

Kurzzeitsintern zur kosteneffektiven Produktion und Werkstoffentwicklung

Zusammenfassung

Die Vorteile einer Sinterzeitverkürzung werden diskutiert und daraus die Motivation für analog zu den konventionellen Sintermethoden neuentwickelten Kurzzeitsinterverfahren abgeleitet. Weiterhin werden das Prinzip, die Vorteile, Möglichkeiten und Grenzen der unterschiedlichen Kurzzeitsinterverfahren aufgezeigt sowie die derzeit aktuellen wesentlichen Entwicklungsrichtungen dargestellt, die zu weiteren Fortschritten bei der Kosten- und Ressourceneffizienz von Produktion und Werkstoffentwicklung führen werden.

Einleitung

In der pulvermetallurgischen wie auch in der keramischen Technologie muss ein Pulverhaufwerk zu einem mechanisch festen Körper konsolidiert werden. Dies geschieht ganz überwiegend durch den Prozessschritt „Sintern“ (in der klassischen Keramik auch „Brennen“ genannt), während alternative Konsolidierungsverfahren wie „Infiltrieren“ und „Reaktionssintern“ eher selten Anwendung finden. Beim Sintern handelt es sich um einen Wärmebehandlungsschritt (evtl. unterstützt durch mechanische Kräfte) und damit fast immer auch um den energieaufwendigsten Herstellungsschritt in der Prozesskette [1]. Gleichzeitig kann man durch die Sinterparameter einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des fertig gesinterten Werkstoffes bzw. Bauteils nehmen [2, 3]. Aus beiden Blickwinkeln liefern moderne Sinterverfahren mit drastisch reduziertem Zeitbedarf neue Möglichkeiten in der Kombination von Kosteneffizienz und Bauteilqualität.

Motivation für Kurzzeit-Sinterverfahren

Die wichtigsten Sinterverfahren sind in Bild 1 entsprechend ihres Wirkprinzips aufgelistet: Wird lediglich thermische Energie zur Konsolidie-

Wirkprinzip	Konventionell	Kurzzeit
 TEMPERATUR	DRUCKLOSES SINTERN	FAST-Sint[®]
 TEMPERATUR  GASDRUCK	GASDRUCK-SINTERN SINTER-HIP	G-FAST-Sint
 TEMPERATUR  MECH. DRUCK	HEISSPRESSEN	FAST-SHS

Bild 1 Konventionelle Sintermethoden und analoge Kurzzeitverfahren nach Wirkprinzip

rung verwendet, spricht man vom „Drucklosen Sintern“, während beim „Gasdrucksintern“ oder „Sinter-HIP“ ein allseitig wirkender Gasdruck die Konsolidierung unterstützt. Wird der Druck dagegen von einem uniaxial auf das Bauteil wirkenden Stempel aufgebracht, spricht man vom „Heißpressen“.

Diese Sinterverfahren und die zugehörige Ofentechnologie haben sowohl in der Pulvermetallurgie als auch in der (technischen) Keramik einen hohen Entwicklungsstand erreicht und werden in Produktion und Werkstoffentwicklung erfolgreich eingesetzt.

Allerdings handelt es beim Sintern um einen sehr kostenintensiven Verfahrensschritt, sowohl wegen des hohen Energieverbrauchs als auch wegen der hohen Kosten der für das Sintern benötigten technisch anspruchsvollen Ofenanlagen [1]. Da Energie das Produkt aus Leistung und Zeit ist, führt eine zeitliche Verkürzung des Sinterprozesses auf direktem Wege zu niedrigeren Energiekosten. Zusammen mit der gleichzeitig gesteigerten Produktionsleistung der Ofenanlage erzielt man so eine signifikant verbesserte Kosten- und auch Ressourceneffizienz, wenn man das konventionelle Sintern durch ein Kurzzeitsinterverfahren ersetzt.

Ein mindestens ebenso wichtiger Aspekt bezieht sich aber auf die sich ausbildenden Werkstoff- und Bauteileigenschaften, die nicht nur durch Sinter Temperatur, -atmosphäre und evtl. Druckunterstützung, sondern auch durch die Sinterzeit ganz entscheidend beeinflusst werden. Während bei manchen Werkstoffen oder z.B. auch großen Bauteilen eine relativ lange Zeit zur homogenen Ausbildung der gewünschten Sinterdichte oder anderer Eigenschaften notwendig ist, gibt es aber auch viele Fälle, bei denen die Sinterzeiten konventioneller Verfahren zu eher unerwünschten Vorgängen wie Kornwachstum, Zersetzung, Phasenumwandlungen etc. führen. Gerade mit der wachsenden Verbreitung der Nanotechnologie stellt sich immer häufiger die Aufgabe, in minimaler Zeit eine optimale und homogene Konsolidierung zu realisieren [4].

H.U. Kessel, J. Hennicke, T. Kessel
 FCT Systeme GmbH
 96528 Rauenstein
 Germany

www.fct-systeme.de



Bild 2 Typische Pulverspritzguss-Bauteile für FAST-Sint®, ca. 20 mm Durchmesser
(Quelle: IKTS; links: 2K-Zahnrad, Design: Robert Bosch GmbH); rechts: Fadenstopper aus Edelstahl und Zirkoniumoxid, Design: Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH)

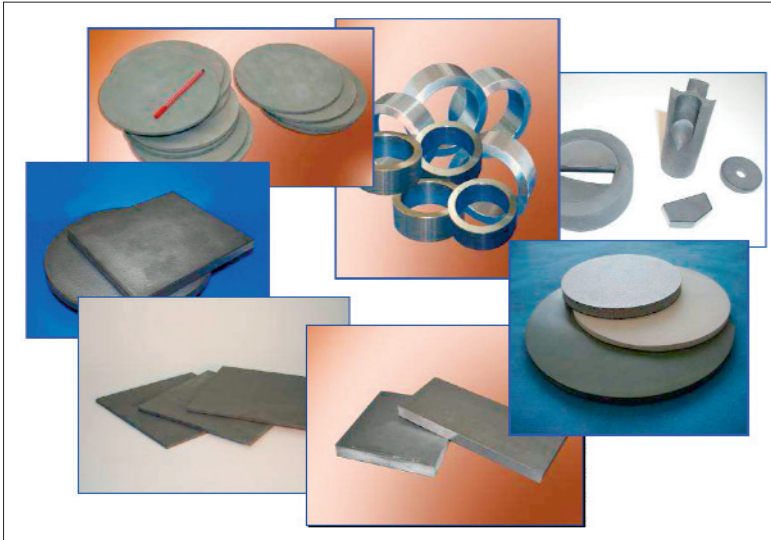


Bild 3 Typische Bauteile für FAST/SPS

Hieraus resultiert die Motivation, den bewährten „konventionellen“ Sinterverfahren, die in der dritten Spalte von Bild 1 aufgeführten äquivalenten Kurzzeitsintererntechnologien zur Seite zu stellen, die in der Lage sind, die dargestellten Vorteile sowohl für die Produktion pulvermetallurgischer und keramischer Bauteile als auch für die Entwicklung pulvermetallurgischer und keramischer Werkstoffe bereitzustellen.

Diese neuentwickelten Verfahren sollen im Folgenden kurz erläutert und Anwendungsbeispiele genannt werden.

FAST-Sint® Schnellsintererntechnologie

Als Analogon zum drucklosen Sintern, Gasdrucksintern und Sinter-HIP wurde die Schnellsintererntechnologie „FAST-Sint®“ entwickelt [5]. Diese

eignet sich speziell für kleinere trockengepresste oder spritzgegossene Bauteile (Bild 2), die aufgrund ihrer komplexen Geometrie nicht in einem FAST/SPS-Presswerkzeug hergestellt werden können. FAST-Sint® ist eine vollautomatisch arbeitende Sinteranlage mit einer speziell an das einzeln sinternde Bauteil angepassten Heizzelle. Durch diese Anpassung und die extrem niedrige thermische Masse sind äußerst präzise Heizvorgänge mit Heizraten bis über 1000 K/min möglich. Je nach Bauteilgröße, Wärmeleitfähigkeit und Sinterverhalten können Taktzeiten bis unter einer Minute realisiert werden, was natürlich ganz neue werkstoffliche Möglichkeiten (z.B. nanostrukturierte oder ungleichgewichtige Gefüge) bietet.

FAST/SPS

Ebenso wie beim konventionellen Heißpressen erfolgt bei FAST/SPS die Konsolidierung des Pulvers unter uniaxialen Druck von Pressstempeln in einer Pressform, was einerseits die Beschränkung auf relativ einfache Bauteilgeometrien (Bild 3) bedingt, andererseits einen vorhergehenden Formgebungsschritt überflüssig macht. Der hier mögliche hohe Pressdruck eröffnet weitere werkstoffliche Chancen, insbesondere in Kombination mit den gegenüber dem konventionellen Heißpressen drastisch verkürzten Sinterzeiten der FAST/SPS-Technologie [6]. Hierbei generiert ein elektrisches Feld (FAST = Feldaktivierte Sintererntechnik) einen Stromfluss direkt durch das Bauteil, sodass im Mikromaßstab ablaufende Prozesse (SPS = Spark Plasma Sintern) zu einer Aktivierung und Unterstützung des Konsolidierungsprozesses beitragen können [7]. Die direkte Beheizung des Bauteiles und speziell an Bauteilgeometrie und -werkstoff angepasste Presswerkzeugsysteme erlauben zudem eine Minimierung von Temperaturgradienten, was insgesamt die Herstellung hochqualitativer und homogener Bauteile in sehr kurzen Zeiten ermöglicht. FAST/SPS-Anlagen mit 50 bis 2500 kN Presskraft sind schon seit mehreren Jahren erfolgreich im Bereich Werkstoffentwicklung, Muster- und Kleinserienfertigung im Einsatz und werden nun auch mehr und mehr für echte industrielle Produktionsanwendungen eingesetzt [4, 8]. Dabei wird durch gezielte Weiterentwicklungen der FAST/SPS-Technologie kontinuierlich an einer weiter verbesserten Kosteneffizienz



Bild 4 Weiterentwicklungen der FAST/SPS-Sintererntechnik

und Bauteilqualität gearbeitet. Drei wesentliche Entwicklungsrichtungen sind in Bild 4 aufgelistet und werden im Folgenden kurz erläutert:

Hybrid-Heizung:

Hier geht es insbesondere um das ultraschnelle Sintern großflächiger Bauteile. Durch eine gezielte zusätzliche Beheizung des FAST/SPS-Werkzeuges von außen können die durch optimale Gestaltung des Presswerkzeuges minimierten Temperaturgradienten nochmals deutlich reduziert und eine nochmalige Steigerung der Heizraten realisiert werden. Sowohl die erwähnte Optimierung des Presswerkzeuges als auch die des Hybrid-Heizvorganges kann mittels Finite-Elemente-Simulation (Bild 5) erfolgen [9–12]. Bild 6 verdeutlicht den entscheidenden Einfluss eines optimal gestalteten Presswerkzeuges auf die Temperaturhomogenität des Bauteiles und die nochmalige Verbesserung durch Einsatz der Hybrid-Heiztechnik. Diese hervorragende Temperaturhomogenität während des gesamten Aufheiz- und Sinterprozesses führt in der Praxis zu einem Sinterintervall, das deutlich schmäler und bei niedrigeren Temperaturen verläuft (Bild 7) und so die Möglichkeit weiterer Zeit- und Energieeinsparungen eröffnet. Gleichzeitig resultiert ein Bauteil mit optimalen homogenen Materialeigenschaften.

Semi-Kontinuierlicher

Prozessablauf

Bei semi-kontinuierlich arbeitenden FAST/SPS-Anlagen werden mehrere Prozesskammern verwendet, sodass der eigentliche FAST/SPS-Sintervorgang vom – gerade bei größeren Bauteilen besonders zeitraubenden – Abkühlvorgang und evtl. auch vom Vorwärmvorgang zeitlich entkoppelt stattfindet und so eine Vervielfachung der Produktionskapazität erreicht werden kann. Bild 8 verdeutlicht das Prinzip anhand der Temperaturverläufe, wiederum für das bereits dargestellte Beispiel einer Wolframkarbidscheibe 200 mm Ø × 10 mm. Bereits mit einer relativ einfachen Zweikammer-Semikonti-Anlage kann der Zeittakt von 85 min auf 36 min reduziert werden.

Ultraschnelle

FAST/SPS-Technologie „FAST²“

Bei der Entwicklung von FAST²-Anlagen stand die Vision Pate, mit einer vollautomatisch arbeitenden Trockenpresse fertig gesinterte Teile produzieren zu können. Entspre-

chend ähnelt der Prozessablauf mit „Füllen“, „Abdecken“, „Pressen“ und „Ausstoßen“ dem konventionellen Trockenpressen, wird jedoch durch einen integrierten Sintervorgang nach dem Pressen ergänzt, der durch ein spezielles Presswerkzeugsystem, Leistungselektronik und die zugehörige Mess- und Regeltechnik realisiert wird und mit Heizraten von mehreren tausend Grad pro Minute arbeiten kann. FAST² eignet sich insbesondere für große Stückzahlen kleinerer Bauteile mit einfacher Geometrie.

Ausblick

Die dargestellten Arbeitsrichtungen in der Entwicklung von Anlagentechnologie für die Kurzzeitsinterntechnik zeigen einen Trend auf, der sich zukünftig noch deutlicher ausprägen wird, nämlich eine gezielte, von den Anwenderbedürfnissen getriggerte Weiterentwicklung der Kurzzeitsinterntechnik, präzise an spezielle Anwendungsfelder, Werkstoffe oder sogar ganz bestimmte Bauteile angepasst mit dem Ziel und der Wirkung, die Kosten- und Ressourceneffizienz der Herstellung von pulvermetallurgischen und keramischen, hochqualitativen Bauteilen – verglichen mit konventionellen Sinterverfahren – deutlich zu verbessern. Als Beispiel hierfür zeigt Bild 9 eine neuentwickelte 250-kN-FAST/SPS-Anlage.

Literatur

- [1] Beneke, F.: Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen. *GWI* **58** (2009), Sonderheft Energieeffizienz, 7–11
- [2] Kessel, H. U.; Hennicke, J.; Schmidt, J.; Weißgerber, T.; Kieback, B. F.; Herrmann, M.; Räthel, J.: Feldaktiviertes Sintern (FAST) – ein neues Verfahren zur Herstellung metallischer und keramischer Sinterwerkstoffe. *Hagener Symposium 2007*
- [3] Herrmann, M.; Schulz, I.; Shen, Z.: Nano-Si₃N₄ materials produced by SPS and conventional hot pressing. *Vortrag CIMTEC 2006*
- [4] Kessel, H. U.: Sintered materials on the way to production by means of modern SPS technologies. *cfi/Ber. DKG* **86** (2009) [10] E145–154
- [5] Kessel, H. U.; Hennicke, J.: Aspekte zum superschnellen Sintern von pulvermetallurgischen und keramischen Werkstoffen. *Keram. Z.* **59** (2007) [3] 188–191
- [6] Kessel, H. U.; Hennicke, J.: FAST/SPS-Schnellsinterntechnik und ihre Anwendung in Labor und Produktion. *Handb. Techn. Keram. Werkst.* (Hrsg. J. Kriegesmann), Kap. 3.6.7.1., Jan. 2010

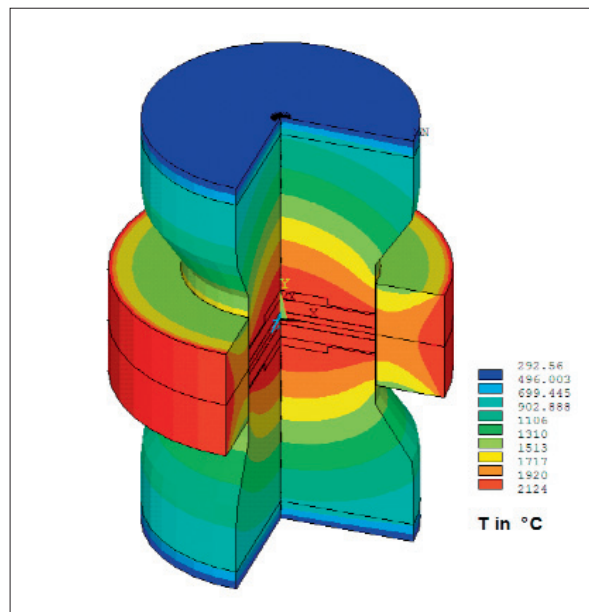


Bild 5 Temperaturverteilung in einem FAST/SPS-Presswerkzeug beim Sintern einer binderfreien Wolframkarbidscheibe 200 mm Ø × 10 mm mit 100 K/min bis 2100 °C (Finite-Elemente-Simulation)

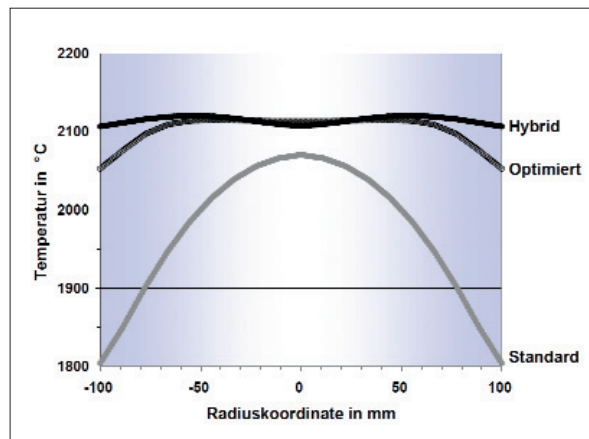


Bild 6 Homogenisierung der Temperaturverteilung im Bauteil aus Bild 5 durch Optimierung des Presswerkzeuges und Hybrid-Heiztechnik (Finite-Elemente-Simulation)

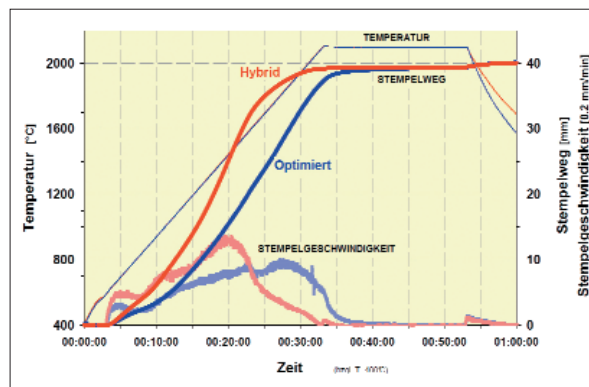
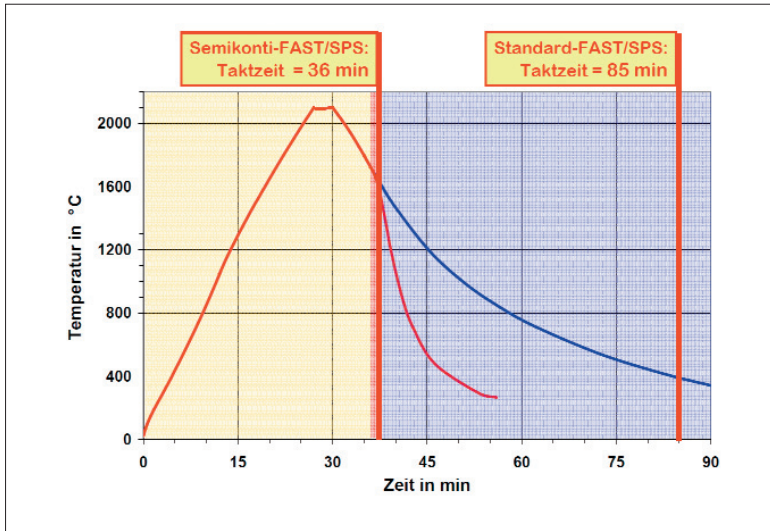


Bild 7 Verbesserung des Sinterverhaltens durch Hybrid-Heiztechnik beim Sintern von binderfreien Wolframkarbidscheiben 200 mm Ø × 10 mm (Vergleich realer Sinterzyklen)

Bild 8
Verkürzung der Taktzeit durch Entkopplung von Sinter- und Abkühlvorgang beim Sintern von binderfreien Wolframkarbidscheiben 200 mm Ø × 10 mm



- [7] Yang, D.; Conrad, H.: Enhanced sintering rate of zirconia (3Y-TZP) by application of a small AC electric field. *Scripta Materialia* **63** (2010) 328–331
- [8] Kessel, H. U.; Hennicke, J.; Kirchner, R.; Kessel, T.: Spark plasma sintering of novel materials – taking the next step towards industrial production. (ICACC-S8-060-2010). 34th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, American Ceramic Society, January 24–29, 2010, Daytona Beach, FL, USA
- [9] Laptev, A.; Vanmeensel, K.; Vleugels, J.; Van der Biest, O.: Modelling of the temperature distribution during and improvement of the SPS process. Proceedings of the 4th International Conference on Science, Technology and Applications of Sintering, 2005, Grenoble/FR, CD-ROM, 130–133
- [10] Vanmeensel, K.; Laptev, A.; Hennicke, J.; Vleugels, J.; Van der Biest, O.: Modelling of the temperature distribution during Field Assisted sintering. *Acta Materialia* **53** (2005) 4379–4388
- [11] Vanmeensel, K.; Laptev, A.; Hennicke, J.; Anné, G.; Vleugels, J.; Van der Biest, O.: Finite element simulation of field assisted sintering of WC-Co hardmetals. Proc. of 16th International Plansee Seminar 2005. Eds. G. Kneringer, P. Rödhammer and H. Wildner, vol. 2, HM9, (2005) 266–282
- [12] Sastry, K. Y.; Vanmeensel, K.; Froyen, L.; Vleugels, J.; Van der Biest, O.; Laptev, A.; Hennicke, J.: Simulation of temperature evolution during field assisted sintering of rapidly solidified Al-alloy powder. Euro PM2005 Powder Metallurgy Congress & Exhibition. Prague October 2005 (ISBN 1899072 18 7). EPMA, Vol. 1, 99–105

Bild 9 Neuentwickelte 250 kN FAST/SPS-Anlage