

Zum Energiebedarf bei der Herstellung von Glasbehältern

Von Wolfgang Trier, Frankfurt (Main)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 18. März 1982)

Um den Energiebedarf zur Herstellung verschiedener Gegenstände miteinander vergleichen zu können, muß der Energieaufwand der Vorprodukte, eventueller Transporte usw. neben dem eigentlichen Energieaufwand bei der Herstellung mit berücksichtigt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang vom sogenannten „kumulierten“ Energiebedarf. Vergleiche sind nur dann möglich, wenn nach einheitlichen Gesichtspunkten vorgegangen wird.

In Anlehnung an die Vorgehensweise in der Chemie wird der Energiebedarf zur Herstellung von Glasbehältern untersucht. Die spezifischen Energieäquivalenzwerte, bezogen auf das Glasbehältervolumen, liegen zwischen 3 200 und 5 200 kJ/l, in Öläquivalenten ausgedrückt – neueren Veröffentlichungen entsprechend [1] – zwischen 81 und 130 goe/l. Die Ergebnisse zeigen, daß moderne Glasbehälter im Hinblick auf den Energieaufwand im Volumenbereich zwischen 0,2 und 1,01 den Behältern aus Kunststoffen im allgemeinen überlegen sind.

Energy requirements in glass container manufacture

To compare the energy requirements for the manufacture of various articles the energy consumed from production of the raw materials to transport of the finished product must be taken into account as well as the energy used in the actual manufacturing process. For this purpose one must deal with cumulative energy consumption. Comparisons are then possible only if a unified point of view is taken.

By following the procedures used in chemistry energy consumption has been evaluated for glass container manufacture. The specific energy equivalents related to the volumes of glass containers lie between 3 200 and 5 200 kJ/l; in terms of oil the equivalent values – according to recent publications [1] – are 81 to 130 goe/l. These results show that modern glass containers are in general superior to plastic containers in respect of energy consumption in volumes between 0,2 and 1,01.

Consommation d'énergie lors de la fabrication de récipients en verre

Pour pouvoir comparer la consommation d'énergie dans la fabrication de différents articles en verre, il faut tenir compte des consommations d'énergie pour l'extraction des matières premières et du combustible, de leur transport éventuel etc. en plus de l'énergie propre consommée par chaque produit fabriqué. On parle dans ce cas de consommation d'énergie dite „cumulée“. Les comparaisons ne sont alors possibles que si l'on part des mêmes bases.

On adopte la démarche utilisée en chimie pour étudier la consommation d'énergie dans la fabrication de récipients en verre. Les valeurs en équivalents d'énergie spécifiques, concernant les volumes des récipients en verre, se situent entre 3 200 et 5 200 kJ/l, lesquelles, exprimées en équivalents pétrole – suivant des publications récentes [1] – se situent entre 81 et 130 gEP/l. Les résultats montrent qu'en ce qui concerne la consommation d'énergie, les récipients en verre modernes surpassent en général les récipients en plastique pour des contenances comprises entre 0,2 et 1 l.

Während bisher der Energiebedarf für die Herstellung von Gütern fast ausschließlich unter Kostengesichtspunkten betrachtet und behandelt wurde, haben das geschärfte Umweltbewußtsein und eine sich abzeichnende Verknappung der fossilen Brennstoffe die Fragen des Bedarfs und der Verfügbarkeit mit in die Diskussion einbezogen. Dies gilt besonders für die energieintensiven Industriezweige wie die Chemie und die Hüttenindustrie. Miteinander in Konkurrenz stehende Produkte werden nicht mehr nur nach ihren Eigenschaften und Kosten miteinander verglichen, sondern auch nach dem zur Herstellung erforderlichen Energieaufwand. Bei solchen Vergleichen geht leider nicht nur manchmal die Objektivität verloren [2], sondern es werden auch unterschiedliche Maßstäbe verwendet, was zur Folge hat, daß genannte Daten nicht mehr vergleichbar sind und ein verzerrtes Bild entsteht. Um diesen Übelständen

abzuhelfen, haben sich Kindler und Nikles [1] im Bereich der Kunststoffe und Schäfer und Trier [3] im Bereich der Flaschen und Verpackungsgläser um gleiche Maßstäbe und vergleichbare Ergebnisse bemüht. Da die Arbeit von Schäfer und Trier internen Charakter trägt, zudem nicht mehr dem neuesten Stand entspricht und auch in der Wahl der Maßstäbe in wichtigen Dingen von den Empfehlungen von Kindler und Nikles abweicht, sollen im folgenden die Daten für Flaschen und Behältergläser aktualisiert und die Voraussetzungen den Maßstäben der Chemie angeglichen werden, um einen unmittelbaren Vergleich des notwendigen Energieaufwandes bei der Herstellung von Kunststoffbehältern und Glasbehältern zu ermöglichen.

Zur Feststellung des Energieaufwandes bei der Herstellung von Gegenständen ist von Schäfer [3] der Begriff des „kumulierten spezifischen Energieauf-

Tabelle 1. Glaszusammensetzungen (Massengehalt in %) (gerundete Werte)

Glasart	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cr ₂ O ₃
Weißglas	74	1,1	0,04	11,1	1,8	11,0	0,5	0,5	—
Grünglas	72,2	1,6	0,41	10,2	3,5	10,9	0,56	0,4	0,2

wandes“ eingeführt worden. Er versteht darunter nicht nur den Energieaufwand zur unmittelbaren Herstellung des Gegenstandes, sondern auch den Energieaufwand zur Bereitstellung der Rohstoffe, der notwendigen Hilfsenergien, der Transportmittel und dgl.

1. Gesamtenergiebedarf der einzelnen Herstellungsphasen

1.1. Rohstoffe für die Hohlglasherstellung

Zur Herstellung der in Tabelle 1 angegebenen Gläser stehen viele Rohstoffkombinationen und Scherbenzusätze zur Verfügung. Vor allem der Scherbenzusatz hat mit dem stark geförderten Altglasrecycling eine neue Dimension bekommen, die sich energiemäßig stark auswirkt [4]. Altglas wird bevorzugt bei Grünglas eingesetzt, da sich die heute noch unvermeidbaren Verunreinigungen im Altglas färbend auf das ersmolzende Glas auswirken. Zur Herstellung von 1 000 kg Glas kann von den in Tabelle 2 aufgeführten Rohstoffsätzen ausgegangen werden.

Der Gesamtenergiebedarf für die Bereitstellung und den Antransport ist nach Angaben der führenden Hersteller in Tabelle 3 zusammengestellt. Es wird hier, soweit ausgewiesen, zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie unterschieden.

Eigenscherben, das sind in der Glashütte selbst anfallende Scherben, und Fremdscherben sind als wiedergewonnenes Verlustmaterial zu betrachten und werden der allgemeinen Gepflogenheit entsprechend [1] „energiefrei“ bewertet. Der Energiebedarf für die Aufbereitung der Fremdscherben, die teilweise außerhalb der Hütten erfolgt, wird mit 5 Wh/kg angesetzt.

Für den Transport der Rohstoffe einschließlich der Fremdscherben wird eine mittlere Entfernung von 100 km zwischen Lieferant und Hütte angenommen. Um kritische Verunreinigungen der Rohstoffe in den Transportgefäßen zu vermeiden, wird die Rückfahrt der Fahrzeuge als Leerfahrt in den Transportaufwand mit einbezogen. Zum Transport dienen die Eisenbahn und der Lastkraftwagen, meist in Form von Silofahrzeugen. Der Energieaufwand wurde bei beiden Transportmitteln mit 0,684 kJ/(kg km) angesetzt.

Aus den Angaben in den Tabellen 2 und 3 läßt sich der Gesamtenergiebedarf für die Rohstoffe zum

Tabelle 2. Rohstoffsätze für weißes und grünes Behälterglas in kg

Rohstoffe	Weißglas	Grünglas
Sand	565,7	137,4
Kalkstein (-spat)	124,2	17,9
Soda	124,8	28,9
Natronlauge (50 %)	31,2	9,1
Feldspat	39,8	—
Phonolith	—	13,0
Dolomit	65	33,2
Natriumsulfat	6,4	1,3
Chromerz	—	0,9
Eigenscherben	100	100
Fremdscherben	100	700
Gesamtgemenge	1 157,1	1 041,7

Tabelle 3. Gesamtenergiebedarf von Glasrohstoffen in Wh/kg bzw. kJ/kg

Rohstoff	elektr. Energie	Wärmeenergie	Bemerkungen
Sand	15,5	309	Gewinnung, Förderung, Naßaufbereitung, Trocknung
Kalk, Kalkspat, Feldspat	22	132	Gewinnung, Aufbereitung, Mahltrocknung
Dolomit	27	634	Gewinnung, Aufbereitung, Mahltrocknung
Phonolith	7,5	25,5	Gewinnung, Aufbereitung, Mahltrocknung
Soda	im Wärmeenergiewert enthalten	11 500 ¹⁾	Elektroenergie, Rohstoffe, Brennstoffe
Natronlauge (50 %)	im Wärmeenergiewert enthalten	11 000	Elektroenergie, Rohstoffe, Brennstoffe
Natriumsulfat [5]	80	395	Elektroenergie, Rohstoffe, Brennstoffe
Chromerz	20	130	geschätzt
Fremdscherben	5	—	Fremdscherbenaufbereitung
Transportaufwand	—	145	alle aufgeführten Rohstoffe einschl. Fremdscherben

¹⁾ Nach Auskunft des führenden Herstellers ist die Angabe in [2] zu hoch.

Tabelle 4. Gesamtenergiebedarf für die Bereitstellung der zum Erschmelzen von 1 kg Glas notwendigen Rohstoff- und Scherbenmengen

	Weißglasherstellung		Grünlasherstellung	
	elektr. Energie in Wh/kg	Wärmeenergie in kJ/kg	elektr. Energie in Wh/kg	Wärmeenergie in kJ/kg
Sand	8,77	174,8	2,12	42,3
Kalkstein, (-spat)	2,73	16,36	0,39	2,36
Soda	—	1 435,2	—	332,35
Natronlauge	—	343,2	—	100,1
Feldspat	0,87	5,23	—	—
Phonolith	—	—	0,1	0,3
Dolomit	1,75	41,2	0,9	21,1
Natriumsulfat	0,51	2,5	0,1	0,5
Chromerz	—	—	0,02	0,1
Fremdscherben	0,5	—	3,5	—
Transport	—	153,3	—	136,5
Summe	15,13	2 171,79	7,13	635,61

Erschmelzen von 1 kg Glas ermitteln (Tabelle 4). Es handelt sich dabei um das erschmolzene, noch nicht zum Glasbehälter verarbeitete Glas. Die Summenwerte der Tabelle 4 zeigen, daß die Rohstoffe zur Herstellung von Weißglas einen höheren Energieaufwand erfordern als die für Grünglas. Ausschlaggebend ist hier der hohe Anteil an Fremdscherben.

1.2. Gemengehaus und Transport des Gemenges innerhalb der Hütte

Im Gemengehaus wird das für die Einlage benötigte Gemenge aus den Einzelrohstoffen zusammengewogen und homogen gemischt. Der Energieverbrauch im Gemengehaus (nur Stromverbrauch) für Scherbenbrechen, Bunkern, Verteilen, Wiegen, Mischen und Transportieren zur Wanne ist von Hütte zu Hütte verschieden und bewegt sich zwischen 3 und 6 Wh/kg Glas. Es wurde mit einem Mittelwert von 5,5 Wh/kg Glas gerechnet. Auf die Gemengeeinlage bezogen ergibt sich daraus ein Wert von 4,8 Wh/kg Gemenge.

1.3. Schmelze und Läuterung des Glases

Der Energiebedarf für Schmelze und Läuterung des Glases stellt den größten Einzelposten des Gesamtenergiebedarfs für die Glasherstellung dar. Entsprechend dem Vorgehen der Chemie [1] werden für die Ermittlung des Energieaufwandes die derzeit wirtschaftlich optimalen Verfahren zugrundegelegt, die bereits in großtechnischem Maßstab betrieben werden, und nicht Mittelwerte, wie es in dem früheren Bericht [3] geschehen ist. Hinzu kommt, daß der verstärkte Scherbeneinsatz eine deutliche Verminderung des Energieaufwandes bewirkt hat.

Für eine moderne regenerativ betriebene Weißhohlglaswanne ergibt sich bei 20 % Scherbenzusatz ein Energieaufwand von 4 550 kJ/kg Glas. Für eine Grünhohlglaswanne mit 80 % Scherbenzusatz sind 3 930 kJ/kg Glas anzusetzen. Zur Erhöhung der Schmelzleistung wird bei Grünglas vielfach mit einer Elektrozusatzheizung gearbeitet, für die 62 Wh/kg Glas angesetzt werden können. Für den Betrieb der Ölpumpen und der Verbrennungsluftgebläse ist mit 2 Wh/kg Glas zu rechnen. Die Kühlung der Wannensteine erfordert 14 Wh/kg Glas. Für Vorherd und Speiser sind 2,5 Wh/kg Glas für die Gebläse und 300 kJ/kg Glas für die Beheizung anzusetzen.

1.4. Hohlglasmaschine

Zur Verarbeitung des Hohlglases dienen Maschinen, die nach dem Einzelstationenprinzip und dem Karussellmaschinenprinzip arbeiten. Im Mittel kann mit folgenden Energiebedarfswerten gerechnet werden: Maschinenantrieb 2 Wh/kg Glas, Arbeitsluft 40 Wh/kg Glas und 35 Wh/kg Glas für die Kühlluft.

1.5. Kühlöfen, Sortierung und Schrumpfofen

Der Mittelwert des Wärmeverbrauchs wurde mit 205 kJ/kg Glas ermittelt, der Stromverbrauch für Antriebe und Lüfter mit 11,8 Wh/kg Glas.

Für den Bereich Single-Liner, Sortierband, Palettiermaschine, Palettentransportbahn ergibt sich ein Stromverbrauch von 3,4 Wh/kg Glas.

Für Antrieb und Umwälzlüfter des Schrumpfofens wurden ein elektrischer Energieverbrauch von 0,75 Wh/kg Glas und ein Wärmeenergieverbrauch von 15 kJ/kg Glas ermittelt.

2. Kumulierter spezifischer Energieverbrauch für 1 kg verkaufsfähiges Behälterglas

Der Gesamtenergieverbrauch zur Herstellung eines Behälterglases läßt sich durch Summation der genannten Einzelposten ermitteln. Dabei muß beachtet werden, daß die Ausbeute des erschmolzenen Glases mit 92 % angesetzt werden kann, wenn die Produktion unter Kontrolle ist und ausreichend lange Laufzeiten gegeben sind. Von den 8 % Ausschuß fallen 4 % im Glasmachinesbereich und 4 % im Bereich der Sortierung an. Die genannten Energiedaten der einzelnen Produktionsphasen müssen somit mit $1 : 0,92 = 1,087$ multipliziert werden. Es ergeben sich damit die in Tabelle 5 zusammengestellten Daten. Der durch Heizung, Beleuchtung, Formenwerkstatt, Lager, Nebenanlagen bedingte sogenannte indirekte Energiebedarf kann mit 120 Wh/kg verkaufsfähiges Glas und der indirekte Brennstoffverbrauch mit 50 kJ/kg verkaufsfähiges Glas angesetzt werden.

Tabelle 5. Kumulierter spezifischer Energieverbrauch für 1 kg verkaufsfähiges Behälterglas

	Weißglas		Grünglas	
	elektr. Energie in Wh/kg	Wärmeenergie in kJ/kg	elektr. Energie in Wh/kg	Wärmeenergie in kJ/kg
Rohstoffe einschl. Scherben	16,5	2 360,7	7,75	690,9
Gemengebereitung und Transport, Schmelze, Läuterung, Verbrennungsluft, Wannenkühlung usw.	22,6	4 946	90,0	4 272
Vorherd, Speiser	2,7	326,1	2,7	326,1
Hohlglasmaschine	83,7	—	83,7	—
Kühlofen, Sortierung, Schrumpfofen	16,6	229,2	16,6	229,2
Summe Produktion und Rohstoff	142,1	7 862	200,75	5 518,2
indirekter Energiebedarf	120	50	120	50
Gesamtenergiebedarf	262,1	7 912	320,75	5 568,2

Um die beiden Energieträger elektrischer Strom und Wärme zu einem Wert zusammenfassen zu können, muß für die Stromerzeugung ein Wirkungsgrad eingeführt werden. Im Bereich der Chemie und der Kunststoffherzeugung wird mit verschiedenen Wirkungsgraden gerechnet. Bei Stromfremdbezug wird ein Wirkungsgrad $\eta_E = 38\%$ verwendet, bei Eigenstromerzeugung wird mit Hinweis auf die Kraft/Wärme-Koppelung mit 80% gerechnet. Beide Werte liegen unverhältnismäßig hoch. Um die angestrebte Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen, soll im vorliegenden Fall ebenfalls mit 38% gerechnet werden. Mit $1 \text{ Wh} = 3,6 \text{ kJ}$ ergeben sich als Äquivalenzwert für die notwendige Elektroenergie $2 483 \text{ kJ/kg}$ Glas und als Gesamtenergiebedarf für die Herstellung weißer Behältergläser und Flaschen $10 395 \text{ kJ/kg}$ verkaufsfähiges Glas; die entsprechenden Werte für Grünglas sind: Äquivalenzwert für die notwendige Elektroenergie $3 039 \text{ kJ/kg}$ Glas und Gesamtenergiebedarf $8 607 \text{ kJ/kg}$ verkaufsfähiges Glas.

Einzelne Glashütten betreiben unter Einsatz der Abwärme der Schmelzöfen eine Eigenstromerzeugung. Von dieser Seite her wäre dem Beispiel der Chemie folgend eine Gutschrift für den selbsterzeugten Strom oder eine Erhöhung des Stromwirkungsgrades gerechtfertigt. Von einer Berücksichtigung dieser Besonderheit soll hier vorerst abgesehen werden.

Tabelle 6. Spezifische Energieäquivalenzwerte verschiedener genormter Glasbehälter (Einweggläser)

Glasbehälter	Gewicht in g ²⁾	Volumen in l	kJ/l	goe/l
Weithalsflasche, drucklos [6] Weißglas ³⁾	370	1	3 846	97,29
Flasche, Kegelform [7] Weißglas ³⁾	490	1	5 093	128,8
Flasche, Standard II [8] Grün-/Braunglas ⁴⁾	195	0,33	5 086	128,7
Flasche, Standard III [9] Grün-/Braunglas ⁴⁾	300	0,5	5 164	130,63
Flasche, Dosenform [10] Grün-/Braunglas ⁴⁾	155	0,33	4 043	102,3
Essigflasche, drucklos Grün-/Braunglas ⁴⁾	185	0,33	4 825	122,1
	235	0,5	4 045	102,32
	280	0,75	3 213	81,3

²⁾ Die Gewichtsangaben in den Normblättern sind Obergrenzen, in der Praxis werden sie im Mittel um 10% unterschritten.
³⁾ $10 395 \text{ kJ/kg}$ Glas; ⁴⁾ $8 607 \text{ kJ/kg}$ Glas.

Tabelle 7. Spezifische Energieäquivalenzwerte verschiedener Glasbehälter (Mehrweggläser)

Glasbehälter	Gewicht in g	Volumen in l	kJ/l	goe/l
Milchflasche, drucklos Weißglas ⁵⁾	380	1	3 950	99,9
Bierflasche, Steinieform Grün-/Braunglas ⁶⁾	295	0,5	5 078	128,5

⁵⁾ $10 395 \text{ kJ/kg}$ Glas; ⁶⁾ $8 607 \text{ kJ/kg}$ Glas.

3. Bezug auf Abfüllvolumen und Angaben in Ölergieäquivalenten

Die Aufgabe eines Glasbehälters ist primär, ein bestimmtes Volumen einer Flüssigkeit aufzunehmen. Es empfiehlt sich daher, den Energieaufwand nicht auf die Gewichtseinheit des Packmaterials, sondern auf das Behältervolumen zu beziehen. In den Tabellen 6 und 7 sind für verschiedene, meist genormte Glasbehälter Energiewerte in kJ/l angegeben. Bei diesen Werten muß beachtet werden, daß die in der Praxis produzierten Glasbehälter im Mittel um 10% leichter sind, als die Norm angibt. Die Energiewerte sind damit entsprechend niedriger.

In neueren Veröffentlichungen wird die Angabe in Öläquivalenten (goe) empfohlen und nicht in kJ. In der Chemie ist es üblich, die Raffinerieprodukte

der Erdöldestillation mit einem Energieäquivalenzwert des 1,07fachen des unteren Heizwertes anzusetzen. Dieser Faktor berücksichtigt den Energieaufwand beim Transport des Rohöls und die Energieverluste in der Raffinerie. In [1] wird vorgeschlagen, diesen Verlustanteil gleichmäßig auf alle Raffinerieprodukte zu verteilen, was einer Bevorzugung des Naphtas und einer Benachteiligung des schweren Heizöls gleichkommt, da diese Produkte sich deutlich im Heizwert unterscheiden. Es wird hier vorge-

schlagen, mit dem für alle Rohölprodukte gültigen Heizwert des Rohöls von 42 300 kJ/kg Öl zu rechnen und mit dem Faktor 1,07 die Verluste zu berücksichtigen⁷⁾.

Eine Berechnung des Öläquivalenzwertes (Tabellen 6 und 7) ergibt Werte, die teilweise deutlich unter 100 goel/l liegen. Die Angaben in [2] sind, was das Glas anbelangt, um den Faktor 2 bis 3 zu hoch. Im Vergleich zur Kunststoffflasche schneidet die Glasflasche auch energiemäßig besser ab.

⁷⁾ Beim Arbeiten mit Öläquivalenten ist zu unterscheiden, ob das Öl als Rohstoff verwendet wird, wie dies in der Chemie vielfach der Fall ist, oder als Brennstoff, wie in der Hüttenindustrie. Beim Rohstoff müssen die Verluste durch Multiplikation des unteren Heizwertes mit 1,07, beim Brennstoff die Verluste durch Division mit 1,07 berücksichtigt werden.

4. Literatur

- [1] Kindler, H. und Nikles, A.: Energieaufwand zur Herstellung von Werkstoffen – Berechnungsgrundsätze und Energieäquivalenzwerte von Kunststoffen. *Kunststoffe* **70** (1980) S. 802–807.
- [2] Sammet, R.: Die Chemie in den achtziger Jahren – Aufgaben und Aussichten. Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt (Main) (1980).
- [3] Studie zum Energieinhalt von Produkten und rationellerem Energieeinsatz bei ihrer Herstellung. Teil 3. Ermittlung des kumulierten spezifischen Energieaufwandes zur Herstellung von Glasflaschen und Verpackungsgläsern. Erarbeitet von W. Trier und H. Schäfer unter Mitarbeit von H. J. Voss und M. Gossenberger. Frankfurt (Main): Hüttentechn. Vereinigung d. Dt. Glasind.; München: Forschungsstelle f. Energiewirtschaft 1975.
- [4] Lubisch, G. und Trier, W.: Energiebedarf bei der Herstellung von Behälterglas in Abhängigkeit vom Scherbenanteil. *Glastechn. Ber.* **52** (1979) S. 141–142.
- [5] Winnacker, K. und Küchler, L. (Hrsg.): *Chemische Technologie*. 3. Aufl., Bd. 2. Anorganische Technologie. München: Hanser 1970. S. 72.
- [6] Norm DIN 5077 (Juni 1977): Packmittel; Weithalsflasche aus Glas. Berlin: DIN 1977.
- [7] Normentwurf DIN 6194, Teil 2 (Januar 1981): Packmittel; Flaschen, Kegelform, leichte Ausführung. Berlin: DIN 1981.
- [8] Norm DIN 6195 (Juli 1978): Packmittel; Flaschen, Deutsche Form Standard II. Berlin: DIN 1978.
- [9] Norm DIN 6193 (Dezember 1980): Packmittel; Flaschen, Deutsche Form Standard III. Berlin: DIN 1980.
- [10] Norm DIN 6197 (August 1978): Packmittel; Flaschen, Dosenform. Berlin: DIN 1978. 82R1187