

Effiziente Sinteranlagen für die Produktion von Ingenieurkeramik

Ausgehend von einer ganzheitlichen Definition von „Effizienz“ werden Konzepte und Prinzipien zur Realisierung und Weiterentwicklung hoch-

effizienter Sinteranlagen dargestellt und anhand konkreter Anlagen und Anwendungsfälle verdeutlicht. Weiterhin werden die derzeit aktuellen,

wesentlichen Entwicklungsrichtungen dargestellt, die zu weiteren Fortschritten bei der Effizienz moderner Sinterertechnologie führen werden.

Einleitung

In der keramischen Technologie dient der Prozessschritt „Sintern“ dazu, ein „Pulverhaufwerk“ zu einem mechanisch festen Körper zu konsolidieren. Dessen Eigenschaften werden ganz erheblich von diesem Prozessschritt bestimmt, das heißt, die Produktqualität hängt entscheidend vom Sintern ab. Das Sintern ist aber auch fast immer der energieaufwendigste Herstellungsschritt in der Prozesskette [1]. Er trägt erheblich dazu bei, dass allein für Prozesswärme ein Großteil der industriell eingesetzten Endenergie (ca. 68 %) benötigt wird [2]. Zudem ist die für das Sintern notwendige Anlagentechnik gerade im Bereich der Ingenieurkeramik oft technisch aufwendig und komplex. Diese kurzen Betrachtungen verdeutlichen bereits, welche große Bedeutung der effizienten Gestaltung des Prozessschrittes „Sintern“ zukommt. Aber was ist „effizientes Sintern“?

Effizientes Sintern – Einflussfaktoren

Laut Lexikon ist Effizienz „ein Maß für ein Ergebnis unter Berücksichtigung der eingesetzten Mittel“, mathematisch ausgedrückt also der Quotient aus Ergebnis und den eingesetzten Mitteln. Als „Ergebnis“ ist in diesem Zusammenhang, die Produktivität einer Sinteranlage zu sehen, die von folgenden Faktoren bestimmt wird:

- Chargengröße (Fassungsvermögen der Sinteranlage)
- Zykluszeit
- Chargierzeit
- Schichtbetrieb
- Ausschussquote
- Verfügbarkeitsgrad.

Bei den „eingesetzten Mitteln“ ist es keinesfalls ausreichend, allein den Kostenfaktor „Energie“ zu betrachten („Energieeffizienz“), auch wenn

dieser meist den größten Anteil ausmacht. Vielmehr setzt sich immer mehr eine ganzheitliche Betrachtung der „eingesetzten Mittel“ durch (TCO = Total Cost of Ownership bzw. LCC = Life Cycle Costing). Dabei werden im Wesentlichen folgende Faktoren berücksichtigt:

- Investitionskosten (Anlage, Brennhilfsmittel, Hilfsaggregate, Infrastruktur)
- Nutzungsdauer der Anlage
- Entsorgung der Anlagentechnik
- Raumbedarf
- Verbrauchskosten (Energie, Hilfsmedien wie Schutzgas, Kühlwasser etc.)
- Entsorgung evtl. Abgase/Abfälle
- Personalkosten
- Wartungs-, Reparatur- und Ersatzteilkosten (z. B. auch für Brennhilfsmittel)
- Kosten planmäßiger und ungeplanter Stillstände.

Die genannten Einflussfaktoren verdeutlichen, dass die Effizienz einer Sinteranlage ganz entscheidend von deren Auswahl und der genauen Abstimmung der Sinteranlagentechnologie auf den jeweiligen Anwendungsfall abhängt. Aus diesen Überlegungen entstand auch die Firmenstrategie der FCT Systeme GmbH [3]. Hier werden seit nunmehr fast 30 Jahren Sinteranlagen für die Ingenieurkeramik und Pulvermetallurgie nicht nur gebaut, sondern bereits sehr frühzeitig in der Projektierungsphase einer Anlage in enger Zusammenarbeit mit dem zukünftigen Anwender Technologieentwicklung im eigenen, aufwendig ausgestatteten Technikum betrieben [4]. Das kann von einfachen Machbarkeitsuntersuchungen nötigenfalls bis hin zu Pilotserien unter realen industriellen Randbedingungen gehen. Im Endergebnis kann der Anwender sicher sein, mit dem Gesamtpaket aus optimal abgestimmter Technologie und Anlagentechnik eine effiziente Sinterertechnologie zu erhalten.



Bild 1
Blick in eine Produktionshalle mit einer Vielzahl identischer, im „quasi-kontinuierlichen“ Betrieb arbeitenden Hochtemperatur-Sinteröfen

Bei dieser Entwicklungstätigkeit zeichnen sich einige Prinzipien und Trends ab, die für die Realisierung effizienter Sinterertechnologie besondere Bedeutung haben. Anhand einiger Beispiele sollen diese im Folgenden vorgestellt und erläutert werden.

Downsizing vs. Upscaling

Eine Kernaufgabe bei der Anlagenprojektierung ist die Realisierung der benötigten Produktivität. Dabei ist es oft, nicht zu empfehlen, mit einer einzigen großen Sinteranlage das gewünschte Ziel erreichen zu wollen. Häufig ist es günstiger, mit mehreren identischen kleineren Anlagen („Downsizing“) parallel zu produzieren. Kleinere Öfen haben niedrigere elektrische Anschlussleistungen aber im Allgemeinen auch deutlich kürzere Zykluszeiten, sodass die Produktivität, bezogen auf das Nutzvolumen, höher als bei großen Öfen ausfällt,

J. Hennicke, H. U. Kessel, R. Kirchner
FCT Systeme GmbH
D-96528 Rauenstein
www.fct-systeme.de

Bild 2
Eines der größten monolithischen Bauteile aus SiC, durch präzise Ofentechnologie mit hoher Form- und Maßgenauigkeit gesintert



Bild 3
Blick in das FCT-Technikum mit für den Kombiprozess ausgelegten Hochtemperaturöfen



Bild 4
Twin-Ofen für das Pyrolysieren und Silizieren von C/SiC-Bauteilen

und meist auch die Produktqualität besser ist. Weiterhin fallen Stillstandszeiten wesentlich weniger ins Gewicht. Arbeitet man mit einer größeren Anzahl von Öfen, so kann man durch geschickten zeitlichen Versatz der Ofenzyklen eine gleichmäßige Auslastung von Betriebspersonal, Strom- und Kühlwasserversorgung, Wartungsintervallen etc. und damit einen „quasi-kontinuierlichen“ Betrieb erreichen. Dieser Effekt wird von einigen Anwendern sehr erfolgreich genutzt. Bild 1 zeigt dazu den Blick in eine Produktionshalle, in der über 20 identische Hochtemperatur-

Kammeröfen arbeiten. Dieser Ofentyp hat ein Nutzvolumen bis zu 1,2 m³ und kann bei bis zu 2200 °C Arbeitstemperatur Schutzgasatmosphären (Ar, N₂, He etc.) im Druckbereich 5·10⁻² bis 1000 mbar realisieren. Durch ein spezielles Wärmetauschersystem werden kurze Abkühlzeiten möglich, trotz der – für den energieeffizienten Betrieb wichtigen – großzügigen Auslegung der thermischen Isolation.

Ein typisches Anwendungsgebiet solcher Öfen ist das Sintern von SiC-Massenprodukten, wie z. B. Dichtringe im Automotive-Bereich (Wasserpumpe) mit Stückzahlen von >20 000 pro 23-h-Ofenzyklus oder verschiedenste Bauteile aus dem Verschleißschutz- oder Ballistik-Bereich. Bild 2 zeigt als Beispiel eines der größten SiC-Bauteile, das bei einem Durchmesser von 600 mm und einer Länge von 1200 mm ein Gewicht von ca. 100 kg auf die Waage bringt. Durch die ausgesprochen gute, speziell für SiC optimierte Temperaturhomogenität im Ofen erreicht man trotz der Ausmaße hervorragende Maßtoleranzen, z. B. ±0,5 mm im Innendurchmesser, so dass die kostenaufwendige mechanische Nachbearbeitung auf ein Minimum reduziert werden kann.

Batch vs. Konti

Kontinuierlich arbeitende Öfen wie Rollenöfen oder Schubplattenöfen sind im Bereich der oxidierenden Brenntechnik aber auch im Bereich der Pulvermetallurgie schon lange Stand der Technik, wenn höchste Produktivität gefordert ist. In der Ingenieurkeramik muss jedoch häufig nicht nur bei sehr hohen Temperaturen (z. B. 1600–2500 °C), sondern auch in Schutzgasatmosphäre oder gar Vakuum, also bei sehr niedrigen, variabel einstellbaren und exakt kontrollierbaren Sauerstoff-Partialdrücken, gesintert werden. Diese Anforderung kann bei kontinuierlich arbeitende Öfen nur durch erheblichen technischen Aufwand realisiert werden und macht die Sinteranlagen teuer, komplex, schwer bedien- und wartbar sowie ausfallanfällig. Da auch kleine Kontiöfen bereits eine hohe Produktionsleistung haben, fehlt diese im Stillstandsfall auch vollständig, ähnlich wie im vorherigen Kapitel beschrieben bei einem einzelnen großen Batchofen. All diese Gründe sprechen aus Sicht der Verfasser in den meisten Anwendungsfällen eher gegen einen echten Kontiöfen. Viel-

mehr sollte man – wie im letzten Kapitel erläutert – mit einer größeren Anzahl kleinerer Batchöfen und zeitlich versetzten Sinterzyklen eine „quasi-kontinuierliche“ Anlagentechnologie verwenden, die durch die Diversifizierung im Ganzen betrachtet, wesentlich robuster, zuverlässiger und gleichmäßiger arbeitet.

Kombi-Prozess

Ein weiterer wichtiger Punkt zur Effizienzsteigerung kann das Zusammenfassen mehrerer Herstellschritte in der Prozesskette sein, hier z. B. die Kombination der Entbinderung und der Sinterung in einem einzigen Sinteraggregat. Hierdurch werden nicht nur alle für den Betrieb eines separaten Entbinderungs-ofens anfallenden Kosten eingespart, sondern darüber hinaus vermieden, dass die nach der Entbinderung mechanisch besonders empfindliche Ware beim Umsetzen vom Entbinderungs- in den Sinterofen beschädigt wird. Im FCT-Technikum stehen zwei großvolumige induktiv beheizte Hochtemperaturöfen für Kundenversuche zur Verfügung (Bild 3), die für diesen „Kombi-Prozess“ geeignet sind. Zur Entsorgung der bei der Entbinderung entstehenden organischen Dämpfe und Gase wird hier eine umweltgerecht arbeitende thermische Nachverbrennungsanlage („TNV“) verwendet (Bild 3, Bildmitte). Diese Öfen haben ähnliche Leistungsdaten, wie die in Bild 1 gezeigten Anlagen und sind ebenfalls mit Schnellkühlleinrichtungen ausgestattet, um über die verkürzten Abkühlzeiten eine Effizienzsteigerung zu erzielen.

Twin-Konzept

Beim Twin-Konzept ist der Gedanke der oben erläuterten „quasi-kontinuierlichen“ Betriebsweise einer größeren Anzahl von Öfen weiterentwickelt worden. Durch paarweise Zusammenfassung ist zwar nicht mehr jeder Ofen für sich autark, dafür können erhebliche Kosten eingespart werden, in dem Anlagensteuerung, Stromversorgung, Gas-/Vakuumversorgung, ggfs. TNV etc. pro Ofenpaar nur einmal oder nur teilweise vorhanden sind. Durch zeitlichen Versatz der Ofenzyklen hat ein solcher kostengünstiger „Twin-Ofen“ quasi die gleiche Produktivität wie zwei autarke Einzelöfen. Dieses Konzept hat sich in der industriellen Anwendung schon vielfach bewährt.



Bild 5 Keramische Brems scheiben aus C/SiC

Bild 4 zeigt beispielsweise einen für die Pyrolyse und Silizierung von C/SiC-Brems scheiben (Bild 5) eingesetzten Technikums-Twin-Ofen mit jeweils 400 dm³ Nutzvolumen, mit gemeinsamer Anlagensteuerung, Stromversorgung, Gas-/Vakuumversorgung und auch TNV. Für die Serienproduktion von C/SiC-Brems scheiben mit ca. 400 mm Durchmesser sind Kombi-Prozess-Anlagen im industriellen Einsatz, die im Batchbetrieb sowohl die Pyrolyse als auch die Silizierung von 80 Brems scheiben mit einer Zykluszeit von 23 h ermöglichen. Es laufen vielversprechende Entwicklungsarbeiten, diese Zykluszeit auf ca. 11 h zu reduzieren, was einen wichtigen Schritt hin zu einer wirtschaftlichen, breiter anwendbaren Silizierungstechnik darstellt.

Selbstverständlich kann man eine größere Anzahl von Twin-Öfen durch zeitlich versetzten Betrieb wiederum zu einer quasi-kontinuierlichen Sintertechnologie kombinieren. Auf diese Weise werden erfolgreich Dieselpartikelfiltern aus RSiC (Bild 7) in Serie produziert. Bild 6 zeigt den hierfür eingesetzten Twin-Ofen-Typ, der bei Temperaturen bis zu 2500 °C ein Nutzvolumen von jeweils 1,6 m³ bereitstellt (entsprechend ca. 1000 kg Ware) und dabei eine Zykluszeit von 23 h ermöglicht.

Druckunterstütztes Sintern

Bei manchen ingenieurkeramischen Werkstoffen lässt sich allein durch das Zuführen thermischer Energie keine ausreichende Sinterverdichtung erreichen. Beim „Gasdrucksintern“ oder „Sinter-HIP“ unterstützt ein allseitig wirkender Gasdruck die Konsolidierung, sobald das Bauteil in der ersten (drucklosen) Sinterphase sämtliche offene Porosität – zumindest an seiner Oberfläche – verloren hat. Für diese Sintertechnologie sind natürlich Öfen erforderlich, deren Behälter für den benötigten Gasdruck ausgelegt sind. Ein Beispiel für solche Anlagen ist der in Bild 8 dar-

gestellte Drucksinterofen, der bei Temperaturen bis zu 2200 °C die Sinterverdichtung mit einem Gasdruck von bis zu 100 bar unterstützen kann (Nutzvolumen 90 dm³). Derartige Öfen werden mit Nutzvolumina bis ca. 1000 dm³ gebaut. Typische Anwendungsgebiete sind LP-SiC oder Si₃N₄ (z. B. Schneidkeramik). Spezielle Ausführungen, die für den Kombi-Prozess ausgelegt sind, werden erfolgreich für das in einem durchgehenden Zyklus kombinierte Entbindern, Sintern in H₂-Atmosphäre und Gasdrucksintern von MIM-Massenprodukten eingesetzt.

Die Heipresstechnik kommt dann zum Einsatz, wenn 100 bar Gasdruck nicht ausreichen oder die offene Porosität sich – z. B. mangels Flüssigphase – nicht rechtzeitig schließt. Hier wird der zur Verdichtung benötigte Druck durch mechanische Stempel uniaxial in einem Presswerkzeug aufgebracht, was dieses Verfahren allerdings auf einfache Bauteilgeometrien beschränkt, andererseits einen vorhergehenden Formgebungsschritt (z. B. Trockenpressen) überflüssig macht. Die Heipresstechnologie ist bei FCT seit Beginn der Firmengeschichte kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert worden und hat schon seit längerem einen Stand erreicht, der einen zuverlässigen und effizienten Einsatz in der industriellen Produktion ermöglicht. Die in Bild 9 abgebildete Heipresse mit maximal 6000 kN Presskraft bei bis zu 2200 °C kann z. B. in einem 8 h-Zyklus sechs Scheiben aus Siliziumnitrid-Schneidkeramik mit 500 mm Durchmesser und 10 mm Dicke produzieren. Auch hier findet sich wieder eine spezielle Schnellkühlleinrichtung zur Erhöhung der Effizienz. Ähnliche Anlagen mit 9000 kN Presskraft sind bereits in der Planungsphase.

Eine Weiterentwicklung der Heipresstechnologie ist die vor ca. 7 Jahren von FCT auf den Markt gebrachte und mittlerweile auch im industriellen Umfeld erfolgreich eingesetzte FAST/SPS-Technologie, bei der der elektrische Strom statt durch das Presswerkzeug und das zu sinternde Bauteil läuft. So entstehen nur kleine Temperaturgradienten im Bauteil, die wesentlich höhere Aufheizraten zulassen. Auch ist die benötigte Temperatenausgleichszeit (Haltezeit) klein oder sogar Null. In vielen Fällen lässt sich zudem eine mehr oder weniger deutliche Verbesserung der Sinteraktivität durch



Bild 6 Twin-Ofen zur Serienproduktion von RSiC-Dieselpartikelfiltern



Bild 7 Dieselpartikelfilter für Nutzfahrzeuge aus RSiC



Bild 8 Drucksinterofen für bis zu 100 bar Gasdruck bei maximal 2200 °C

den direkt durch das zu sinternde Bauteil hindurchlaufenden elektrischen Impulsstrom feststellen. All dies reduziert die benötigte Prozesszeit, was die Energie- und Kosteneffizienz des FAST/SPS-Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Heipressen deutlich erhöht. Im industriellen Maßstab werden so z. B. rechteckige Sputtertargets aus binderfreiem Wolframkarbid

Bild 9
Heißpresse zur
Produktion von
Schneidkeramik
und Komponenten
für die Halbleiter-
technik



Bild 11 Zweikammer-FAST/SPS-Anlage zur hocheffizienten Produktion von Sputtertargets

tisch verdoppelt werden. Mit derartigen Anlagen, die auch mit 4000 kN Presskraft gebaut wird, gelingt z. B. die Massenproduktion von Sputtertargets mit 200 mm Durchmesser aus hochreinen Edelmetallen bei effektiven Zykluszeiten von nur noch 20 min.

Ausblick

Die dargestellten Beispiele effizienter Sinter-technologien lassen einen Trend erkennen, der sich zukünftig noch verstärken wird, nämlich die vermehrte Konzentration auf eine gezielte, exakt auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasste Entwicklung hocheffizienter Sinteranlagen. Dabei werden im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung von Produktivität und Kosten (Life Cycle Costing) sämtliche relevanten Einflussgrößen bei der Konzipierung der Anlagentechnologie von Anfang an mitberücksichtigt. Diese ganzheitliche Betrachtungsweise ist auch vermehrt das Thema von Verbundforschungsvorhaben [5], an denen auch FCT Systeme als Projektpartner mitarbeitet (z. B. [6]). Bei dem relativ neuen FAST/SPS-Verfahren ist ebenfalls noch erhebliches Innovati-

onspotential vorhanden, was im Rahmen mehrerer weiterer nationaler und europäischer Forschungsprojekte untersucht und bis zur industriellen Anwendungsreife entwickelt wird. Beispiele hierfür sind das Hybrid-FAST-Verfahren für das Sintern großflächiger Teile bei minimalen Temperaturgradienten, das „Hot-Ejection“-Verfahren für „Zero Expansion Materials“ oder zur Schnellst Kühlung sowie das „FAST²“-Verfahren, das eine Massenproduktion gesinterter Teile im Minutentakt erlauben wird.

Literatur

- [1] Beneke, F.: Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen. *GW* **58** (2009), Sonderheft Energieeffizienz, 7–11
- [2] Tzscheutschler, P.; Nickel, M.; Wernicke, I.; Buttermann, H. G.: Energieverbrauch in Deutschland. Stand 2006: Daten, Fakten, Kommentare. *BWK* **60** (2008) [3] 46–51
- [3] www.fct-systeme.de
- [4] Wachstum mit System. *cfi/Ber. DKG* **84** (2007) [6] D23–D25
- [5] BMBF/VDMA Innovationsplattform „Ressourceneffizienz in der Produktion“. www.effizienzfabrik.de
- [6] BMBF-Verbundprojekt „ENITEC“ – Effiziente Niederenergie Entbinderungs- und Sinter-technik in der Keramikherstellung. www.enitec.org



Bild 10
Beispiele für mit
FAST/SPS hergestellte
hochqualitative
Sputtertargets aus
unterschiedlichen
Materialien

(150 mm x 170 mm, Bild 10) bei über 2000 °C mit nur 35 min effektiver Zykluszeit hergestellt. Bild 11 zeigt eine semikontinuierlich arbeitende FAST/SPS-Produktionsanlage mit 2500 kN Presskraft, wie sie in der Industrie ebenfalls unter anderem für die wirtschaftliche Herstellung von Sputtertargets und Verbundwerkstoffen eingesetzt wird. Hier wurde das oben beschriebene Twin-Konzept noch einen Schritt weiter getrieben, indem an den Behälter direkt ein zweiter Behälter über eine Gas-/Vakuumschleuse angeflanscht wurde. Durch den vollautomatischen Transfer des heißen Presswerkzeugs in die Kühlkammer nach abgeschlossener Verdichtung kann die Taktfrequenz und damit die Kosteneffektivität dieser Anlagen im Vergleich zur Standardbauweise prak-