
1 Einführung

In der Sintertechnik werden durch Kompaktieren (meist mechanisches Pressen) eines Pulvers und Glühen (Sintern) unterhalb seiner Schmelztemperatur – bei mehrphasigen Systemen allenfalls unterhalb des Schmelzpunktes der am höchsten schmelzenden und basisbildenden Phase – Halbzeuge und Formteile hergestellt. Für keramische Materialien ist die Sintertechnik das dominierende Verfahren. Im Bereich der metallischen bzw. Metallbasis-Werkstoffe hat sich die Sintertechnik, deren zahlreiche technologischen und Werkstoff-Varianten hier unter dem Begriff *Pulvermetallurgie* (PM) zusammengefasst werden, auf bestimmten Gebieten – wie ein geschichtlicher Rückblick lehrt – wenn auch nicht stürmisch, so doch aber stetig entwickelt. Ihr Fortschritt und ihre Ausweitung auf neue Gebiete sowie das damit verbundene technische Interesse waren immer dann besonders ausgeprägt, wenn dringende Probleme der Werkstoffsubstitution, der wirtschaftlichen Bauteilherstellung und die Suche nach Werkstoffen mit speziellen Eigenschaftsprofilen anstanden.

Die großtechnische Anwendung der Pulvermetallurgie setzte – wenn man von den 1826 bis 1865 im zaristischen Russland geprägten Sinterplatinrubeln absieht – um 1900 in Verbindung mit der industriellen Erzeugung der hochschmelzenden Metalle Wolfram ($T_S = 3410^\circ\text{C}$) und Molybdän ($T_S = 2630^\circ\text{C}$), für die noch geeignete Schmelzeinrichtungen fehlten, ein. Das Hauptverdienst an dieser Entwicklung haben die Glühlampen- und Elektroindustrie, die größere Mengen an Drähten, Blechen und Bändern dieser Metalle und ihrer Legierungen benötigen. Die Ausgangsstoffe sind sekundäre Erzeugnisse, deren Eigenschaften durch die Herstellung beeinflusst werden können. Die spätere Erfindung des Vakuumlichtbogen- und Elektronenstrahlens, mit denen sich auch schwere Molybdän- und Wolframblöcke erschmelzen lassen, hatte nur einen vorübergehenden Rückgang der Produktion von Sinterwolfram und -molybdän zur Folge, da deren Feinkörnigkeit und Duktilität nicht erreicht werden konnten. Zum pulvermetallurgisch erzeugten Wolfram und Molybdän gesellte sich Ende der zwanziger Jahre, nachdem das Problem des Hochvakuuminterns gelöst war, das sehr chemikalienbeständige Tantal ($T_S = 3000^\circ\text{C}$). Seine hohe Löslichkeit für Gase, dank der es in der Elektronik als Getterwerkstoff Verwendung findet, stellte dabei eine zusätzliche Erschwernis bei der Gewinnung eines duktilen Materials dar.

Gleichfalls zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden in Gestalt der sog. Metallkohlen, die die gute elektrische Leitfähigkeit des Kupfers (oder Silbers) mit der hervorragenden Gleitfähigkeit des Graphits verbinden, die ersten Sinterverbundwerkstoffe in die Praxis eingeführt. Auch hierfür gab die Elektrotechnik im Zuge der

Entwicklung der Dynamomaschinen und Elektromotoren den Anlass. Damit treten neue Gesichtspunkte, die erst mehr als zwei Jahrzehnte später in größerem Umfang technisch umgesetzt werden, in den Vordergrund: Da in der Sintertechnik für das Zusammenführen verschiedener Komponenten z.T. andere Verträglichkeitskriterien gelten als in der Schmelzmetallurgie, ist es mit ihr möglich, nahezu beliebige Stoffe in einem Verbundgefüge zu gemeinsamer oder neuer Wirkung zu bringen. Das ist besonders dann von Bedeutung, wenn die Komponenten große Unterschiede in der Schmelztemperatur, keine oder nur geringe Löslichkeit im flüssigen Zustand sowie starke Unterschiede in der Dichte aufweisen, oder gar die Hartstoffkomponente vom flüssigen Metall angegriffen wird. In diesen Fällen ist es mit den Mitteln der Schmelzmetallurgie nicht gegeben, einen technisch brauchbaren Werkstoff zu erzeugen.

Nach 1920 folgten den Metallkohlen weitere wichtige Verbundmaterialien. Die als hochverschleißfeste Werkzeuge für die Zerspanungs- und Umformtechnik bekannten Hartmetalle auf WC-, WC-TiC- oder WC-TiC-TaC-Basis mit Co als Bindemittel sind heute ebenso wenig aus der Technik wegzudenken wie zahlreiche Kontaktwerkstoffe vor allem der Systeme Ag-Ni, Ag-SnO₂, Ag-CdO (dispersionsgehärtet), W-Ag, W-Cu und W-Ni-Cu oder die gleichfalls als Werkzeuge eingesetzten Diamant- und Bornitrid-Legierungen, d. h. in einer metallischen Matrix gebundene Pulver von superharten Stoffen.

Als Verbunde im weiteren – und auch physikalischen – Sinn müssen die Sinterwerkstoffe mit Poren- und Kapillargefüge angesehen werden. Ihre stärkere Entwicklung begann nach 1930 mit der Herstellung der sog. „selbstschmierenden“ Gleitlager auf Eisen- und Bronzebasis, die heute für wartungsfreie Geräte unentbehrlich geworden sind. Der Porenraum, der meist mit Öl getränkt ist, beläuft sich auf etwa 25%. Der Selbstschmiereffekt kommt durch das Wechselspiel von Kapillarkräften und Lagerdruck zustande. Auf Grund des in weiten Grenzen variierbaren Volumens und mittleren Durchmessers der Poren haben sich die porösen Sintermaterialien auch als Dichte, Diaphragmen und Filter feste Anwendungsgebiete gesichert. Letztere weisen gegenüber älteren Filtermaterialien den Vorteil auf, dass sie mit definiertem Porenraum herstellbar und plastisch verformbar sind sowie in korrosionsbeständiger Qualität geliefert werden können.

Spezielle Bedeutung erlangt haben die nach dem zweiten Weltkrieg entwickelten Eisen- bzw. Bronzebasisgleit- und -reibwerkstoffe mit vorzugsweise nichtmetallischen Zusätzen sowie einige für Hochtemperaturzwecke verwendete Oxid-Metall-Verbunde (Cermets), beispielsweise ZrO₂-Mo als Hüllmaterial für Temperaturmessfühler in Stahlschmelzen. Indes setzte mit den siebziger Jahren die Herausbildung einer zweiten Generation von Cermets ein, die sich nicht nur dank des technologischen Fortschritts durch ein feineres und gleichmäßigeres Gefüge, sondern auch durch die Verwendung spezieller Legierungen als metallische Bindemasse sowie einer Reihe nichtoxidischer Hartstoffe (Carbide, Boride, Nitride, Silicide und deren Mischphasen) gegenüber der ersten Cermets-Generation auszeichnet. Auf diese Weise konnte erhöhten Anforderungen an Hochtemperatur- wie auch Verschleißfestigkeit entsprochen werden. Da die Hartstoff-Metall-Ausgangspulvergemische der Verbundmaterialien häufig schwer verpressbar und die auf konventionelle Weise daraus gewonnenen Sinterkörper oft noch in unerwünschter Weise porös sind, war die Einbeziehung der unterdessen ausgereiften kalt- und

heißisostatischen Presstechnik der weitergehenden Nutzung von Verbundwerkstoffen zweifellos förderlich.

Die PM-Fertigung löst das Ur- und Endformen im wesentlichen mit ein- und derselben technologischen Operation: Vollautomatisiert und programmgesteuert durchgeführt erhält eine genau dosierte Pulvermenge durch Pressen bereits die Form des Finalerzeugnisses. Damit ist zwangsläufig eine abfallarme oder -freie Produktion bei hoher Materialausnutzung verbunden und fallen energie- und zeitaufwendige Fertigungsschritte weg. Gegenüber der spanenden Fertigung, dem Hauptkonkurrenten, ist in der Massenformteilerzeugung mit Sinterstahl, dem bedeutendsten Einsatzgebiet der PM, die Materialausnutzung mit rund 95% doppelt so hoch, wobei – je nach Art des Formteiles – der Energieaufwand nur etwa 30 bis 50% beträgt. Das trifft in ähnlicher Weise für die Ausgangsmaterialien zu: Die Erzeugung von 1 t Stabstahl beispielsweise erfordert im groben Mittel 3500 kWh, von 1 t druckwasserverdünsten Eisenpulvers 2130 kWh [1.1]. Diesen Vorteil gegenüber der spanenden Formgebung machten sich ab der Jahre 1935 bis 1940 in rasch zunehmendem Maße die Hersteller von Eisen- und Stahlgenauteilen zunutze. Unterdessen, insbesondere nach 1960, konnte diese Entwicklung durch wichtige Neuerungen bereichert werden: Die wirtschaftliche Gewinnung höchst- und superkompressibler sowie legierter und hochlegierter Pulver mit Hilfe der Druckwasser- und Inertgasverdüsung ließ im Verein mit geeigneten Verarbeitungstechnologien die Sintertechnik nun auch in das Gebiet der hochfesten Stähle und höchstfesten Legierungen vordringen. Der in mancherlei Hinsicht in seiner Qualität dem schmelzmetallurgisch hergestellten gleichen Stahl überlegene gesinterte Schnellarbeitsstahl hat seinen festen Standort im Erzeugnisspektrum erlangt. Verdichtungs- und Formgebungsverfahren, wie Strangpressen, Sinterschmieden oder Pulverspritzgießen, haben nicht nur die Arbeitsproduktivität weiter erhöht, sondern auch das Sortiment der angebotenen Produkte sowohl seitens des Formenreichtums als auch hinsichtlich der erschlossenen Werkstoffqualitäten merklich erweitert. Unter den letztgenannten verdienen vor allem Al- und Ti-Basis-Sinterwerkstoffe sowie die PM-Superlegierungen genannt zu werden.

Wie bei jeder Technikvariante stehen den genannten Vorteilen der PM auch restriktive Kriterien gegenüber, die bei der Wahl der Sintertechnik zu beachten sind. Trotz der ohne Zweifel erheblichen Fortschritte in der Pulvergewinnung sind die Pulver immer noch relativ teuer. Das gleiche gilt für die aus hochwertigen Stählen oder Hartmetallen hergestellten und für formkomplizierte Bauteile sehr komplex aufgebauten Presswerkzeuge. Weiter muss man bedenken, dass die Leistungsfähigkeit der Pressen bei Einhaltung wirtschaftlicher Kriterien nicht beliebig gesteigert werden kann. Das hat zur Folge, dass die Masse bzw. Größe der Formteile begrenzt ist. Bei nach der konventionellen Technologie hergestellten Formteilen beispielsweise beträgt die größte Flächenausdehnung ca. 250 cm² und die maximale Höhe etwa 60 mm. Gewisse Einschränkungen bestehen auch hinsichtlich der Formgestaltung (Kap. 8). Dennoch können, wenn Pulvermetallurge und Konstrukteur bereits von der Konzipierung eines Funktionsteiles an zusammenarbeiten, manche derartiger Hemmnisse durch meist geringfügige Gestaltsänderungen, ohne dass die Funktionstüchtigkeit des Teiles darunter leidet, mit Vorteil für den Hersteller aus dem Wege geräumt werden. In nicht unwesentlichem Ausmaß wirken sich auch die Kosten der Sinteranlagen einschließlich der zum Sintern erforderlichen Schutzgase oder Vakua auf die Preisbildung eines Sintererzeugnisses aus (Kap. 6). Des Genann-

ten wegen gilt die Regel: Je komplizierter die Gestalt, je höher die Genauigkeitsanforderungen und je teurer der Werkstoff, desto günstiger ist die Substitution durch Sinterbauteile, für deren Herstellung außerdem noch gewisse Mindestlosgrößen gewährleistet sein müssen [1.2].

Aus solchen Überlegungen folgt auch, dass aus gegenwärtiger Sicht die Pulvermetallurgie die Schmelzmetallurgie nicht in großem Umfang verdrängen kann. Die in den hochentwickelten Industrieländern (USA, Japan, Europa) insgesamt produzierte Metallpulvermenge, die zugleich auf die Größe der Sinterproduktion schließen lässt, liegt bei ca. 1 Million Jahrestonnen [1.3]. Einen großen Anteil nehmen die Genauteile ein, die bei ihrer Herstellung über pulvermetallurgische Prozesse durch die Einsparung von Arbeitsstufen, Material und Energie wirtschaftliche Vorteile gegenüber alternativen Fertigungsmöglichkeiten bieten. Hier steht die Pulvermetallurgie im unmittelbaren Wettbewerb, den sie vor allem in Bereichen mit großen Losgrößen, wie der Automobilindustrie, mit erheblichen Wachstumsraten erfolgreich besteht. Bei vielen anderen Sintererzeugnissen steht das nur oder besser über den dispersen Zustand einstellbare Gefüge und die dadurch erreichten Eigenschaften im Vordergrund. Zu den bereits aus der modernen Industrie nicht mehr wegzudenkenden Spezialwerkstoffen, wie Hartmetallen, Kontakwerkstoffen, Friktions- und Antifriktionswerkstoffen, porösen Materialien usw., kommen durch erhöhte Anforderungen im Werkstoffeinsatz, aber auch durch die Entwicklung neuer pulvermetallurgischer Verfahren ständig weitere Einsatzfälle von Sinterwerkstoffen hinzu. So bieten dispersionsverfestigte oder nanostrukturierte Werkstoffe, Gradientenwerkstoffe, über unterschiedliche Verfahren pulvermetallurgisch hergestellte Metallmatrix-Verbundwerkstoffe und hochporöse, zellular aufgebaute metallische Werkstoffe innovative Lösungen für die Entwicklung oder Verbesserung technischer Systeme an. Neue Verfahrenstechniken, wie die Erzeugung von Nanopulvern, das Sprühkompaktieren, das Hochenergiemahlen, Mikrowellen- oder Spark Plasma Sintern (SPS), um nur einige zu nennen, werden intensiv gerade im Hinblick auf die Einstellung ungewöhnlicher Werkstoffzustände, -strukturen und -gefüge untersucht, um weitere Möglichkeiten zu erschließen. Zeigt bereits der Wert der Erzeugnisse eine größere Bedeutung der Pulvermetallurgie, als die Tonnage aussagt, so sind die Wirkungen auf die Technik noch weitaus höher einzustufen, da die aus Sinterwerkstoffen erzeugten Produkte oft für die Funktion der technischen Systeme eine Schlüsselposition einnehmen. Mit den steigenden und immer komplexer werdenden Anforderungen an die Werkstoffe bei der weiteren technischen Entwicklung wird deshalb auch die Bedeutung der Pulvermetallurgie weiter wachsen, auch wenn, gemessen am Produktionsvolumen, sie stets ein Spezialgebiet bleiben dürfte.

Literatur zu Kapitel 1

- [1.1] *Zapf, G.*: VID-Berichte Nr. 227 (1977) 207
- [1.2] *Lindskog, P.*: Powder Met. Int. 25 (1993) 138
- [1.3] *Capus, J.M.*: Metal Powders – A Global Survey of Production, Applications and Markets 1996–2005, Third Edition; Oxford, Elsevier Advanced Technology 2000