

## HVG-Mitteilung Nr. 2115

Ergebnisse des AiF ZUTECH Forschungsprojektes Nr. 158 Z  
„Referenzwerte“ für die Glasindustrie

Vortrag auf der gemeinsamen Sitzung der Fachausschüsse III und VI  
der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft am 11. Oktober 2006 in Würzburg

Anja Paukstatt, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, RWTH Aachen

### Einleitung

Im AiF ZUTECH Projekt Nr. 158 Z „Produktbezogene Referenzwerte zur Bestimmung von Emissionsintensitäten und zugehörigen Kostenreduktionspotenzialen in kmU“ wird ein Verfahren zur Bewertung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität erstellt. Jeweils bezogen auf die Produktionsmenge werden Referenzformeln für die Energie- und CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität ermittelt. Dabei wird in diesem Zusammenhang bei den Referenzformeln das (technische) Optimum betrachtet. D.h. für die Ermittlung der Referenzformel für die CO<sub>2</sub>-Emissionen wird eine hinsichtlich des Energiebedarfs und der Prozessführung optimierte Anlage innerhalb einer Kategorie zu Grunde gelegt.

Wichtig für jeden Vergleich ist die Schaffung einer geeigneten Basis. Daher werden die Anlagen zunächst sinnvoll kategorisiert. Ziel der Kategorisierung ist die Zusammenfassung von Anlagen, die ein vergleichbares Produkt erzeugen und für die jeweils die gleiche Referenzformel bezogen auf die Produktionsmenge gilt. Im Rahmen des Projektes werden Primärprodukte betrachtet. Für die Glasindustrie wird das Primärprodukt als die zur Verarbeitung bereitgestellte Glasschmelze definiert. Dabei steht die Anforderung einer möglichst geringen Anzahl von Anlagenkategorien der aus Anwendersicht notwendigen Differenzierung entgegen. Bei produktbezogenen Referenzformeln wird jede Produktgruppe einer eigenen Kategorie zugeordnet. Inwieweit diese Produktkategorien weiter unterteilt werden, hängt von der Relevanz der übrigen Einflussfaktoren auf den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen ab. Grundsätzlich rechtfertigen Einflussfaktoren die eine hohe Relevanz haben und eine entsprechende Bandbreite erzielen die Unterscheidung in weitere Kategorien.

Für alle Kategorien werden Einflussfaktoren auf den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Form von Variablen und Parametern berücksichtigt. Die Parameter können für einzelne Kategorien unterschiedlich sein. Die genaue Beschreibung der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (und ggf. die mathematische Darstellung) erfolgt bei der Bestimmung der Referenzformeln. Ergebnis des Projektes ist für jede Kategorie eine Gleichung für die Bestimmung des produktbezogenen Referenzwertes für den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### Einflussfaktoren auf den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen

Für die Glasindustrie werden kontinuierlich arbeitende Anlagen ab einer Schmelzkapazität von 20 t/d berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Bereitstellung der verarbeitungsgerechten Schmelze. Daher wird die Systemgrenze um die Schmelzaggregate ohne die Weiterverarbeitung der Glasschmelze gelegt. Die Speiserkanäle werden nicht in die Bilanz mit einbezogen. In das System treten die Rohstoffe sowie Endenergie in Form von Brennstoffen und eventuell elektrischem Strom ein. Die verarbeitungsgerechte Schmelze sowie die CO<sub>2</sub>-haltigen Abgase und Abwärme verlassen das System. Um die Referenzformeln für den Endenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für Anlagen der Glasindustrie zu entwickeln, werden zunächst die Einflussfaktoren auf diese Größen untersucht. Die wesentlichen Einflussfaktoren, die bei den Referenzformeln berücksichtigt werden, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Produkt	Produktgruppe Qualität
Rohstoff	Chemische Zusammensetzung Scherbenanteil
Energieträger	Einsatz von elektrischem Strom Emissionsfaktor
Technik	Technische Ausgestaltung Alter der Wanne
Betriebsweise	Auslastung

Tabelle 1: Übersicht der Einflussfaktoren auf den Endenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Glasindustrie.

### Kategorien für die Glasindustrie

Ausgehend von den Einflussfaktoren werden die Anlagen in Kategorien zusammengefasst. Ziel der Kategorisierung ist also die Zusammenfassung von Anlagen, die ein vergleichbares Produkt erzeugen und für die jeweils die gleiche Referenzformel bezogen auf die Produktmenge gilt. Dabei muss geprüft werden, inwieweit die Vergleichbarkeit von Anlagen gewährleistet ist, die unterschiedliche Werte für den gleichen Einflussfaktor haben. Ist die Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben, so sind die Anlagen in entsprechende Kategorien zu unterteilen. Inwieweit diese Kategorien weiter unterteilt werden, hängt von der Relevanz der Einflussfaktoren ab. Grundsätzlich rechtfertigen Einflussfaktoren, die eine entsprechende Bandbreite bezüglich des Energiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielen, eher die Unterscheidung weiterer Kategorien. Aber auch wirtschaftliche Kriterien müssen berücksichtigt werden. Die sich für die Glasindustrie ergebenden Kategorien sind in Tabelle 2 zusammengefasst dargestellt. Jedes Kreuz steht für eine eigene Kategorie.

	Wanne mit regenerativer Luftvorwärmung	Wanne mit rekuperativer Luftvorwärmung	Oxy-Fuel-Wanne
<b>Flachglas</b>	X		
<b>Behälterglas</b>	X	X	X
<b>Wirtschaftsglas</b>	X	X	X
<b>Verstärkungsglasfasern</b>		X	X
<b>Sonstiges Glas</b>	X	X	X

Tabelle 2: Übersicht der Kategorien in der Glasindustrie.

Die verschiedenen Produkte der Glasindustrie und damit auch ihre Schmelzen unterscheiden sich durch die eingesetzten Rohstoffe sowie durch die Qualitätsanforderungen. Diese produktabhängigen Größen haben einen erheblichen Einfluss auf den Endenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Glasherstellung. So wird eine Schmelzwanne zur Herstellung von Flachglas, welches im Float-Prozess hergestellt wird, anders konstruiert als eine Wanne zur Erzeugung von einfachem Behälterglas. Der produktbezogene Endenergiebedarf der Schmelzwannen dieser

beiden Produktgruppen ist unterschiedlich. Daher ist die Produktgruppe des hergestellten Glases ein wichtiges Kriterium für die Bildung der Kategorien.

Der Schmelzprozess stellt bei der Analyse des Endenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen den zentralen Produktionsschritt der Glasherstellung dar. Die eingesetzte Schmelztechnik hat dabei einen großen Einfluss auf den Endenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Prozesses. Für bestehende Anlagen kann ein Wechsel der eingesetzten Schmelztechnik, auch die Änderung der Luftvorwärmung, zwar technisch sinnvoll, jedoch aus wirtschaftlichen oder aus historischen Gründen (fehlender Bauraum) nicht möglich sein. Die Schmelztechnik ist daher als weitere feste Randbedingung anzusehen und wird nur in Ausnahmefällen wesentlich verändert, z.B. bei der Erneuerung einer Wanne oder bei der Errichtung eines neuen Standorts. Neben den Produktgruppen werden daher die Kategorien nach Wanne mit regenerativer Luftvorwärmung, Wanne mit rekuperativer Luftvorwärmung und Oxy-Fuel-Wanne differenziert.

### Referenzformeln für die Glasindustrie

Der Nutzenergiebedarf für die Glasproduktion entsteht in Form von Wärme und muss durch Endenergie bereitgestellt werden. Grundsätzlich kann dies durch Brennstoffe oder durch elektrischen Strom erfolgen. In der Praxis wird bei den hier betrachteten großen kontinuierlichen Anlagen Brennstoff verwendet und elektrischer Strom lediglich in geringem Umfang zusätzlich eingesetzt. Daher werden die Referenzformeln für die Bereitstellung des Wärmebedarfs aus Brennstoff entwickelt.

#### Referenzformel für den Brennstoffbedarf

Bei brennstoffbefeuerten Glaswannen entstehen Wärmeverluste, da das Gemenge von oben beheizt wird. Diese Wärmeverluste sind technisch nur begrenzt vermeidbar. Die Referenzformel für den Brennstoffbedarf für die Glasproduktion bestimmt sich aus dem tatsächlichen Brennstoffbedarf für die Glasproduktion bezogen auf den Massenstrom der Schmelze. Der tatsächliche Brennstoffbedarf wird in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren für den Einsatz der besten verfügbaren Technik und bei einer bestmöglichen Betriebsweise bestimmt und berücksichtigt die Verluste, die bei realen Anlagen auftreten. Diese Verluste sind auf die Einflussfaktoren für die technische Ausgestaltung, die Produktqualität, die Auslastung und das Alter des Schmelzaggregats zurückzuführen (Formelzeichen und Indices sind im Anhang zusammengestellt):

$$\text{REF}_{\text{E,GLA}} = \frac{1}{\eta_{\text{Tech,GLA}}} \cdot K_Q \cdot \frac{r_0}{r} \cdot (1 + \alpha \cdot \tau) \cdot \frac{\dot{E}_{\text{min,GLA}}}{\dot{m}_{\text{Schmelze}}}$$

Für brennstoffbefeuerte Glaswanne hängt der Wirkungsgrad  $\eta$  von der speziellen technischen Ausgestaltung ab, somit gilt für jede Kategorie ein eigener Wert. Die Qualitätszahl  $K_Q$  ist eine kritische und bisher nicht bestimmte Größe. Hier fehlen noch empirische Daten für die Qualitätszahl der einzelnen Kategorien. Bei der Bestimmung des Referenzwertes für den Brennstoffbedarf sind die Parameter Wirkungsgrad  $\eta_{\text{Tech,GLA}}$  und Alterungskoeffizient  $\alpha$  entsprechend der Kategorie festzulegen. Auch für den Scherbenanteil ist der typische Bereich einer Kategorie zu berücksichtigen.

#### Referenzformel für die CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bei der Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird zwischen den prozessbedingten und den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschieden. Prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen  $\dot{m}_{\text{CO}_2,\text{Pr}}$  entstehen

auf Grund der für den Prozess erforderlichen Zersetzung von kohlenstoffhaltigen Rohstoffen. Sie bestimmen sich somit aus den kohlenstoffhaltigen Rohstoffen  $i$  bzw. aus deren Massenanteil im Endprodukt  $w_i$  unter Berücksichtigung der jeweiligen molaren Massen  $M_i$ , der Anzahl der C-Atome  $v_{C,i}$  und eventuell einer Reaktionslaufzahl  $\zeta_i$ :

$$\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{Pr}} = \sum_i \zeta_i \cdot v_{C,i} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_i} \cdot \dot{m}_i = \dot{m}_{\text{Schmelze}} \cdot \sum_i \zeta_i \cdot v_{C,i} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_i} \cdot w_i$$

Die Darstellung zeigt, dass die prozessbedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen von der chemischen Zusammensetzung des Produktes abhängigen und ansonsten nur von der Produktionsmenge bestimmt werden.

Die energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen  $\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{E}}$  ergeben sich auf Grund der technischen Umsetzung aus dem Einsatz von Brennstoffen zur Deckung des Endenergiebedarfs. Sie berechnen sich aus dem Emissionsfaktor  $EF_{\text{Br}}$  des Brennstoffs (hier meist Erdgas und/oder Heizöl), dem Referenzwert für den Brennstoffbedarf  $REF_{\text{E, GLA}}$  und der erzeugten Glasschmelze. Der Referenzwert für den Endenergieeinsatz berücksichtigt dabei bereits einen möglichst effizienten Brennstoffeinsatz:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{E}} = EF_{\text{Br}} \cdot REF_{\text{E}} \cdot \dot{m}_{\text{Schmelze}}$$

Die Referenzformel für die gesamten  $\text{CO}_2$ -Emissionen  $REF_{\text{CO}_2}$  ergibt sich als Summe der prozessbedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen und der energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen bezogen auf die Produktionsmenge. Insgesamt ergibt sich die Referenzformel für die  $\text{CO}_2$ -Emissionen für die Produktion von Glasschmelze somit zu:

$$REF_{\text{CO}_2, \text{GLA}} = \sum_i v_{C,i} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_i} \cdot w_i + EF_{\text{Br}} \cdot REF_{\text{E, GLA}}$$

### Anwendung auf eine Beispielanlage

Die Referenzformeln wurden auf eine reale Anlage zur Herstellung von Flachglas angewandt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Referenzformeln die wesentlichen Einflussfaktoren berücksichtigen und die Besonderheiten der Glaswanne gut wiedergeben.

Problematisch war hierbei allerdings die Festlegung der Qualitätszahl. Derzeit existieren noch keine Anhaltswerte für Qualitätszahlen verschiedener Kategorien sowie Produkte. Daher wurde die Glaswanne zunächst energetisch bewertet und ausgehend von dieser Bewertung die Qualitätszahl festgelegt.

### Zusammenfassung

Die Referenzformeln für die Glasindustrie ermöglichen eine transparenten Darstellung des Energiebedarfs sowie die Identifikation der relevanten Einflussfaktoren auf Energiebedarf und  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Gegenüber den bisher bestehenden Zahlenwerten werden in den Formeln die wesentlichen Einflussgrößen berücksichtigt. Insbesondere die Qualitätsanforderungen an die Glasschmelze sowie das Wannentalter sind wichtige Faktoren, die durch die Referenzformeln in die Bewertung der Energieeffizienz einer Schmelzwanne einfließen.

Allerdings weist die Referenzformel für den Energiebedarf für die Glasindustrie mit der Qualitätszahl noch eine Unsicherheit auf. Die Quantifizierung der Qualität in Form der eingeführten Qualitätszahl muss noch erfolgen, hierfür fehlt derzeit eine ausreichende empirische Basis.

Nähere Informationen können in Kürze dem Abschlussbericht des Projektes entnommen werden. Dieser wird im Internet unter <http://top-energy.ltt.rwth-aachen.de/site/typo3/fileadmin/Download/Referenzwerte/B2-Glas-0612.pdf> zur Verfügung gestellt.

## Anhang

### Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	%/a	Alterungskoeffizient
E	kJ	Energie, Exergie
EF	kg/kJ	energiebezogener Emissionsfaktor
$K_Q$	-	Qualitätszahl
$\eta$	-	Wirkungsgrad
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
M	kg/kmol	molare Masse
$\nu_C$	-	Anzahl C-Atome
r	kg/(m <sup>2</sup> h)	Durchsatzrate
REF	kJ/kg bzw. kg/kg	Referenzformel
$\tau$	a	Alter des Schmelzaggregats
w	-	Massenanteil
$\zeta$	-	Reaktionslaufzahl

Index	Bezeichnung
Br	Brennstoff
C	Kohlenstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
E	Energie
i	Stoff i
min	minimal
Pr	Prozess
Tech	Technik, technisch