

# Pulvermetallurgie

Von Prof. Dr. G. F. HÜTTIG und Dr. R. KIEFFER\*

## I. Teil: Derzeitiger technischer und wirtschaftlicher Stand der Pulvermetallurgie

Von R. KIEFFER, Metallwerk Plansee, Reutte/Tirol

Der geschichtlichen Entwicklung der Pulvermetallurgie entsprechend wird zunächst ihre wirtschaftliche und technische Bedeutung behandelt. Das Gebiet gewinnt, besonders durch die steigende Verwendung von Titan, Molybdän, Zirkon u. a. bisher wenig benutzten Metallen, an Interesse. Sinterstoffe haben sich für zahlreiche Spezialaufgaben gut bewährt.

In Bezug auf ihr Verhältnis zur wissenschaftlichen Forschung sind zwei chemische Industriegattungen zu unterscheiden. Die eine ist aus der wissenschaftlichen Forschung geboren worden und hat von dort die Aufgabenstellung und deren prinzipielle Lösungsmöglichkeiten erhalten. Beispiele hierfür sind etwa die Teerfarben-Industrien, die elektrochemischen Industrien und die Ammoniak-Synthese. Andere Industrien sind aus wirtschaftlichen Bedürfnissen rein empirisch entwickelt worden und befruchteten erst eine spätere wissenschaftliche Forschung mit ihrer praktisch bereits befriedigend gelösten Problematik. Beispiele hierfür sind die Zement-, Glas- und Zucker-Industrie und auch die erst während des letzten Krieges zu hoher Entwicklung und Bedeutung gelangte Pulvermetallurgie.

Es ist also auch sinnvoll bei einer kurzen Kennzeichnung der heutigen Pulvermetallurgie zuerst die technologischen und wirtschaftlichen Belange in den Vordergrund zu stellen und erst anschließend einige Streiflichter auf die sich daran knüpfende, sehr reiche und mannigfaltige wissenschaftliche Problematik zu setzen.

Es seien zunächst die charakteristischen Merkmale der Verfahrenstechnik hervorgehoben. Die Pulvermetallurgie stellt Metallgegenstände her, indem sie von dem nach verschiedenen Verfahren hergestellten metallischen Pulver oder Pulvergemisch ausgeht, dieses in die gewünschte Form

preßt und dann auf eine Temperatur bringt, welche unterhalb des Schmelzpunktes liegt, wobei durch dieses sog. Sintern die gewünschte Festigkeit zustande kommt (Bild 1). Solche Erzeugnisse können im Gefüge fehlerfreier als gegossene Stücke sein und die Einhaltung der vorgeschriebenen Maße kann präziser und ohne nennenswerte, insbesondere spanabhebende Nachbearbeitung erfolgen.

Bei hochschmelzenden Metallen, wie Wolfram und Tantal, und ähnlich auch bei vielen durch ihre Härte interessierenden Carbiden der Übergangselemente, wie z. B. bei dem im Schmelzfluß zerfallenden Wolfram-monocarbid, kommt eine Herstellung auf dem Wege über die flüssige Phase überhaupt nicht in Betracht. Eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten gründet sich auf die Porosität der Sinterkörper (z. B. selbstschmierende Lager), auf die hohen Koerzitivkräfte, die man den Eisen-Sinterlingen verleihten kann, auf die spezifisch neuen Eigenschaften, welche die innigen Gemische von ansonsten auch nicht legierungsfähigen Metallen annehmen können, u. a. m. Demgegenüber muß die Beschränkung auf die Erzeugung von Gegenständen mit kleinen Dimensionen und nicht zu komplizierten Formen und die im Vergleich zu den gegossenen Stücken meist etwas geringeren mechanischen Festigkeiten als Nachteile vermerkt werden.

Die Literatur über die Pulvermetallurgie ist in dem letzten Jahrzehnt mächtig angewachsen. Es sei auf die zusammenfassenden Werke von F. Skaupy<sup>1)</sup>, W. D. Jones<sup>2)</sup>, R. Kieffer und W. Hotop<sup>3), 4)</sup>, P. Schwarzkopf<sup>5)</sup> und das dreibändige Werk von C. G. Goetzel<sup>6)</sup> hingewiesen. In England und den USA erscheinen Spezialfachzeitschriften<sup>7), 8)</sup>, und zahlreiche nationale und internationale Konferenzen<sup>9)</sup> hatten die Pulvermetallurgie zum ausschließlichen Verhandlungsgegenstand. Im Nachfolgenden soll versucht werden, die derzeit aussichtsreichsten technischen und wissenschaftlichen Entwicklungsrichtungen kurz zu skizzieren.

### Wirtschaftliche Bedeutung

Bei einer Übersicht über den Stand der Pulvermetallurgie muß man sich vor Augen halten, daß die Sintertechnik derzeit nur ein verhältnismäßig kleiner Bedarfsträger für Metallpulver ist und die Hauptmengen von Metallpulvern,

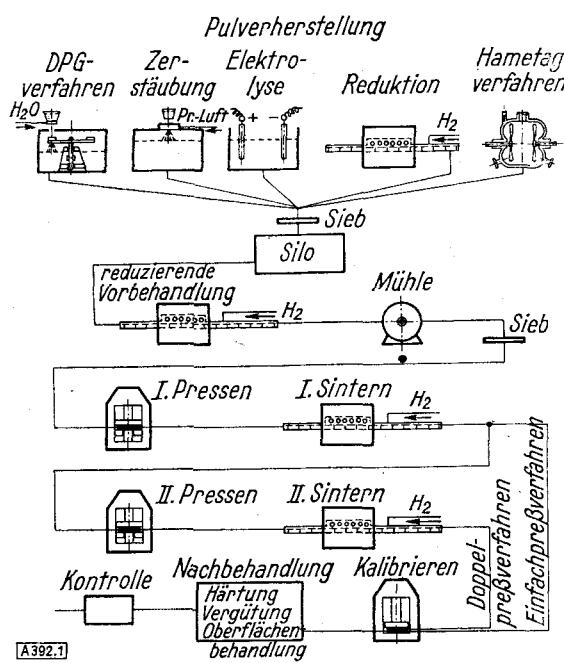


Bild 1

Schematische Darstellung der Fertigung eines Formteiles nach dem Sinterverfahren

\*) Plenar-Vortrag auf der Hauptversammlung der GDCh, Köln 26. 9. 1951.

<sup>1)</sup> F. Skaupy: Metallkeramik, 4. Aufl., Verlag Chemie, Weinheim-Bergstraße 1950.

<sup>2)</sup> W. D. Jones: Principles of Powder Metallurgy, E. Arnold, London 1937.

<sup>3)</sup> R. Kieffer u. W. Hotop: Pulvermetallurgie und Sinterwerkstoffe, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin 1948.

<sup>4)</sup> R. Kieffer u. W. Hotop, H. J. Bartels u. F. Benesovsky: Sinter-eisen und Sinterstahl, Springer Verlag Wien 1948.

<sup>5)</sup> P. Schwarzkopf: Powder Metallurgy, Its Physics and Production, Macmillan, New York 1947.

<sup>6)</sup> C. G. Goetzel: Treatise on Powder Metallurgy, Vol. I, II, Interscience Publ., New York 1950.

<sup>7)</sup> Metal Powder Report, Herausg. W. D. Jones u. R. A. Hetzig, London.

<sup>8)</sup> Powder Metallurgy Bulletin, Herausg. P. Schwarzkopf, New York.

<sup>9)</sup> Internat. Pulvermetallurgische Tag., Graz 1948; Alljährl. Tagg. der Metal Powder Assoc., USA; Sylvania-Tagung „Physics of Powder Metallurgy“ New York 1949.

z. B. Aluminium-, Kupfer-, Zink-, Messing-, Bronze-, Magnesium- und Eisenpulver, als Anstrichfarben und für Korrosionsschutz, ferner in der chemischen Industrie und in der Pyrotechnik Verwendung finden.

Die moderne Fahrzeugindustrie hat jedoch der Metallpulverpreßtechnik durch Verwendung von porösen Sintereisen- und Sinterbronze-Lagern und dichten Sintereisen-, Sinterstahl- und Sinterbronze-Maschinenteilen einen starken Auftrieb gegeben. So verbrauchen allein die *Moraine Division* der *General Motors* und die *Amplex Division* der *Chrysler Corporation* 800 bis 1000 t Bronze- und Eisenpulver pro Monat und zwar überwiegend für den Eigenbedarf. In Bild 2 wird der amerikanische und Weltbedarf an Eisen- und Kupferpulver während der letzten 10 Jahre schematisch aufgezeigt. Während der Verbrauch 1939 bei etwa

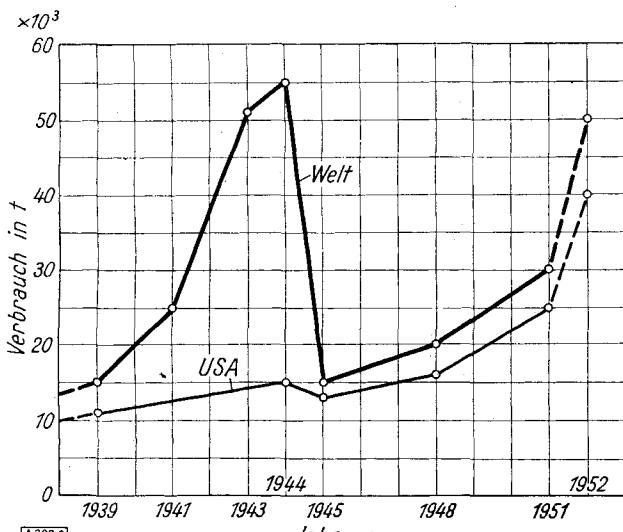


Bild 2  
Verbrauchskurve von Eisen- und Kupferpulver

15000 Jahrestonnen lag, dürfte in diesem Jahr ein solcher von 30000 Jahrestonnen in diesen beiden Pulversorten erreicht werden. Während des Krieges wurden auf deutscher Seite die Kupfer-Führungsänder für Granaten durch Sintereisenringe ersetzt und 1945 über 3000 Monatstonnen Eisenpulver hierfür – insgesamt während des Krieges über 100000 t Eisenpulver für diesen Zweck – hergestellt und eingesetzt.

Um dem steigenden Bedarf an Eisenpulver nachzukommen, sind in Schweden und in den Vereinigten Staaten neue Anlagen für Reduktions- bzw. Schwammeisenpulver mit je etwa 5000 Jahrestonnen-Leistung im Entstehen und werden spätestens 1952 in Betrieb gehen. Für allfälliger größerer Bedarf kommen nach unserer Ansicht jedoch zusätzlich nur Zerstäubungs- und Verdüsungsverfahren zur Dispersion flüssiger Eisenschmelzen in Frage.

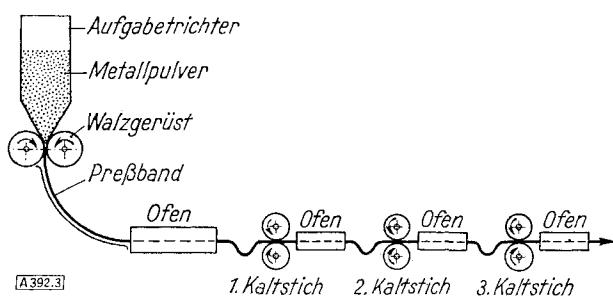


Bild 3  
Walzen von Bändern aus Eisenpulver, schematisch. (G. Naeser u. F. Zirm)

Von diesen Verfahren haben sich das DPG- und das RZ-Verfahren am besten bewährt. Das *Naesersche Verfahren*<sup>10)</sup> der direkten Herstellung von Bändern, Blechen, Bimetall- und Verbundmetallstreifen aus Pulvern läßt auch neue, sehr weit gesteckte technische Möglichkeiten und einen erheblich gesteigerten Pulverbedarf offen. Wie Bild 3 schematisch zeigt, wird aus dem Eisenpulver zwischen zwei Walzen ein endloses Band geformt, dieses gesintert und anschließend mehrfach verdichtet. Der ganze Prozeß verläuft kontinuierlich.

Die Erzeugung verhältnismäßig seltener Metalle, wie Uran, Titan, Zirkon, Vanadin, in duktiler Form läuft großtechnisch über den pulverförmigen Zustand. Wenn man bedenkt, daß ein Atom-Meiler etwa 5 t Uran-Stangen enthält und letztes Jahr bereits 15 t Titan- und 2 t Zirkonmetall, dieses Jahr etwa 30 t Titanmetall pro Monat erzeugt wurden, so sieht man, daß diese Metalle – das Titan an der Spitze – im Begriffe sind, normale Gebrauchsmodelle zu werden. Dem Titan ist ohne Zweifel eine Entwicklung wie dem Aluminium vorauszusagen. Die neuen Anlagen für Titan und Titan-Legierungen gehen in den Vereinigten Staaten bereits in die Größenordnung mittlerer bis großer Edelstahlwerke. Die neue Großanlage der *Titanium Metals Corp. of America* wird in Henderson, in der im zweiten Weltkrieg für 150000000 Dollar erstellten und später stillgelegten Magnesium-Fabrik, jährlich etwa 4000 t Titan produzieren, wofür die Colorado River Commission aus den Hoover- und Davis-Stauwerken etwa 150000000 kWh zur Verfügung stellen wird. Wenn die Erforschung des duktilen Titans und Zirkons auch mit den Namen europäischer Forscher besonders stark verbunden ist, so steht die heutige europäische Entwicklung auf diesem Gebiet weit hinter der amerikanischen zurück. Während sich bei Titan und Zirkon das *Krollsche Verfahren* der Reduktion der Chloride mit Magnesium durchgesetzt hat, scheint sich beim Uran die Calcium-Reduktion des Chlorides besonders zu bewähren. Bild 4 zeigt einen Reduktionsofen für Titanmetallpulver nach W. J. Kroll<sup>11)</sup>.

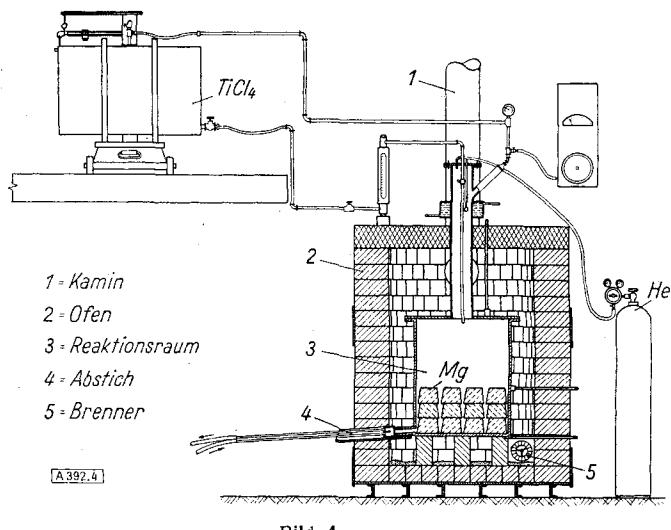


Bild 4  
Ofen zur Herstellung von Titanpulver durch Reduktion von  $TiCl_4$  mit Mg. (W. J. Kroll)

Aus etwa 280 kg  $TiCl_4$  und 81 kg Mg, erhält man in dieser Großversuchsanlage etwa 60 kg Titanpulver mit einer 85proz. Ausbeute. Bei der Zirkon-Reduktion wird auf Kühlslängen umsublimiertes, festes  $ZrCl_4$  im oberen Teil des Ofens eingesetzt.

<sup>10)</sup> G. Naeser u. F. Zirm, Stahl u. Eisen 70, 995/1004 [1950].  
<sup>11)</sup> W. J. Kroll, Rev. Métallurg. 47, 1/18 [1950].

Da die Weiterverarbeitung von Titan-, Zirkon-, Uran- und Vanadinpulver ursprünglich auf dem Sinterwege geschah, heute aber fast ausschließlich schmelzmetallurgisch in Hochvakuumöfen vorgenommen wird, sei hier nicht weiter darauf eingegangen.

#### Neuere Sinterwerkstoffe

Wenden wir uns nun den Neuentwicklungen auf dem Gebiete der verschiedenen marktgängigen Sinterwerkstoffe zu: Die Metalle Molybdän und Wolfram, auf denen die Glühlampen- und Radioröhrenindustrie basiert, wurde bis in die letzte Zeit fast ausnahmslos nach dem *Coolidge*-Verfahren, d. h. durch Sintern gepreßter Stäbe im direkten Stromdurchgang bis nahe an den Schmelzpunkt, in Stabeinheiten von maximal 5 bis 7 kg hergestellt. Durch Verwendung von Hochtemperaturöfen mit Molybdän-Heizleitern und keramischen Zustellungen aus Magnesit bzw. Sintertonerde, gelang es in den letzten 2 Jahren, Molybdän-Blöcke mit 50 bis 100 kg Gewicht zu erzeugen, die nun allerdings stahlwerksmäßig bei entsprechend höheren Temperaturen verarbeitet werden müssen. Dem Molybdän-Metall eröffnen sich hiermit neue Möglichkeiten im Apparate- und Ofenbau sowie insbesondere in der chemischen Industrie. Die Verarbeitung von Wolfram ( $F_p$  etwa 3400° C) über indirekt gesinterte Stäbe oder Blöcke hat auch heute noch wegen der notwendig hohen Sintertemperaturen von etwa 2500 bis 3000° C wenig Aussicht auf Erfolg.

Ein grundsätzlich neuer Weg zur Herstellung großtechnischer Molybdän-Rundblöcke und -Formstücke wurde in den letzten Jahren von der *Climax Molybdenum Co.* in Amerika beschritten<sup>12)</sup>. Bild 5 zeigt schematisch die neue Arbeitsweise.

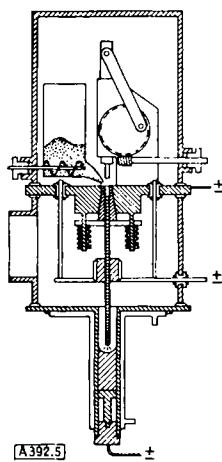


Bild 5. Vakuum-Lichtbogenschmelzeinrichtung zum Schmelzen von Molybdän. (R. M. Parke u. J. L. Ham)

Molybdän-Pulver wird unter einer großen Vakuumglocke kontinuierlich zu flachen, zylindrischen Körpern verpreßt, die in einer zweiten Stufe aneinander gesintert und in einer weiteren Stufe im Lichtbogen, der zwischen der gebildeten Elektrode aus Sintermolybdän und dem wassergekühlten Kupfer-Tiegel gezogen wird, niedergeschmolzen werden. Wie bei den eingangs besprochenen Metallen Titan, Zirkon, Uran, Vanadin usw. handelt es sich hierbei um eine Kombination von Pulvermetallurgie und Schmelzmetallurgie. Geringe Oxydeinschlüsse (Sauerstoff > 0,002%) machen die Schmelze beim Schmieden und Walzen

rotbrüchig. Durch geeignete Desoxydation mit Kohlenstoff, der dem Molybdän-Pulver zweckmäßig in Form von reinstem Ruß zugesetzt wird, lässt sich bei einem Überschuß von 0,02 bis selbst 0,1% Kohlenstoff in der Schmelze eine gute Warmverformbarkeit erzielen. Mit Entwicklungsanlagen können 100 bis 150 kg Blöcke, mit neu erstellten Anlagen 500 bis 1000 kg Blöcke erzeugt werden. Nach dem Lichtbogen-Vakuumschmelzverfahren lässt sich auch Wolfram-Pulver in duktile Ingots überführen<sup>13)</sup>.

Die hervorragendsten Eigenschaften des Molybdäns und Wolframs, nämlich hoher Schmelzpunkt und hohe Warmfestigkeit, lassen sich bislang im Ofenbau nur unter Schutz-

<sup>12)</sup> R. M. Parke u. J. L. Ham, Amer. Inst. min. metallurg. Engrs., Techn. Publ. Nr. 2052 [1946].  
<sup>13)</sup> B. Goodwin u. Ch. T. Greenidge, Metall Progr. 59, 812/14 [1951].

gas oder unter Vakuum auswerten, da diese Metalle oberhalb 500 bis 600° an Luft rasch oxydieren. Neuerdings wurden erfolgreiche Versuche durchgeführt, Molybdän durch Silicieren mit einem Siliciumtetrachlorid-Wasserstoffgemisch mit Molybdändisilicid-Schichten zu versetzen<sup>14)</sup>. Solche silizierten Heizleiter können bis etwa 1700° an Luft ohne Oxydation erhitzt werden<sup>15), 16)</sup>. Der Schutz beruht auf der Ausbildung eines im Betrieb plastischen quarzhähnlichen Filmes, der bei Auftreten von Rissen „selbstheilend“ wirkt. Es ist auch möglich, durch geeignete Tauchverfahren Molybdän-Heizleiter mit Al-Si-Legierungen zu überziehen, die nach der Oxydation sillimanitartige Schutzschichten bilden<sup>15)</sup>.

#### Hochschmelzende Sinterhartstoffe

Das Gebiet der hochschmelzenden Hartstoffe und Sinterhartmetalle ist durch eine Fülle interessanter neuer Forschungsarbeiten gekennzeichnet. Ausgangsstoffe der modernen Sinterhartmetalle sind vorzugsweise die Carbide der Übergangselemente der 4., 5. und 6. Gruppe des Periodensystems. Unter diesen sind wiederum das WC, TiC, TaC, NbC und VC sowie deren Mischkristalle die bevorzugten Hartstoffe. Nachdem die Carbid-Zweistoffsysteme durch Arbeiten von H. Nowotny und R. Kieffer<sup>17)</sup>, J. T. Norton und A. L. Mowry<sup>18)</sup>, A. G. Metcalfe<sup>19)</sup> u. a. als weitgehend geklärt hier übergangen werden können, sind es die Dreistoffsysteme, denen sich neuerdings das metallurgische und hartmetalltechnische Interesse zuwendet. H. Nowotny, R. Kieffer und O. Knotek<sup>20)</sup> untersuchten systematisch das System WC-TiC-TaC, d. h. ein Pseudo-Dreistoffsysteem, aus je einem Carbid der 4., 5. und 6. Gruppe des Periodensystems. Während die Carbide der 4. und 5. Gruppe mit und untereinander ausnahmslos vollkommen mischbar sind — VC und ZrC bilden wegen der Gittergrößenunterschiede eine Ausnahme — und außerdem in der Lage sind, sehr beachtliche Mengen der Carbide der 6. Gruppe zu lösen, vermögen letztere Carbide nur bei extrem hohen Temperaturen kleinere Mengen Carbide der

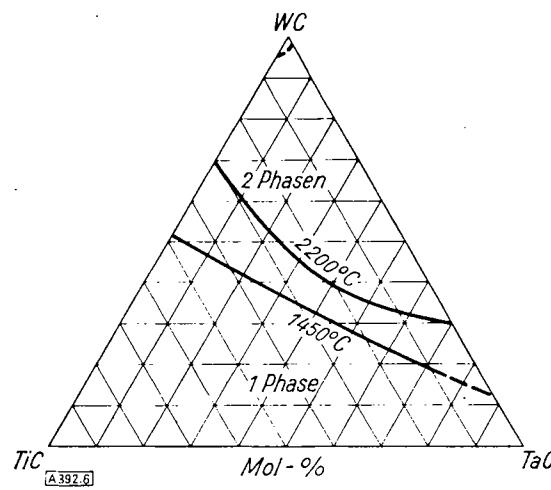


Bild 6  
Abgrenzung der Phasenbereiche im System WC-TiC-TaC.  
(H. Nowotny, R. Kieffer u. O. Knotek)

- <sup>14)</sup> I. E. Campbell, C. F. Powell, D. H. Nowicki u. B. W. Gonser, J. Electrochem. Soc. 96, 318/33 [1949].  
<sup>15)</sup> R. Kieffer u. E. Nachtigall: Heraeus Festschrift, Hanau, 1950, S. 186/205.  
<sup>16)</sup> E. A. Beidler, C. F. Powell, I. E. Campbell u. L. F. Yntema, J. Electrochem. Soc. 98, 21/25 [1951].  
<sup>17)</sup> H. Nowotny u. R. Kieffer, Metallforsch. 2, 257/65 [1947].  
<sup>18)</sup> J. T. Norton u. A. L. Mowry, Metals Trans. 185, 133/36 [1949].  
<sup>19)</sup> A. G. Metcalfe, J. Inst. Metals. 74, 591/607 [1947].  
<sup>20)</sup> H. Nowotny, R. Kieffer u. O. Knotek, Berg- u. Hüttenmänn. Mh. 96, 6/8 [1950].

4. und 5. Gruppe zu lösen. Bild 6 gibt die skizzierten Verhältnisse bei 1450 und 2200° wieder. Das heterogene Gebiet – WC-Kristalle neben ternären Mischkristallen – wird mit steigender Temperatur eingeengt. In einer neueren Arbeit prüften J. T. Norton und A. L. Mowry<sup>21)</sup> wie sich die Mischungslücke im System ZrC–VC durch Zugabe der isotopen Carbide TaC, TiC und NbC, die mit Zirkoncarbid und Vanadincarbid vollkommen mischbar sind, ändert.

Während die Sinterhartmetalle in Europa vorzugsweise auf der Basis WC–Co und WC–TiC–Co aufgebaut waren, haben sich seit letztem Jahr auch die TaC- bzw. TaC–NbC-haltigen WC–TiC–Co-Legierungen wie in Amerika durchgesetzt. Ihnen ist bei gleicher Schneidleistung eine höhere Zähigkeit oder bei gleicher Zähigkeit eine höhere Schneidleistung nachzurühmen.

Besondere Bedeutung kommt in der letzten Zeit auch den zunderfesten Hartlegierungen auf TiC-Basis mit Kobalt- oder Nickel- bzw. Nickel-Chrom- und Kobalt-Chrombindern zu<sup>22, 23, 24)</sup>. Diese Legierungen scheinen im Turbinenbau 100 bis 200° höhere Arbeitstemperaturen als Legierungen von Art des Nimonic und Vitallium zuzulassen. Der Turbinenbau, Raketen- und Düsenantriebe brachten auch einen starken Auftrieb in der Erforschung weiterer Hartstoffe, beispielsweise von Nitriden<sup>14)</sup>, Carbid-Nitrid-Mischkristallen<sup>25)</sup> und insbes. von Boriden und Siliciden<sup>26)</sup>.

Unter den Boriden der Übergangselemente ragen besonders die Diboride des Titans und Zirkons hervor. Sie haben Schmelzpunkte von etwa 3000°, eine hervorragende Wärmeleitfähigkeit, sowie hohe Härte- und Warmfestigkeitswerte<sup>27)</sup>. Das Zirkon-Diborid ist ferner durch eine beachtliche Zunderfestigkeit bei Temperaturen bis 1700° ausgezeichnet. Die Strukturerforschung der Borid-Phasen der Übergangselemente hat mit den präparativen Arbeiten zwangsläufig Schritt gehalten<sup>28–33)</sup>. Es gelten heute bei den Übergangselementen Titan, Zirkon, Vanadin, Niob, Tantal, Chrom, Molybdän, Wolfram etwa 30 meist neue aufgefundene Phasen als definiert (Tabelle 1). Eine ähnliche Fruchtbarkeit weist auch die Silicid-Chemie auf. Hier

4. Gruppe	5. Gruppe	6. Gruppe
TiB TiB <sub>2</sub>	VB <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> B Cr <sub>2</sub> B <sub>4</sub> Cr <sub>3</sub> B <sub>2</sub> CrB <sub>2</sub> CrB
ZrB <sub>2</sub>	Nb <sub>3</sub> B Nb <sub>3</sub> B <sub>4</sub> Nb <sub>2</sub> B NbB <sub>2</sub> NbB	Mo <sub>2</sub> B MoB, β-MoB Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub> MoB <sub>2</sub>
HfB <sub>2</sub> ?	Ta <sub>3</sub> B · Ta <sub>3</sub> B <sub>3</sub> Ta <sub>2</sub> B TaB <sub>2</sub> TaB	W <sub>2</sub> B WB W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>

Tabelle 1  
Boride der Übergangsmetalle der 4., 5. und 6. Gruppe des Periodensystems

gelten etwa 20 Silicide als röntgenographisch identifiziert<sup>34)</sup> (Tabelle 2). Mit der Veröffentlichung einer Reihe von Silicid-Systemen insbesondere der Systeme Molybdän-

- <sup>21)</sup> J. T. Norton u. A. L. Mowry, *J. Metals* 3, 923/25 [1951].
- <sup>22)</sup> R. Kieffer u. F. Kölbl, *Z. anorg. Chem.* 262, 229/47 [1950].
- <sup>23)</sup> J. C. Redmond u. E. N. Smith, *Metals Trans.* 185, 987/93 [1949].
- <sup>24)</sup> E. M. Trent, A. Carter u. J. Bateman, *Metallurgia* 42, 111/15 [1950].
- <sup>25)</sup> P. Duwez u. F. Odell, *J. Elektrochém. Soc.* 97, 299/304 [1950].
- <sup>26)</sup> R. Kieffer u. F. Benesovsky, *Z. Metallkde.* 42, 97/106 [1951].
- <sup>27)</sup> F. W. Glaser, *Powder Met. Bull.* 6, 51/54 [1951].
- <sup>28)</sup> R. Kiessling, *Acta Chem. Scand.* 4, 209/27 [1950].
- <sup>29)</sup> L. H. Andersson u. R. Kiessling, ebenda 4, 160/64 [1950].
- <sup>30)</sup> S. J. Sindeband, *Metals Trans.* 185, 198/202 [1949].
- <sup>31)</sup> J. T. Norton, H. Blumenthal u. S. Sindeband, *Metals Trans.* 185, 749/51 [1949].
- <sup>32)</sup> R. Steinitz, *Powder Met. Bull.* 6, 54/56 [1951].
- <sup>33)</sup> L. Brewer, D. L. Sawyer, D. H. Templeton u. C. H. Dauben, *J. Amer. Ceram. Soc.* 34, 173/79 [1951].
- <sup>34)</sup> L. Brewer, A. W. Searcy, D. H. Templeton u. C. H. Dauben, *J. Amer. Ceram. Soc.* 33, 291/94 [1950].

4. Gruppe	5. Gruppe	6. Gruppe
TiSi <sub>2</sub>	V <sub>3</sub> Si VSi <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> Si Cr <sub>2</sub> Si CrSi CrSi <sub>2</sub>
ZrSi <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> Si NbSi <sub>2</sub>	Mo <sub>3</sub> Si Mo <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> MoSi <sub>4</sub>
HfSi <sub>2</sub> ?	TaSi <sub>0.2</sub> TaSi <sub>0.4</sub> TaSi <sub>0.6</sub> TaSi <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> WSi <sub>2</sub>

Tabelle 2  
Silicide der Übergangsmetalle der 4., 5. und 6. Gruppe des Periodensystems

Silicium<sup>35)</sup>, Wolfram-Silicium<sup>36)</sup> und Tantal-Silicium ist in allernächster Zeit zu rechnen. Bild 7 zeigt das Zunderverhalten einer Reihe druckgesinterter Mo–Si-Legierungen, nach R. Kieffer und E. Cerwenka<sup>37)</sup> bei 4½ stündigem Glühen an Luft bei 1500°.

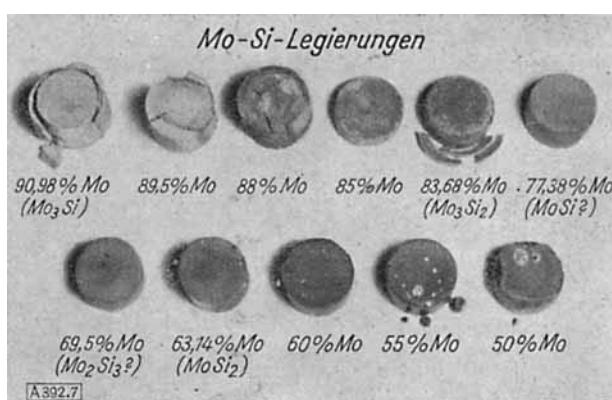


Bild 7  
Zunderverhalten von Mo-Si-Legierungen.  
(R. Kieffer u. E. Cerwenka)

#### Poröse Sinterwerkstoffe

Die Hauptverwendung der porösen Sinterwerkstoffe sind die bekannten porösen Bronze- und Eisenlager, deren Porenraum – etwa 30 Volumen-% – durch Tränkung mit Schmieröl gefüllt wird, das ihnen bekanntlich eine selbstschmierende Wirkung verleiht. Neuerdings haben sich in Amerika poröse Lager eingeführt, die durch Schaffung besonderer Hohlräume beim Sintern eine besonders große Ölaufnahmefähigkeit aufweisen<sup>38)</sup>. Bild 8 zeigt solche neuartige Lager. Durch Einlegen von hohlen oder mit lockerem Eisenpulver gefüllten Kupferrohren oder auch von Spiralen aus organischen Stoffen beim Preßvorgang, und Ausstreben des organischen Materials bzw. Einseichern des Kupfers in den Eisenskelettkörper werden in den Lagerkörpern Sonderhohlräume, eine Art gewollte Lunker, geschaffen.

Weitere interessante poröse Sinterwerkstoffe sind die Granatenführungsringe<sup>39, 40)</sup> aus paraffin-getränktem Sinterreisen, von denen – wie schon eingangs erwähnt – im zweiten Weltkrieg etwa 100000 t an Stelle von Kupferbändern gebraucht wurden, weiter die porösen Nickel-„cups“, die als für Quecksilber durchlässiges Medium in Zeitzünder eingebaut wurden<sup>40)</sup>. In England wurden

<sup>35)</sup> E. Cerwenka, Dissert. T. H. Graz [1951].

<sup>36)</sup> E. Gallistl, Dissert. T. H. Graz [1952].

<sup>37)</sup> R. Kieffer u. E. Cerwenka, *Z. Metallkunde*, demnächst.

<sup>38)</sup> J. Haller, *Materials u. Methods* 33, Nr. 5, 80/81 [1951].

<sup>39)</sup> H. R. Clauer, ebenda 33, 61/65 [1951].

<sup>40)</sup> P. Schwarzkopf, in „*Powder Metallurgy*“, Macmillan, New York 1947, S. 167.

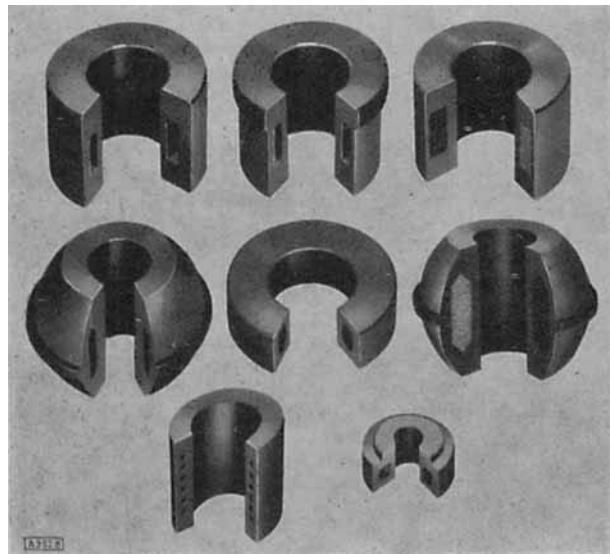


Bild 8. Sinterlager mit Ölpeicherräumen. (J. Haller)

brauchbare Ergebnisse mit gesinterten, flüssigkeitsdurchlässigen Schienen zum Enteisen von Flugzeugen gemacht<sup>41).</sup> In dieser Richtung liegen auch Versuche mit dem sogenannten „sweat cooling“, d. h. die Verwendung flüssigkeitsdurchspülter, poröser Formkörper für die Wandungen zu kührender Verbrennungskörper<sup>42).</sup>

#### Maschinen- und Geräteteile

Wohl den größten Aufschwung auf dem Gebiete der Pulvermetallurgie hat die Erzeugung von Maschinen- und Geräteteilen aus Sinterreisen, Sinterstahl und Sinterbronze gebracht. Die Technik der „abfallfreien“ Verpressung von Metallpulvern zu fertigen Formkörpern hat auf vielen Gebieten klassische Verfahren wie die spangebende Verformung, das Gesenkschmieden, den Formguß usw. verdrängt<sup>43, 44).</sup> Bild 9 zeigt Beispiele für Sinterreisen-

<sup>41)</sup> T. K. S. Ltd.: Symposium on Powder Metallurgy, Iron Steel Inst. Spec. Rep. Nr. 38, London 1947, S. 110/12.  
Anonym, Aircraft Prod. 11, S. 424/25 [1949].

<sup>42)</sup> P. Grootenhuis u. N. P. W. Moore: Symposium on High Temperature Steels and Alloys for Gas Turbines. Iron Steels Inst., London 1951, S. 281/88.

<sup>43)</sup> F. Benesovsky, Werkstatt u. Betrieb 83, 257/60 [1950].

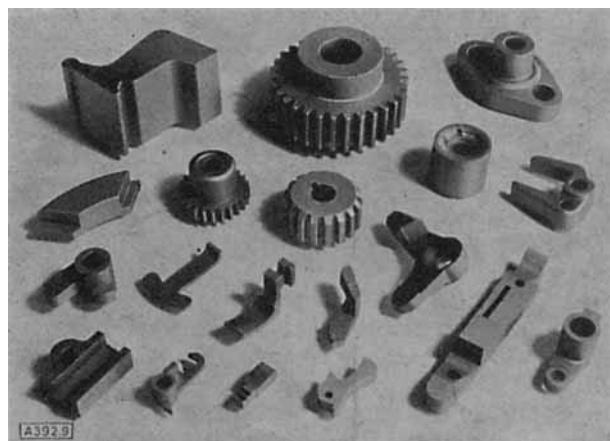


Bild 9. Sinterreisen- und Sinterstahlteile

und Sinterstahlteile, welche heute in großen Serien für die Maschinen- und Fahrzeugindustrie, für den Gerätebau und viele andere Industriezweige geliefert werden.

Es werden heute im großen nicht nur einfache Kohlenstoffstähle, sondern auch Nickel-, Mangan- und Kupfer-haltige Einsatzstähle und Kupfer-getränkte, ausscheidungshärtbare Sinterstähle erzeugt<sup>44-47).</sup> Ölbrünieren, Phosphatisieren, elektrolytische Verchromung und Gasinchromierung haben sich zum Oberflächenschutz der Sinterstahlteile bestens bewährt<sup>4, 48).</sup>

Auf dem Gebiete der Sintermagnete, den ältesten Vertretern von Sinterstahl, werden heute aus den bekannten Dauermagnetlegierungen Magnetformstücke und Magnetsysteme, bei denen der Polschuh aus Weicheisen angesintert wird, hergestellt. Der Weltausstoß an gesinterten Magneten liegt derzeit bei etwa 50 t/Monat. In Alnico-Typen werden fabrikationsmäßig Energiewerte von 4,5 Mill. BH<sub>max</sub> erreicht.

Eingegangen am 19. Oktober 1951 [A 392]

<sup>44)</sup> R. Kieffer u. F. Benesovsky, Berg-, u. Hüttenmänn. Mh. 94, 284/94 [1949].

<sup>45)</sup> F. Benesovsky u. R. Kieffer, Berg.- u. Hüttenmänn. Mh. 95, 143/50 [1950].

<sup>46)</sup> F. Benesovsky, Berg.- u. Hüttenmänn. Mh. 96, 184/87 [1951].

<sup>47)</sup> G. Stern u. J. A. Gerzina, Iron Age 165, Nr. 8, 74/77 [1950].

<sup>48)</sup> E. A. Anderson, Materials u. Methods, 30, Nr. 2 55/57 [1949].

## II. Teil: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Pulvermetallurgie

Von Prof. Dr. G. F. HÜTTIG<sup>1)</sup>

Institut für anorganische und physikalische Chemie der Technischen Hochschule Graz

Der Aufstieg der Pulvermetallurgie verlieh zahlreichen Forschungsgebieten neue Impulse. Hervorzuheben sind die Lehre vom pulverförmigen Zustand, insbes. die Thermodynamik und Kinetik der Zermahlungsvorgänge, die Druckverteilung in einem gepreßten Pulver, der Mechanismus der Sintervorgänge, die Gesetze, nach welchen sich die verschiedenen Eigenschaften eines Sinterlings gegenseitig festlegen, die Zwischenzustände, welche beim Sintern von Pulvern durchschritten werden, welche aus einem Gemisch von zwei oder mehreren Metallen bestehen, die Benetzungs vorgänge beim Tränkverfahren und manches bisher nur wenig systematisch und umfassend bearbeitete Gebiet der präparativen anorganischen Chemie, wie die Carbide, Silicide, Boride u. a. m.

### 1. Die Metallpulver

Die nach irgendeinem Verfahren anfallenden Pulver sind gekennzeichnet durch die Gestalt, die Größe und die Feinstruktur der Oberfläche und des Inneren der Pulverkörnchen.

Wie verschiedenartig auch bei ein und demselben Metall die Gestalt sein kann und wie sehr dies von der Her-

stellung und der Vorgeschichte abhängt, mögen folgende Angaben veranschaulichen:

Die Körner der durch mechanische Zerkleinerung entstandenen Eisenpulver haben die Gestalt runder Plättchen, deren Länge bzw. Breite bis zum Hundertfachen ihrer Dicke betragen kann. Die Körner der nach dem Zerstäubungs- oder Schleuder-Verfahren hergestellten Eisenpulver weisen größtenteils kugelige Gestalt auf. Sie ähneln darin dem aus der Gasphase abgeschiedenen Carbonyl-

<sup>1)</sup> Plenar-Vortrag auf der Hauptversammlung der GDCh, Köln 26. 9. 1951.