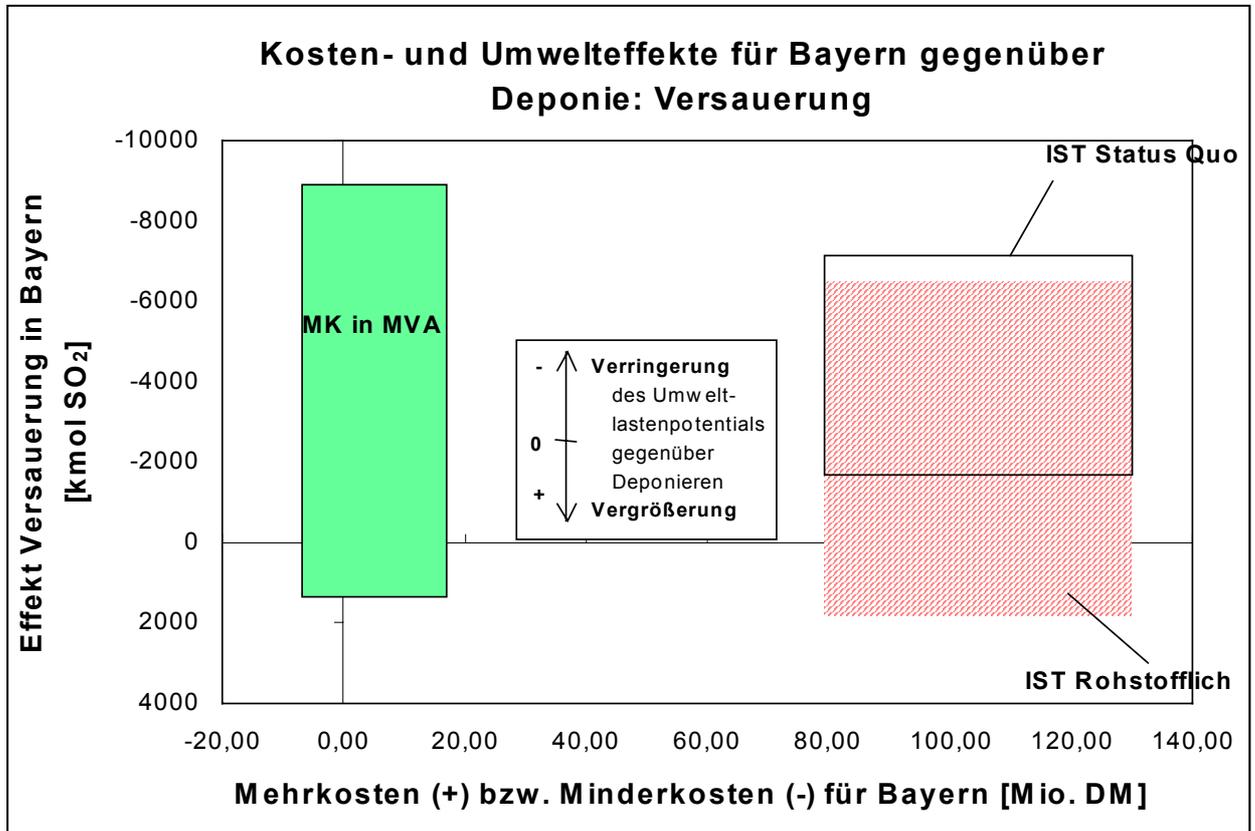


Abb. 5.6: Kosten- und Umwelteffekte bzgl. Versauerungspotential für die Gesamtmengen MK in Bayern

In der Abbildung zeigt die x-Achse die Kosten der Verfahren im Verhältnis zur Deponie: An der linken Seite des Diagramms liegende Verfahren verursachen geringere Kosten als weiter rechts liegende.

Die y-Achse bezieht sich auf die Einsparung von Primärenergie bzw. Verminderung von Umweltlasten: Weiter oben liegende Verfahren bewirken eine höhere Einsparung.

Abb. 5.5 verdeutlicht hinsichtlich der Primärenergienutzung, dass

- die rohstoffliche und die Status-quo-Verwertung etwa gleich hohe Energiegutschriften bei ebenfalls etwa gleich hohen Kosten erzielen und
- die Verbrennung in MVA einerseits erheblich kostengünstiger (und in ähnlichem Kostenrahmen wie die Deponie) ist, aber andererseits nur solche MVA, die hinsichtlich der Energieauskopplung günstig (weit oben liegend) sind, ähnliche Energiegutschriften erzielen, wie die mittleren

rohstofflichen bzw. Status-quo-Verwertungen.

Abb. 5.6 zeigt in analoger Weise das Verhältnis von Umwelteffizienz zu Kosten für die Wirkungskategorie Versauerungspotential.

Insgesamt lässt sich für viele der betrachteten Wirkungskategorien feststellen, dass mit einer Verbrennung der Mischkunststoffe in den bayerischen MVA bei deutlich geringeren Kosten ähnliche Umwelteffekte erzielbar wären wie mit einer rohstofflichen Verwertung. Das gilt vor allem dann, wenn für die MVA eine gute Energienutzung realisiert werden kann.

Unter dem Effizienz-Aspekt, d.h. welche Umweltentlastungseffekte gegenüber der (hypothetischen) Deponie pro DM erzielbar sind, ist daher bei einigen ökologischen Kategorien eine Verbrennung der Mischkunststoffe in den bayerischen MVA zu favorisieren. Das sind z.B.: Treibhauseffekt (GWP), Versauerung und Eutrophierung.

Die Betrachtungen zur Ökologie lassen bei einigen Wirkungskategorien keine eindeutigen Aussagen zu, weil die im Rahmen der Untersuchung ermittelbaren Bandbreiten und damit die Überschneidungen ihrer Auswirkungen zu groß sind.

## 6 Resümee

In Bayern fielen 1999 ca. 124.000 Mg Kunststoffverpackungen als Abfall an, wovon ca. 93.000 Mg getrennt und ca. 31.000 Mg als Bestandteil des Hausmülls erfasst wurden. Von der Gesamtmenge des Kunststoffverpackungsabfalls waren ca. 80.000 Mg Mischkunststoffe. Etwa 60.000 Mg dieser Mischkunststoffe wurden getrennt erfasst. Diese Menge von ca. 60.000 Mg Mischkunststoffen könnte ggf. mit dem Hausmüll erfasst und in MVA verbrannt werden.

Die energetische Verwertung der Mischkunststofffraktion aus Kunststoffverpackungen in bayerischen MVA wäre aus technischer Sicht möglich: Die Kapazitäten der bestehenden MVA könnten die Mengen der Mischkunststoffe mengenmäßig und energetisch aufnehmen.

Die Effekte der Verbrennung der Mischkunststoffe in MVA wurden im Vergleich zu etablierten Verwertungsverfahren (rohstofflich und rohstofflich/werkstofflich) ökologisch und ökonomisch bewertet.

Die bayerischen MVA unterscheiden sich in ihrer Konfiguration und in ihrer Einbindung in die regionale Energieversorgung. Dies hat einen erheblichen Einfluss insbesondere auf die ökologische Beurteilung der Verwertung von Mischkunststoffen. Eine pauschale oder durchschnittliche Schlussfolgerung ist nicht sachgerecht.

Aus ökologischer Sicht schneidet die energetische Verwertung von Mischkunststoffen in bayerischen MVA in vielen Wirkungskategorien ähnlich ab wie die stoffliche Verwertung. MVA mit hoher Energienutzung können im Vergleich zur stofflichen Verwertung bei den untersuchten Wirkungskategorien vorteilhaft oder gleichwertig sein. Unter den 1999 gegebenen Umständen ist jedoch eine vollständige Umstellung von der stofflichen Verwertung auf eine energetische Verwertung in den MVA nicht uneingeschränkt zu empfehlen.

Um ähnlich positive Umwelteffekte zu erzielen wie bei den stofflichen Verfahren, wären Mischkunststoffe zunächst in den MVA einzusetzen, die eine gute oder sehr gute Einbindung in die regionale Energieversorgung haben. Eine bessere Einbindung von MVA-Anlagen mit bisher geringer Energieauskopplung in die regionale Energieversorgung wäre anzustreben.

Aus ökonomischer Sicht (1999) wird dagegen deutlich, dass die energetische Verwertung der Mischkunststoffe in den MVA erheblich günstiger abschneidet als die stoffliche Verwertung. Der Grund liegt v.a. darin, dass die stoffliche Verwertung mit hohen Kosten für Sammlung, Sortierung und Vorbehandlung der Verpackungskunststoffe verbunden ist.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wäre es aus ökologischer Sicht gleichwertig und aus ökonomischer Sicht vorteilhaft, schrittweise auf eine Verbrennung der Mischkunststofffraktion der Verpackungsabfälle in den MVA umzustellen und ggf. die eingesparten Mittel für eine weitere Verbesserung der Einbindung der Anlagen in die Energienetze zu verwenden.