

Einfluss von Gasbeschaffenheitsänderungen auf den Glasherstellungsprozess - Teil 2: Ist eine Regelung mit dem Wobbe-Index möglich? –

B. Fleischmann, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V.,
Offenbach am Main

(basierend auf einem Vortrag vor den Fachausschüssen 2+4+6 der DGG am 09. Oktober 2013 in Jena)

1. Einführung

Bei Problemen mit der Verbrennung, verursacht durch Gasbeschaffenheitsänderungen, wird man meist auf die Möglichkeit einer Kompensation mit Hilfe einer Wobbe-Messung hingewiesen. Dabei stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Kompensation zur Verfügung:

- Konditionierung des Brenngases
- Regelungstechnische Verarbeitung des Wobbe-Index bei der Regelung der Verbrennung bzw. Wärmeübertragung

Bei der Konditionierung des Brenngases will man erreichen, dass die Brenngaseigenschaften durch Beimischung von entsprechenden Gasen konstant bleiben und so die Verbrennung problemlos und unter konstanten Randbedingungen betrieben werden kann. Die einfachste Art der Konditionierung ist das Verdünnen höher-kaloriger Brenngase, so dass ein in seinen Eigenschaften konstantes, aber niedrig-kaloriges Brenngas für den Verbrennungsvorgang zur Verfügung steht. Zur Verdünnung werden meist Stickstoff oder CO₂ genutzt, die sich verbrennungstechnisch neutral verhalten. Diese Methode wurde oder wird in der Glasindustrie mindestens an einem Standort in Deutschland zur Kompensation der Gasbeschaffenheitsschwankungen angewendet. Eine Konditionierung mit hoch-kalorigen Gasen zur stabilen Einstellung eines höheren Energiegehalts des Brenngases ist aufwendig sowie deutlich teurer und wird daher sehr selten umgesetzt.

Mit dem Einbinden des gemessenen Wobbe-Index in die Regelung des Verbrennungsvorgangs hat die Glasindustrie in Deutschland fast durchweg schlechte Erfahrungen gemacht. Die Frage ist also, ob eine Regelung der Verbrennung bzw. des Wärmeübergangs in das zu erwärmende Gut mit Hilfe des Wobbe-Index überhaupt möglich und sinnvoll ist.

2. Definition des Wobbe-Index

$$W_S = \frac{H_S}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{Brenngas}}}{\rho_{\text{Luft}}}}} = \frac{H_S}{\sqrt{d_r}} \quad (1a)$$

$$W_i = \frac{H_i}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{Brenngas}}}{\rho_{\text{Luft}}}}} = \frac{H_i}{\sqrt{d_r}} \quad (1b)$$

Die Gleichungen (1a) und (1b) geben die Definition der Wobbe-Indices wieder. Dabei ist bei den Angaben eines Wobbe-Index darauf zu achten, ob er mit Hilfe des Brennwertes (oberer Heizwert: H_S oder H_O) oder mit Hilfe des unteren Heizwertes (H_i oder H_U) gebildet wird. Von den Gaslieferanten wird in den allermeisten Fällen der obere Wobbe-Index W_S

angegeben, der mit Hilfe des Brennwertes errechnet wurde. Da der Brennwert bei industriellen Prozessfeuerungen fast nie eine technologische Bedeutung hat, sondern fast immer der Heizwert von Interesse ist, und damit der untere Wobbe-Index W_i , kommt es hier schon oft zu Missverständnissen bei Gesprächen zwischen Gaslieferant und Anwender.

Die relative Dichte d_r ist der Quotient aus der Dichte des Brenngases bei Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar (= hPa)) und der Dichte von Luft bei Normbedingungen.

Der Wobbe-Index stellt ein Maß für die Wärmebelastung einer Gasverbrauchsstelle dar. Die Wärmebelastung ist dabei maßgebend für den aus einer Gasdüse austretenden Energiestrom.

Betrachtet man den Brenn- oder Heizwert und seine physikalische Einheit (J/m³ bzw. J/kg), so erkennt man, dass es sich eigentlich um eine Energiedichte handelt. Dabei wird durch den Brenn- oder Heizwert die chemisch gebundene Energie des Brenngases beschrieben und im Fall von Brenngasen oft auf das Volumen bezogen. Sieht man sich Formel (1) nochmal genauer an, so wird bei der Berechnung des Wobbe-Index die Energiedichte auf die Dichte des Brenngases bezogen. Da bei der Berechnung des Wobbe-Index der Bezug auf die Dichte des Brenngases relativiert wird durch den Vergleich mit der Dichte der Luft, handelt es sich bei dem Wobbe-Index also um eine relativierte spezifische Energiedichte, wobei durch den Bezug auf die Dichte der Luft sich dies in den Einheiten nicht eindeutig widerspiegelt.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \dot{V} \cdot H_i \quad (2)$$

Die Wärmebelastung dQ/dt wird durch Formel (2) definiert: dabei ist dV/dt der Volumenstrom und H_i der Heizwert. Ist der Druck an der Brenngasdüse konstant, so kann man Gleichung (2) in (3) umwandeln.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \dot{V} \cdot H_i = \text{const.} \cdot W_i \quad (3)$$

Gleichung (3) gilt jedoch nur, wenn der Druck an der Gasaustrittsdüse konstant ist. Unter dieser Bedingung ist die Wärmebelastung der Gasverbrauchsstelle direkt proportional zum Wobbe-Index des Brenngases. Es gilt also, dass bei konstantem Wobbe-Index eine konstante Wärmebelastung der Gasverbrauchsstelle vorliegt und ein konstanter Energiestrom an chemisch gebundener Energie an der Gasdüse zu Verfügung steht, wenn der Druck an der Gasdüse konstant ist.

Zusammenfassend und in Kurzform gibt der Wobbe-Index also die relative spezifische Energiedichte der chemisch gebundenen Energie des Brenngases beim Eintritt in den Verbrennungsraum wieder!

3. Thermoprozessanlagen

Bei industriellen Thermoprozessanlagen ist die wesentliche Frage, wieviel thermische Energie (Wärme) für den technischen Prozess bzw. den eigentlich wichtigen Prozessschritt zur Verfügung steht. Die Wärmeübertragung, die nicht an einen Massenstrom gebunden ist, wird im Wesentlichen durch die Bedingungen des Prozesses bestimmt. Die Wärme ist somit eine Prozessgröße. Bezieht man die in einem System übertragene Wärme dQ auf das dazugehörige Zeitintervall dt , so erhält man die

zeitbezogene Größe des Wärmestroms dQ/dt mit der Einheit Watt. Wie an den physikalischen Einheiten leider nicht zu erkennen ist, beschreibt die Wärmebelastung bzw. der Energiestrom an chemisch gebundener Energie am Prozesseingang durch den Wobbe-Index nicht dasselbe, wie der Wärmeeintrag bzw. der Wärmestrom in das zu erwärmende Gut. Schon die Gleichsetzung, die in Formel (3) vorgenommen wurde, ist bei industriellen Thermoprozessanlagen nicht erlaubt, da üblicherweise der Gasdruck an der Düse zur Mengenregelung genutzt wird und somit nicht konstant ist.

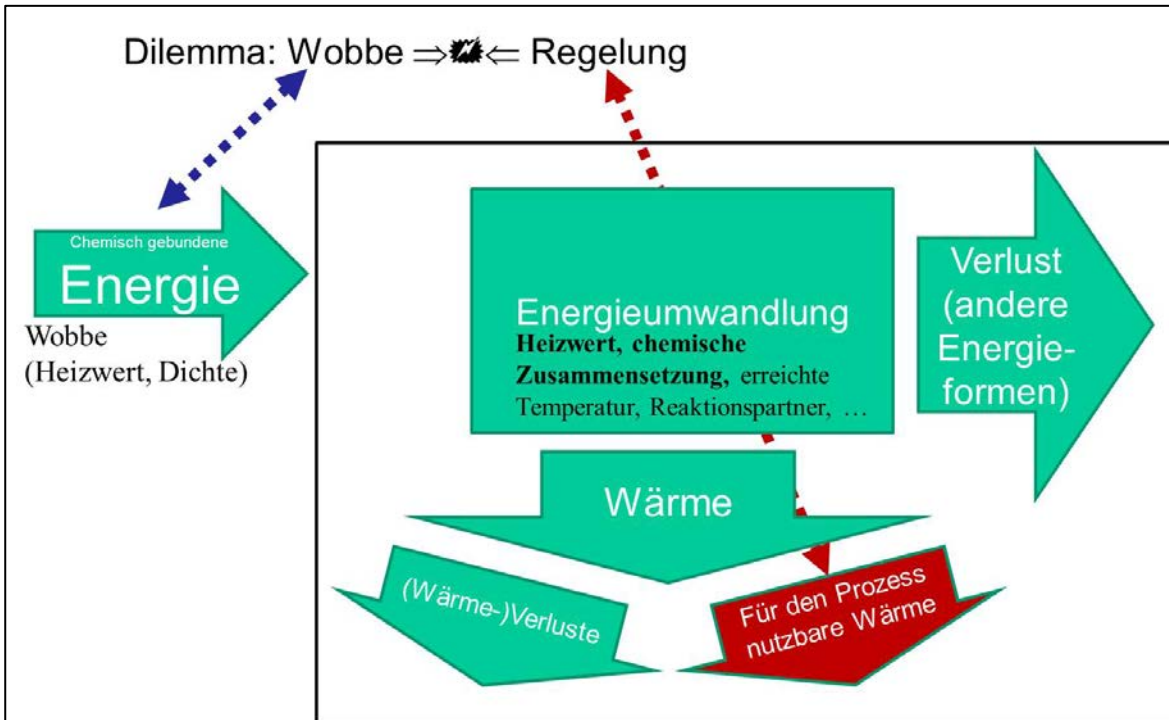


Bild 1: Aussagekraft der Wobbe-Zahl bei vielen industriellen Thermoprozessanlagen

Bild 1 verdeutlicht noch einmal, dass der Wobbe-Index und die für den Prozess nutzbare/benötigte Wärme zum Heizen, Schmelzen bzw. zum definierten Kühlen nicht direkt miteinander verbunden sind. Um die im Verbrennungsraum durch den Brennstoff zur Verfügung gestellte chemisch gebundene Energie nutzen zu können, muss diese in eine andere Energieform umgewandelt werden. Die Umwandlung von einer in eine andere Energieform ist immer mit (Umwandlungs-)Verlusten verbunden. Bei der Umwandlung der chemisch gebundenen Energie der Brennstoffe in Wärmeenergie (Strahlungswärme) wird z. B. ein sehr kleiner Teil der Energie in mechanische Energie (Schall) umgewandelt. Auch wenn bei der Verbrennung deutlich mehr als 90 % der chemisch gebundenen Energie in Wärme umgewandelt wird, steht diese nicht vollständig für den Erwärmungsprozess zur Verfügung. Ein Teil der entstandenen Wärme geht dann über Wandverluste, Kühlverluste, Wärmeinhalt der Abgase u.a.m. dem eigentlichen Prozess verloren. Wie viel Wärme wirklich dem Erwärmungs- bzw. Schmelzprozess und dem zu behandelnden Gut zur Verfügung steht, bestimmen die Prozessparameter und Randbedingungen. Bild 1 verdeutlicht noch einmal, dass der Wobbe-Index bei der Beschreibung des Wärmeeintrags in das Gut bzw. der für den technologisch wichtigen Prozess(schritt) nutzbaren Wärme keine Aussagekraft hat. Alle Regelungsvorgänge zur Prozessoptimierung zielen jedoch darauf ab, die für den Prozess nutzbare Wärme und den Wärmeeintrag ins Gut zu optimieren.

Schaut man auf die entsprechenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten, so sind es der Heizwert, die Brenngasdichte, der Sauerstoff- bzw. Luftbedarf, von denen der Energieeintrag ins Gut im Wesentlichen geprägt wird. Die Brenngaszusammensetzung und die erreichte Flammentemperatur bestimmen die im Abgas enthaltenen Bestandteile,

die sowohl einen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Abgases (Strahlungseigenschaften, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, ...) als auch auf die Menge und Gegenwart emissionstechnisch relevanter Bestandteile (CO , NO_x , SO_x , ...) haben.

Der Wobbe-Index ist außerdem eine reine Rechengröße und keine direkt zugängliche Messgröße. Gemessen werden der Brenn- oder Heizwert und die Brenngasdichte, zwei physikalische Eigenschaften des Brenngases, die auch einen direkten Einfluss auf die Verbrennung, die erreichten Temperaturen sowie die Wärmeeintragung ins Gut haben.

Die Rechengröße Wobbe-Index beschreibt auch nicht eindeutig das verbrennungstechnische Verhalten eines Brenngases. Die chemische Zusammensetzung eines Brenngases wird durch den Wobbe-Index nicht eindeutig definiert. Verschieden zusammengesetzte Brenngase können den gleichen Wobbe-Index besitzen und zeigen aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung unterschiedliches Verbrennungsverhalten: der Sauerstoff- bzw. Luftbedarf ist aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung in den allermeisten Fällen verschieden; die Flammentemperatur unterscheidet sich meist um einige Kelvin; die Flammenlänge stellt sich oft unterschiedlich ein. Auch hier kann man erkennen, dass der Wobbe-Index nicht ausreicht, um die Gasbeschaffenheitsschwankungen in einem industriellen Thermoprozess zu beschreiben und auszuregeln.

4. Zusammenfassung

Der Wobbe-Index kann für regelungstechnische Aufgaben zur Kompensation von Schwankungen der Gasbeschaffenheit bei industriellen Thermoprozessanlagen in den meisten Fällen nicht genutzt werden, da die verbrennungstechnisch relevanten Vorgänge nicht vom Wobbe-Index abhängen und die entsprechenden Größen im allgemeinen nicht mit dem Wobbe-Index gekoppelt sind oder lineare Korrelationen zeigen.

Vor allem wenn die Gasbeschaffenheitsschwankungen auf größere Änderungen der Brenngaszusammensetzung zurückgehen (Bsp.: Methangehalt nimmt ab und Ethan- oder Propangehalt nimmt mehr als 2 Vol.-% zu bei fast gleichbleibendem W_S) oder sogar neue Bestandteile hinzukommen (Bsp. Wasserstoff in der Größenordnung 0,5 Vol.-% oder mehr) kann mit Hilfe des Wobbe-Index keine verlässliche Aussage zur Verbrennung in Glasschmelzwannen oder Feedern oder Kühltöfen gemacht werden.

Um die Änderungen der Gasbeschaffenheit für Regelungsaufgaben zu erfassen bzw. zur Verarbeitung zur Verfügung zu stellen, sind neben der Heizwert- und Brenngasdichtebestimmung zusätzliche Eigenschaften der Brenngase und damit Messtechniken sowie Messwerte nötig. Je nach Prozess, angewandter Verbrennungstechnologie und der jeweiligen Regelungsaufgabe werden hierfür unterschiedlichste Sensoren, Messtechnologien und Analysenmethoden zum Einsatz kommen oder sogar noch entwickelt oder zumindest bestehende Systeme optimiert werden müssen.

5. Literatur

- [1] Wüning, J. G.; Milani, A.: Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen. Essen: Vulkan Verlag, 2007. ISBN 978-3-8027-2938-6
- [2] Schäfer, G.: Zusammenhang zwischen Wärmebelastung und Wobbe-Zahl. Gaswärme 13(1964)3, 107-114
- [3] Kastner, J.: Neue Aufgaben für die Gasbeschaffenheitsmessung in der industriellen Gasverwendung. GWF 154(2013)11, 834-842.