

1 Einführung

Seit der ersten Patentanmeldung eines Wirbelschichtreaktors zur Vergasung feinkörniger Kohle am 28. September 1922 von der damaligen I. G. Farbenindustrie [WINKLER 1922] hat sich das Wirbelschichtprinzip dank der Vielzahl immer neuer Reaktorkonzepte in vielen Produktionsverfahren der metallurgischen, chemischen und biochemischen Industrie durchgesetzt. Hauptursache hierfür ist die besonders intensive Gas-Feststoff-Wechselwirkung, die den Wärme-, Stoff- und Impulsaustauschprozessen sowie den chemischen Reaktionen zugrunde liegt. An dieser Stelle wird ein besonderes Augenmerk auf die blasenbildenden und die zirkulierenden Wirbelschichten gelegt.

1.1 Vor- und Nachteile der blasenbildenden und der zirkulierenden Wirbelschichten

Da blasenbildende Wirbelschichten bei Leerrohrgasgeschwindigkeiten unterhalb der Einzelkornsinkgeschwindigkeit betrieben werden, weisen sie einen geringen Feststoffaustrag und eine große Feststoffverweilzeit auf. Aufgrund der vorhandenen Gasblasen liegt eine fast ideale Feststoffdurchmischung über das gesamte Schichtvolumen vor [BARTHOLOMÉ 1972]. Allerdings tritt gleichzeitig im Falle einer mit einem Feststoff katalysierten Gasphasenreaktion eine unerwünschte Bypasswirkung auf, die den Gesamtumsatz des Reaktors merklich verschlechtert [MOLERUS -]. Als mögliche Einsatzgebiete seien die Kohlevergasung und die Feststofftrocknung zu erwähnen.

Mit Betriebsgeschwindigkeiten weit oberhalb der Einzelkornsinkgeschwindigkeit sind die zirkulierenden Wirbelschichten dagegen durch einen großen Feststoffaustrag charakterisiert. Dieser fällt entweder teilweise in Form von Clustern wieder intern in das Wirbelbett zurück oder wird am Kopf der Anlage ausgetragen, über einen Zyklon abgeschieden und mit Hilfe einer Rückführleitung wieder der Bodenzone zugeführt. Aufgrund der daraus resultierenden guten Stoff- und Wärmeübergangsbedingungen, der Möglichkeit, konstante Temperaturen innerhalb der Wirbelschicht einstellen zu können und des Fehlens bewegter Teile werden u.a. katalytische Reaktionen, Beschichtungs- oder Verbrennungsverfahren dort durchgeführt [DRY 1997]. Dabei erfolgt die Verweilzeitregelung des Gases durch die

Festlegung des Gasvolumenstroms, der Anlagenhöhe und des Anlagenquerschnittes. Die mittlere Feststoffverweilzeit wird dagegen durch die Festlegung des Feststoffdurchsatzes und -inventars reguliert. Bedingt durch eine große axiale interne Rückvermischung kann deshalb eine breite Verweilzeitverteilung des Reaktionsgases und des Feststoffs auftreten. Da weiterhin eine enge Beziehung zwischen der Verweilzeit des Katalysators und dessen Aktivität besteht, kann wiederum eine Deaktivierung des Katalysators wie beim FCC-Prozess (FCC = Fluid Catalytic Cracking) [AVIDAN 1997] oder seine irreversible Schädigung wie bei der Herstellung von Maleinsäureanhydrid durch partielle Oxidation von Butan (MSA) [CONTRACTOR 1999] auftreten.

Basierend auf der Tatsache, dass beide Systeme große Vor- und Nachteile aufweisen und dabei ähnliche Anwendungsbereiche abdecken können, ist ein neues Anlagenkonzept entwickelt worden, das eine große Feststoffverweilzeit mit einem guten Wärme- und Stoffaustausch kombiniert. Diese Problematik soll anhand des folgenden Beispiels erläutert werden.

1.2 Problematik der Herstellung eines Gemisches aus Schwelkoks und Eisenerzen für den Schmelzreduktionsprozess

Für die Durchführung des Schmelzreduktionsprozesses werden üblicherweise ein Gemisch aus Schwelkoks und Eisenerzen aus körnigen Kohlen und aus vorgewärmtem Eisenerz hergestellt. Dafür werden die Edukte in einen Schwelreaktor gegeben und in Gegenwart eines sauerstoffhaltigen Gases durch partielle Oxidation der Bestandteile der Kohle bei einem Temperaturbereich zwischen 700 bis 1 050°C in Schwelkoks umgewandelt [ORTH 2002]. Dabei werden die körnigen Feststoffe in wirbelnder Bewegung gehalten und aus dem oberen Bereich des Reaktors einem Feststoffabscheider zugeführt. Somit kann der Schwelreaktor als Wirbelschichtreaktor ausgebildet sein, wobei offengelassen wird, ob das Verfahren mit einer blasenbildenden oder zirkulierenden Wirbelschicht durchgeführt werden kann.

Um den Energiebedarf der Anlage möglichst gering zu halten, wird idealerweise das Eisenerz vor der Zufuhr zu dem Schwelreaktor mit den Abgasen des Feststoffabscheiders vorgewärmt. Die mit diesem Verfahren erzielbare Produktqualität, welche insbesondere von den Stoff- und Wärmeaustauschbedingungen abhängt, ist aber verbesserungsbedürftig. Im Falle der blasenbildenden Wirbelschicht ist dies vor allem trotz sehr großer einstellbarer Feststoffverweilzeiten auf den mäßigen Stoff- und Wärmeaustausch zurückzuführen. Weiterhin ist in diesem Prozess die Integration staubiger Gasströme wie z. B. aus der Produktkühlung besonders schlecht. Demgegenüber weisen zirkulierende Wirbelschichten aufgrund des höheren Fluidisierungsgrades zwar bessere Stoff- und Wärmeaustauschbedingungen auf, sind jedoch hinsichtlich ihrer Verweilzeit beschränkt.

Um die Vorteile der blasenbildenden Wirbelschicht mit denen der zirkulierenden Wirbelschicht zu verbinden, wurde der **Ringwirbelschichtreaktor (eng. Annular Fluidized Bed (AFB))** entwickelt [HIRSCH 1986] und von der damaligen Lurgi Metallurgie GmbH, jetzige Outotec GmbH, zum Patent angemeldet [u.a. ORTH 2004].

1.3 Prinzip des Ringwirbelschichtreaktors

Der Ringwirbelschichtreaktor besteht hauptsächlich aus drei wesentlichen Komponenten: die **Zentraldüse ZD**, die **Ringwirbelschicht RWS** und die **Wirbelmischkammer WMK** (Abbildung 1.1). Dabei wird die Mündung der Zentraldüse als Grenze zwischen den beiden letzteren Bereichen herangezogen.

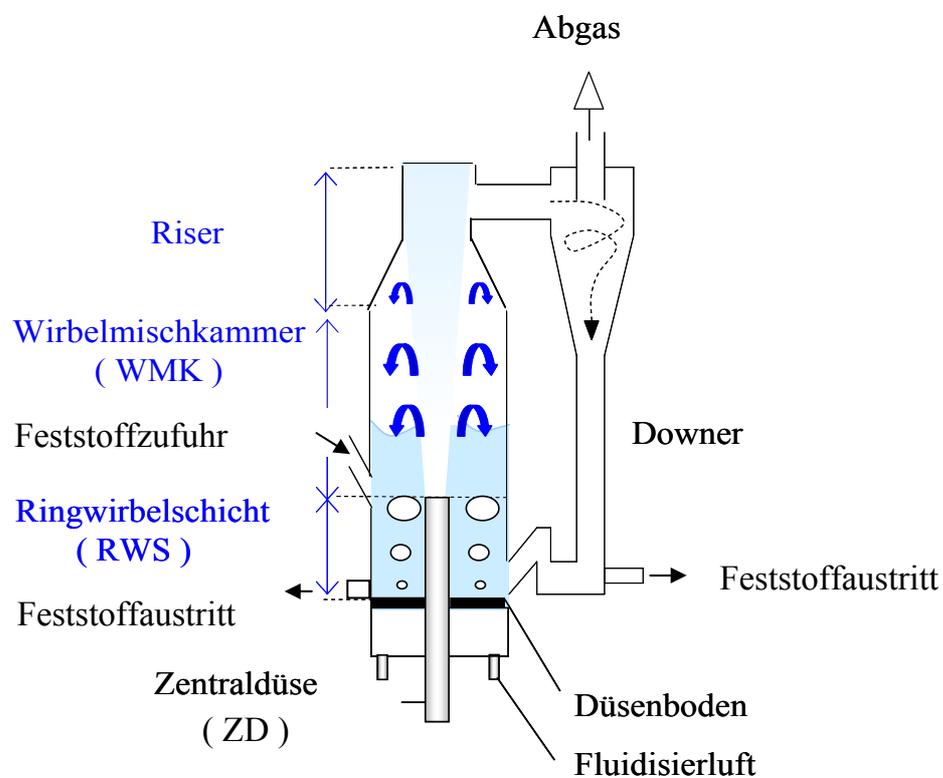


Abbildung 1.1 : Bereiche des Ringwirbelschichtreaktors

Das Gas wird der Anlage als Primär- und als Sekundärgas zugeführt. Die sekundäre Gaszufuhr erfolgt mittels einer vorzugsweise in der Anlagenmitte angeordneten Zentraldüse, die von einem Anströmboden umgeben ist. Durch die primäre Gaseinspeisung über den Anströmboden der Anlage ($u_{RWS} > u_{mf}$) in Form einer blasenbildenden Wirbelschicht wird der Feststoff, wie z. B. die Kohle, fluidisiert und in den Bereich der Zentraldüse eingemischt, wo er von dem Zentralgasstrom in die Wirbelmischkammer mitgerissen wird. Die Gasgeschwindigkeit in der Zentraldüse muss dabei größer als die Einzelkornsinkgeschwindigkeit des eingesetzten Bettmaterials $u_{ZD} > w_f$ sein, um einen Herabfallen von Feststoff

(Düsendurchfall) zu verhindern. Erreicht der Feststoff den Anlagenkopf, so kann er mit Hilfe eines Zyklons abgeschieden und mittels einer externen Rückföhrleitung im unteren Teil der Anlage neu eingespeist werden. Bei nicht ausreichender Impulsübertragung an den Feststoff fällt dieser an der Anlagenwand herab und wird intern rezirkulieren.

Dank des großen Einstellbereichs der Fluidgeschwindigkeiten in der Zentraldüse und im Ring einerseits und der einfachen Steuerung des Druckverlustes in der Wirbelmischkammer durch Produktabzug bzw. Eduktzugabe in der Ringwirbelschicht andererseits, ist das Verhältnis der internen zur externen Zirkulation erfahrungsgemäß leicht regelbar. Die Feststoffverweilzeit dagegen ist durch die Höhe der Ringwirbelschicht, d.h. durch die Höhe der Zentraldüse, steuerbar. Es können somit sowohl die **Vorteile der blasenbildenden Wirbelschicht**, wie eine **große Feststoffverweilzeit**, mit denen einer **zirkulierenden Wirbelschicht**, wie ein **guter Wärme- und Stoffaustausch**, vereinigt werden. Im Falle des betrachteten Beispiels bedeutet dies eine gute Ausnutzung der in dem Schwelreaktor eingebrachten Wärmeenergie verbunden mit einer hervorragenden Produktqualität [ORTH 2002].

1.4 Auslegungskriterium

Um einen besonders effektiven Stoff- und Wärmeaustausch in der Wirbelmischkammer und eine ausreichende Verweilzeit im Reaktor sicherzustellen, wurde als vorläufiges Auslegungskriterium zur Festlegung der unterschiedlichen Betriebsgeschwindigkeiten in der Anlage die dimensionslose **Partikel-Froude-Zahl Fr_p** herangezogen. Diese stellt das Verhältnis der Trägheitskraft des Fluids zu der um den Auftrieb reduzierten Gewichtskraft einer Partikel dar und wird folgendermaßen definiert:

$$Fr_p = \frac{u_{\text{Leer}}}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \cdot d_R \cdot g}} \quad (1.1)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass d_R nicht den Medianwert $d_{3,50}$ des zugeführten Materials bezeichnet, sondern für den mittleren Durchmesser des sich während des Reaktorbetriebs bildenden Reaktorinventars steht, der signifikant vom Ersten abweichen kann.

Erfindungsgemäß wurden bei der Herstellung von Schwelkoks Geschwindigkeiten derart eingestellt und patentiert, die Partikel-Froude-Zahlen von 1,15 bis 20 im Zentralrohr, 0,115 bis 1,15 in der Ringwirbelschicht und 0,37 bis 3,7 in der Wirbelmischkammer entsprechen (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Durch Patente geschützte Fr_p -Bereiche

Anlagenteil	Fr_p -Bereich bei der Schwelkoksherstellung	Maximaler Fr_p -Bereich bei anderen Verfahren
Zentraldüse	1,15 - 20	1 - 100
Ringwirbelschicht	0,115 - 1,15	0,02 - 2
Wirbelmischkammer	0,37 - 3,7	0,3 - 30

1.5 Weitere Anwendungen

Dank der allgemeinen Anwendbarkeit des Ringwirbelschichtreaktors kann das Konzept für andere Verfahren eingesetzt werden. Dazu zählen z. B. die Wärmebehandlung titanhaltiger Feststoffe [STOCKHAUSEN 2005] oder ähnlich schwerer Feststoffe.

Weiterhin, da der Hauptvolumenstrom (Sekundärgasstrom) durch eine große Zentraldüse der Anlage zugeführt wird, können auch mit heißen und problematischen Stoffen beladene Prozessgase behandelt werden. Diese würden im Falle eines klassischen Düsenbodens zur Verstopfung oder Erosion der Düsen führen oder beim Kondensieren zur Ansatzbildung und Verklebung in Abgaskanälen und Abhitzekesseln neigen [HIRSCH 1993]. Als mögliche Beispiele dafür seien die Schadstoffabtrennung z. B. von Alkalien und Chloriden bei der Zementklinkerung unter Ausnutzung des „Quencheffekts“ des Systems im Bypass zum Schwebegaswärmetauscher oder die Konditionierung von Abgasen und Integration in Gasreinigungsprozesse genannt, die mit brennbaren Adsorbentien wie Herdofenkoks arbeiten.

1.6 Scale-up Problematik

Wegen der Vielzahl der kommerziellen Anwendungen mit gegebenenfalls sehr unterschiedlichen Randbedingungen wurden **maximale Bereiche an Partikel-Froude-Zahlen** durch die Patente abgedeckt (Tabelle 1.1). Da aber die außerordentlich flexible Betriebsweise des Ringwirbelschichtreaktors durch ein mehrstufiges Regelkonzept mit zahlreichen nutzbaren Freiheitsgraden, wie die Geschwindigkeit in der Zentraldüse und in der Ringwirbelschicht, die Höhe der Zentraldüse u.a., gewährleistet ist, ist es umso schwieriger nur mit einem einzigen Kriterium die Anlage ohne Rücksicht auf den Düsendurchfall oder auf die Verteilung der internen zur externen Feststoffzirkulation auszulegen. Es ist deshalb erforderlich, andere Kriterien zu definieren, die den unterschiedlichen Systemanforderungen gerecht werden.

Eine möglichst detaillierte und systematische sowohl experimentelle als auch theoretische strömungsmechanische Charakterisierung des Ringwirbelschichtreaktors im Hinblick auf Scale-up zu Anlagen industrieller Größe stellt demgemäß die Grundlage für eine Verbesserung des Reaktordesigns sowie für eine wärme- und reaktionstechnische Modellierung bestehender und zukünftiger Prozesse dar.