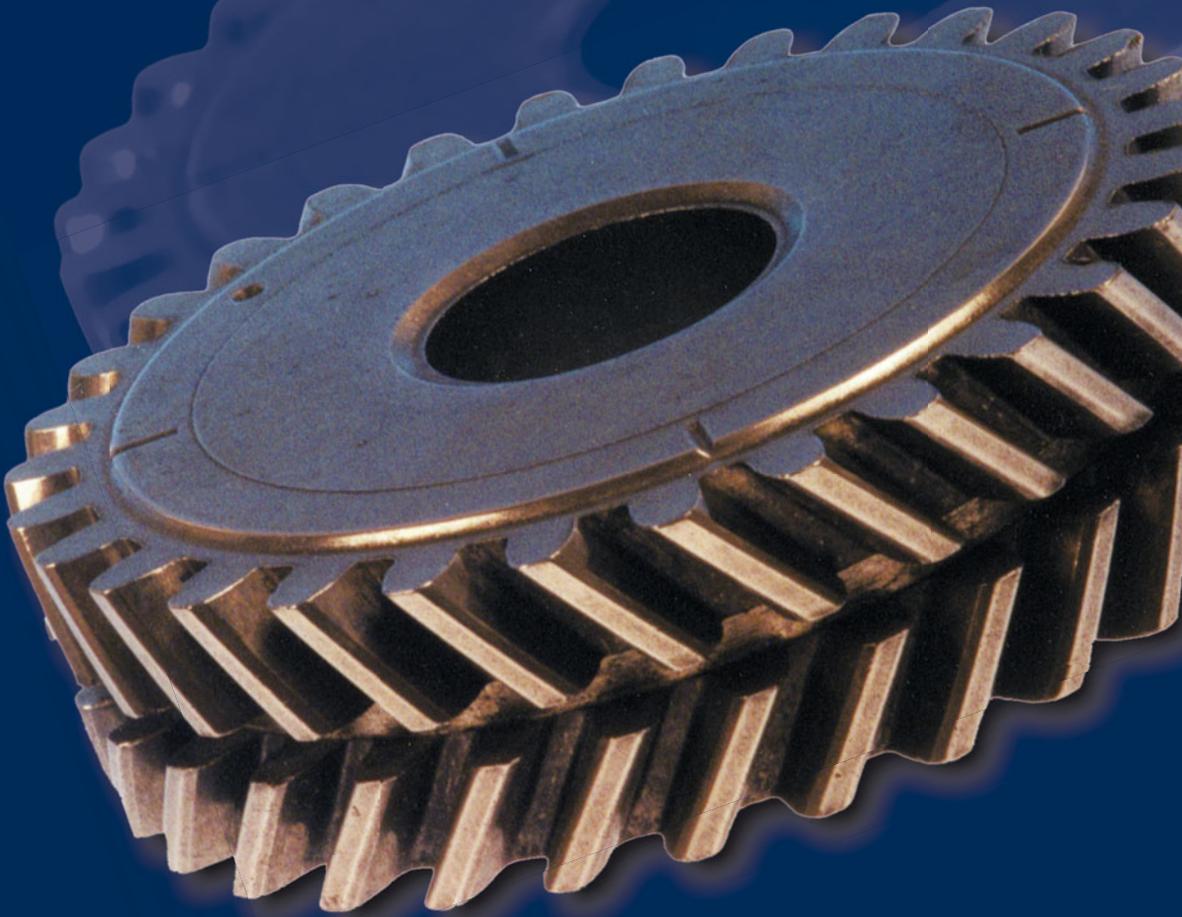


Paul Beiss

Pulvermetallurgische Fertigungstechnik



Pulvermetallurgische Fertigungstechnik

Paul Beiss

Pulvermetallurgische Fertigungstechnik

Paul Beiss
Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau
RWTH Aachen
Aachen
Deutschland

ISBN 978-3-642-32031-6
DOI 10.1007/978-3-642-32032-3

ISBN 978-3-642-32032-3 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Inhaltsverzeichnis

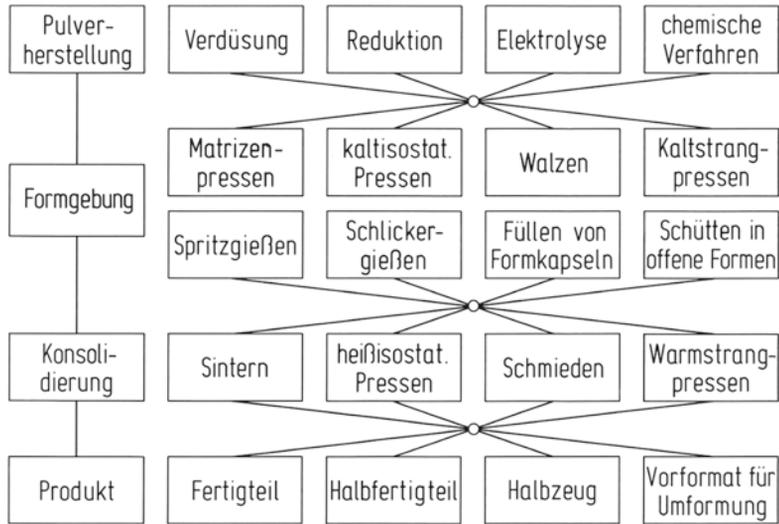
1	Produkte der Pulvermetallurgie	1
2	Pulverherstellung und -charakterisierung	15
2.1	Pulverherstellung	15
2.2	Pulvermorphologie	23
2.3	Pulveraufbereitung und Legierungstechniken	29
2.4	Pulvercharakterisierung und -eigenschaften	36
3	Formgebung von Pulvern	69
3.1	Matrizenpressen mit Konsolidierung	70
3.2	Pulverschmieden	74
3.3	Isostatisches und pseudoisostatisches Pressen	77
3.4	Verarbeitung von Pulver mit hohen Anteilen organischer Binder	93
3.5	Sprühkompaktieren	100
3.6	Kontinuierliche Verdichtungsverfahren	106
3.7	Schüttsintern	108
3.8	Herstellung von Blöcken für die Warmumformung	110
3.9	Herstellung oxidischer Supraleiter	113
3.10	Schlussbemerkung	113
4	Matrizenpressen	117
4.1	Mehrquerschnittige Geometrien	122
4.2	Schrägen und Konen	127
4.3	Modifikation der Matrizenplatte	131
4.4	Hinterschneidungen	133
4.5	Schichtverbundpressen	144
4.6	Pressen auf Rundtischmaschinen	146
4.7	Neuere Entwicklungen	148
4.8	Zusammenfassung	150
5	Sintern	153
5.1	Schutzgas in der Sinterzone und Oxidreduktion	155
5.2	Diffusion und Sinterung	171

5.3	Diffusion und Legieren	177
5.4	Ofentechnik für die Formteilfertigung	186
5.5	Fehler beim Sintern	202
5.6	Verfahrenskombinationen beim Sintern	220
5.7	Zusammenfassung	233
6	Eigenschaften poröser Stähle	235
6.1	Elastische Eigenschaften	237
6.2	Kennwerte des Zugversuchs und Härte von Formteilwerkstoffen	243
6.3	Schwingfestigkeit von Sinterstählen	244
6.4	Einfluss der Dichte auf die Wechselfestigkeit im Sinterzustand	251
6.5	Einfluss von statischen Mittelspannungen	263
6.6	Einflüsse von Belastungsart, Kerben und hochbelastetem Volumen	269
6.7	Thermophysikalische Eigenschaften	274
6.8	Schwerpunkte	286
7	Zum Abschluss	289
	Literatur	291
	Bezugsquellenverzeichnis	311
	Sachverzeichnis	313

Man ist geneigt, unter dem Begriff Pulvermetallurgie die Herstellung und Verarbeitung von metallischen Pulvern zu verstehen. Bedingt durch die Entwicklung der großen überregionalen Fachverbände und ihren prägenden Einfluss gibt es jedoch keine allgemein akzeptierte Definition, die Abgrenzungen zu anderen Fertigungstechniken sind inkonsistent und pragmatisch festgelegt sowie ständigem Wandel unterworfen. Pulvermetallurgie bezeichnet deshalb eine unübersichtliche Vielfalt völlig verschiedener Methoden oder Verarbeitungsschritte für jedes betrachtete Material. Die Grenzen zur Verarbeitung keramischer Stoffe sind fließend. In Abb. 1.1 wird versucht, einen groben Überblick über diese Vielfalt zu geben.

Die prinzipiellen Fertigungsschritte gliedern sich in Pulverherstellung, Formgebung des Pulvers und Konsolidierung zum metallischen Verbund. Bei manchen Verfahren bestehen Formgebung und Konsolidierung aus einem Arbeitsgang. Oft schließen sich an die Konsolidierung konventionelle oder material- und verfahrensspezifische Folgearbeitgänge an. Die Übersicht in Abb. 1.1 ist keineswegs vollständig, sondern beschränkt sich auf wenige industriell besonders wichtige Aspekte, die Strukturwerkstoffe zum Ziel haben. Funktionsmaterialien, bei denen weniger die Geometrie und das mechanische Verhalten als chemische und physikalische Eigenschaften im Blickpunkt der Anwendung stehen, sollen nicht behandelt werden. Auch die Verarbeitung von Pulvern oder pulverhaltigen Pasten zum Löten, für Auftragsschweißungen oder mittels der verschiedenen Spritzverfahren wird hier nicht betrachtet. Ebenso sollen die Verfahren des rapid prototyping durch lagenweises Übereinanderschichten und lokales Sintern mittels Strahlverfahren oder der Aufbau von geschichteten Material- oder Eigenschaftsgradienten auf funktionalen Oberflächen keine Rolle spielen. Die Herstellung metallischer Hohlkugel- oder Schaumwerkstoffe aus Pulvern wird aus dieser Betrachtung ausgeschlossen, und ebenso wenig wird auf die Anwendung von Metallpulvern in Pulverform eingegangen, etwa für die magnetische Reinigung von Saatgut, als Dünger, als Futterzusatz in der Viehhaltung, als Festtreibstoff für Raketenantriebe, für Feuerwerkskörper, in der Umhüllung von Schweißelektroden, beim Thermitschweißen, als Pigment in Druckfarben oder als Flitter in Metallic-Lackierungen u. v. a. m.

Abb. 1.1 Fertigungsschritte in der Pulvermetallurgie



Im Folgenden wird vielmehr anhand einiger Beispiele gezeigt, wie die große Flexibilität der Pulvermetallurgie industriell genutzt wird, um technische Aufgabenstellungen mit meist vergleichsweise geringem Produktionsvolumen zu lösen. Da der pulvermetallurgische Herstellweg für schmelz-, gieß- und umformbare Werkstoffe stets teurer ist, als mit konventioneller Formgebung zu arbeiten, muss es für die Anwendung der pulvermetallurgischen Fertigung gute Gründe geben. Darauf soll jeweils kurz eingegangen werden.

Größere Bedeutung in der Technik erlangten pulvermetallurgische Verfahren und Werkstoffe hauptsächlich mit der Herstellung von Wolframwendeln für Glühlampen, Abb. 1.2. Wolfram und Molybdän lassen sich am einfachsten in Pulverform durch eine Reduktion ihrer Oxide in Wasserstoff herstellen. Für die Fertigung von Wendeln wird das Wolframpulver gepresst, in einer H_2 -Atmosphäre gesintert und in einer Abfolge von Umformstufen und Zwischenglühungen schließlich zum Draht gezogen. Sinngemäß werden W- und Mo-Halbzeuge für Hochtemperaturanwendungen unter Schutzgas oder im Vakuum auch heute nach diesem Verfahren gefertigt.

Ursprünglich wurden die Wolframdrähte in Ziehsteinen aus Einkorndiamanten gezogen. Aus Kostengründen wurden dazu Alternativen gesucht. Wegen der hohen Verschleißbeanspruchung beim Ziehen experimentierte man mit pulvermetallurgischen Methoden, um Ziehsteine aus metallgebundenen Hartstoffen zu erzeugen, was letztlich zur Werkstofffamilie der Hartmetalle führte, die heute für Draht-, Rohr- und Stangenziehwerkzeuge sehr weit verbreitet sind. Die meisten Hartmetalle bestehen aus sehr feinkörnigem hexagonalen Wolframmonokarbid WC in einer Kobaltbindephase. Als weiterer Hartstoff wird oft kubisch-raumzentriertes Mischkristallmonokarbid (Ti-Ta-Nb)C, so genannte Mischkarbide, in WC-Kobalt-Hartmetallen zugesetzt. Hartmetalle finden Verwendung in der Metallzerspanung, meist in Form von Wendeschneidplatten, Abb. 1.3, und als Verschleißteile mit hoher Korrosionsresistenz in wässriger Umgebung, Abb. 1.4. Alleine in einem

Abb. 1.2 Wolframwendel einer Glühbirne

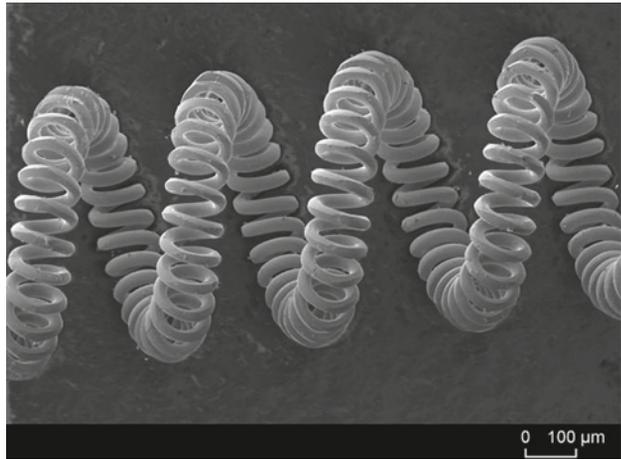


Abb. 1.3 Wendeschneidplatten aus beschichteten und unbeschichteten Hartmetallen und Keramiken (Kennametal Widia)



europäischen Betrieb werden jährlich etwa sechs Milliarden Kugeln für Kugelschreiberminen verarbeitet.

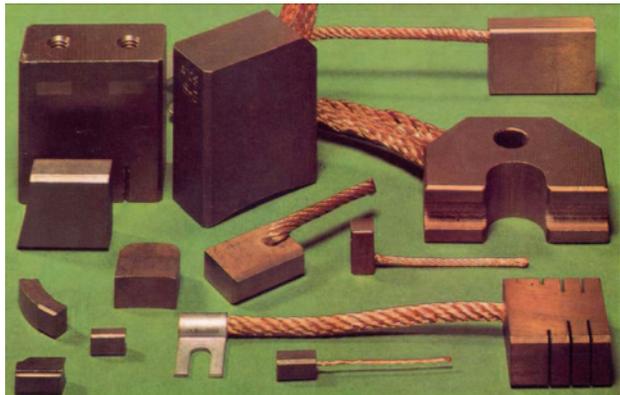
Neben Wolframkarbid-Kobalt-Hartmetallen, eventuell mit Mischkarbiden, gibt es eine Reihe von Sonderwerkstoffen, z. B. reines TiC in einem Nickel-Molybdän-Binder für einige Anwendungen in der Stahlzerspannung, Cr_3C_2 in Nickelbinder bei bestimmten korrosiven Belastungen oder TiC in höher legiertem härterem Stahlbinder für extreme abrasive und adhäsive Verschleißbeanspruchung.

Teilchenverbundwerkstoffe können schmelzmetallurgisch oft nicht mit dem erforderlichen Eigenschaftsspektrum hergestellt werden. Deshalb liegt hier eine der Domänen der Pulvermetallurgie. Nach der prinzipiellen Vorgehensweise bei Hartmetallen werden die

Abb. 1.4 Verschleißteile aus Hartmetall (Kennametal Widia)



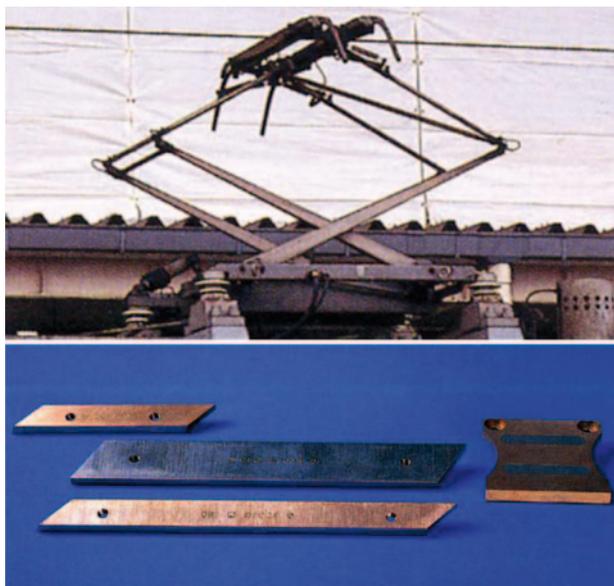
Abb. 1.5 Einfache Kohlebürsten für Schleifkontakte bei niedriger Spannung (Norddeutsche Affinerie)



nach Menge und Partikelgröße gewünschten Bestandteile miteinander gemischt, in geeigneter Weise verpresst und bei so hohen Temperaturen wärmebehandelt, dass es durch Diffusion zu einer metallischen Verbindung zwischen sich berührenden Partikelchen kommt. Diese Verbindungsbildung kann durch Überlagerung äußeren Drucks und durch Aufschmelzen eines Gefügebestandteils unterstützt werden.

Klassische Vertreter der Teilchenverbundwerkstoffe sind Kohlebürsten für elektrische Gleitkontakte, über die z. B. an Lichtmaschinen im Auto Strom abgegriffen oder bei Anlasern zugeführt wird. Auch der kontinuierliche elektrische Kontakt auf Schleifringen wird bei niedrigen Spannungen mit Kohlebürsten geschlossen, Abb. 1.5.

Abb. 1.6 Schleifstücke von Stromabnehmern für Hochgeschwindigkeitszüge (Japan Powder Metallurgy)



Kohlebürsten werden aus Mischungen von Kupfer, Bronze oder Silber mit Graphit hergestellt, wobei Graphit die Reibung mindert und Fressen der Gleitpartner verhindert. Der Metallanteil sorgt für ausreichende elektrische Leitfähigkeit.

Die Schleifstücke der Stromabnehmer von Hochgeschwindigkeitszügen werden aus mehrphasigen, komplexer zusammengesetzten Teilchenverbundwerkstoffen hergestellt, Abb. 1.6, um der hohen Verschleißbeanspruchung bei diesem Einsatzfall standhalten zu können.

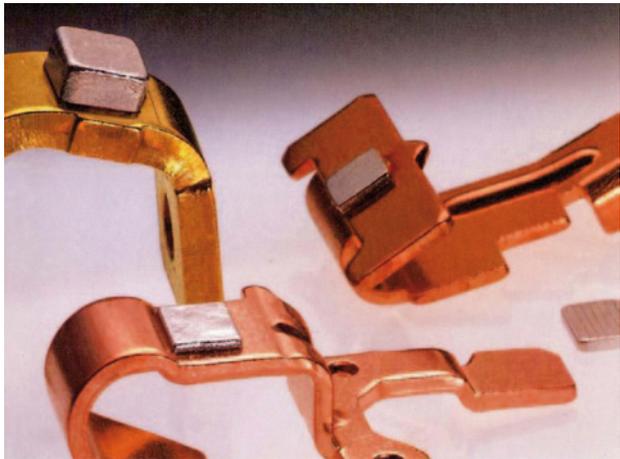
Elektrische Kontakte in Schaltsystemen aller Art bestehen aus einem elektrisch sehr gut leitenden Basismaterial mit nicht löslichen Einlagerungen aus Partikeln von Stoffen, die Verschweißungen verhindern sollen und den Abbrand verringern. Man unterscheidet Kupfer- und Silberbasiskontakte. Typische Werkstoffe sind reines Kupfer und niedriglegierte ausscheidungshärtbare Kupfersorten mit eingelagertem Wolfram, Wolframkarbid, Chrom oder Metalloxiden. Abbildung 1.7 gibt ein Beispiel: Zum Schalten hoher Ströme wird zunächst aus relativ grobem Wolframpulver ein poröser Skelettwerkstoff gesintert, der anschließend unter Nutzung der Kapillarkräfte der Porosität mit flüssigem Kupfer infiltriert wird. Ähnlich wie bei Kupferbasismaterialien wird auch bei Silberkontakten gearbeitet, jedoch spielen Nickel, das in Kupfer vollständig löslich, in Silber unlöslich ist, sowie Graphit als Einlagerungspartikel eine große Rolle. Der hohe Materialpreis von Silber beschränkt die Verwendung auf die eigentliche Kontaktfläche, die z. B. auf verkupferte Stahlträger aufgelötet, genietet oder geschweißt wird, Abb. 1.8. Silberbasiskontakte bewähren sich besonders in oxidierender Umgebung und bei niedrigeren Spannungen. Weltweit werden jährlich etwa 2000 t Silber für Kontaktwerkstoffe verarbeitet.

Zur großen Gruppe der Teilchenverbundwerkstoffe gehören auch die so genannten Wolframschwermetalle. Dabei handelt es sich um metallisches Wolfram, das in eine duktile Bindephase eingelagert ist. Typische Zusammensetzungen enthalten etwa 90–95 %

Abb. 1.7 Kontaktstücke aus Wolfram-Kupfer zum Schalten hoher Ströme (AMI Doduco)

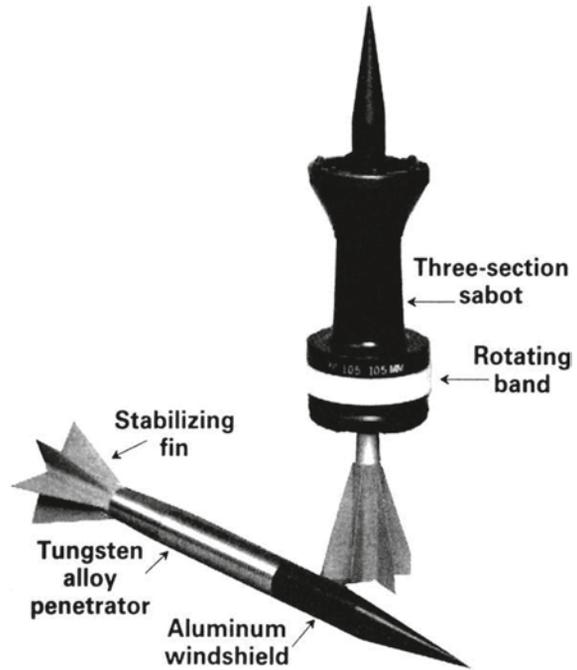


Abb. 1.8 Schaltelemente aus verkupfertem Stahl mit Silberbasiskontakten (AMI Doduco)



Wolfram in einem Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Binder. Beim Sintern schmilzt das Bindemetall und ermöglicht schnelle Diffusion des Wolframs, dessen Partikelgröße von etwa $5\ \mu\text{m}$ auf ungefähr $100\ \mu\text{m}$ zunimmt und kugelig einformt. Das Ergebnis sind Werkstoffe mit Dichten von $17\text{--}18\ \text{g/cm}^3$, typischen E-Moduln von etwa $350\ \text{kN/mm}^2$ und Zugfestigkeiten von $1.000\ \text{N/mm}^2$ bei 20 % Bruchdehnung. Bei den Anwendungen steht meist die hohe Dichte im Vordergrund. Komplexe Formen werden oft spanend hergestellt. Hervorzuheben sind lange Bohrgestänge und weit auskragende Werkzeughalter für Werkzeugmaschinen, wobei die hohe elastische Steifigkeit in Kombination mit großer Masse genutzt wird, Ausgleichs- und Dämpfungsgewichte aller Art, Kreiselemente in Kompassen und in kreiselstabilisierten Flugkörpern, Röntgenschutzschilde und Wuchtmunition, Abb. 1.9.

Abb. 1.9 Panzerbrechendes Wuchtgeschoss aus Wolframschwermetall (Metals Handbook, 9th Ed., Vol. 7, S. 689; ASM, Metals Park, OH, 1984)



Auch Reibwerkstoffe zur Übertragung höchster Reibleistungen bestehen aus einem metallischen Bindemetall mit eingelagerten Festschmierstoffen und so genannten Reibungsstabilisatoren. Das Bindemetall ist meistens ein Kupferbasiswerkstoff, etwa Zinnbronze, kann aber auch aus Eisenbasis- oder anderen metallischen Materialien gefertigt werden.

Als Festschmierstoffe dienen vorwiegend grobe Kohle- und Graphitkörnungen, Sulfide, hexagonales Bornitrid etc., als Reibungsstabilisatoren oxidische und andere keramische Partikelchen, in manchen Fällen auch hochlegierte oder hochschmelzende metallische Partikel, die in der Matrix nicht gelöst werden. Es gibt zwei wesentliche Anwendungsfelder, Nass- und Trockenlauf. Nasslaufende Reibbeläge brauchen große Volumenanteile offener Porosität, damit sich keine hydrodynamischen Schmierfilme bilden können. Abbildung 1.10 gibt ein Beispiel für den komplexen Gefügebau eines trockenlaufenden Reibwerkstoffs mit geringer Porosität. Benutzt werden diese Materialien zum Bremsen von Flugzeugen, Hochgeschwindigkeitszügen, Rennwagen und einigen Motorrädern. Weil der Anteil nichtmetallischer Bestandteile sehr hoch sein kann, haben diese Werkstoffe nur geringe Festigkeit. Deshalb werden die aktiven Reibwerkstoffe in solchen Fällen in Nöpfchen zusammengehalten und beim Sintern auf einem Stahlträger verlötet.

Das andere Anwendungsgebiet sind gesinterte Reibbeläge auf Kupplungselementen für den Betrieb unter Öl bei hohen Belastungen, Abb. 1.11. Der Reibbelag wird dazu mit großem Volumenanteil an offener Porosität auf dem Stahlträger aufgesintert. Nach dem Sintern prägt man zur besseren Ölabfuhr ein Rillenmuster in den Belag. Anwendungen finden sich vor allem in Kupplungen von schweren Baumaschinen und in Militärfahrzeugen, ebenso in der Synchronisierung von Pkw-Schaltgetrieben.

Abb. 1.10 Gefüge eines Bremsbelags einer Hochleistungsbremse; unten Stahlträger, schwarz Graphit, helle Einschlüsse Chromkarbid, Bindemetall Kupfer, Lot zum Stahlträger Silberlot

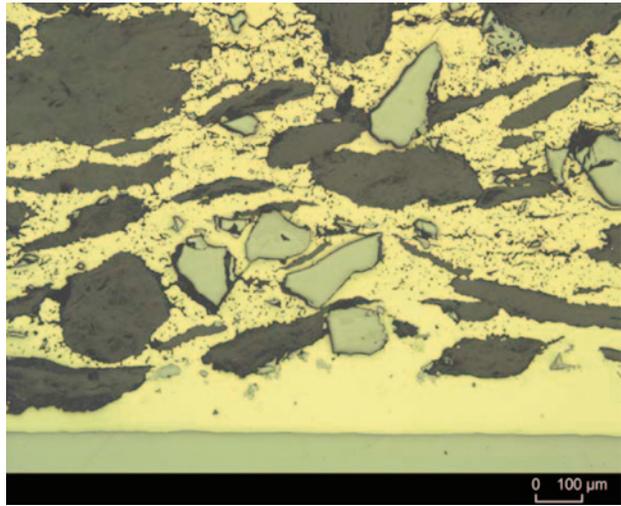


Abb. 1.11 Metallische Reibbeläge für Kupplungen und Bremsen (MIBA)



Ähnliche Techniken wie bei der Fertigung von Reibbelägen wendet man auch an, um Gleitlagerwerkstoffe herzustellen. Gewöhnlich werden dazu größere Mengen Festschmierstoffe in eine Matrix aus Kupferlegierungen eingelagert. Der häufigste Festschmierstoff ist Graphit, für manche Zwecke eignen sich Sulfide hochschmelzender Metalle besser. Das Gefüge eines Bronze-Graphit-Gleitlagers ist in Abb. 1.12 wiedergegeben. Solche Lagerun-

Abb. 1.12 Gefüge eines Bronzewerkstoffs mit Graphiteinlagerungen

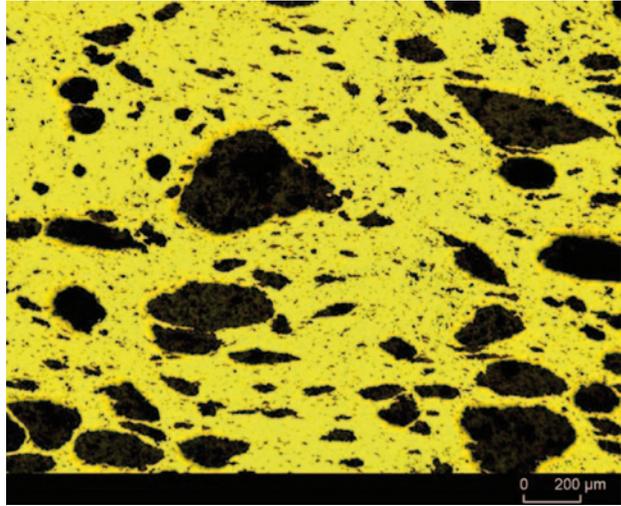
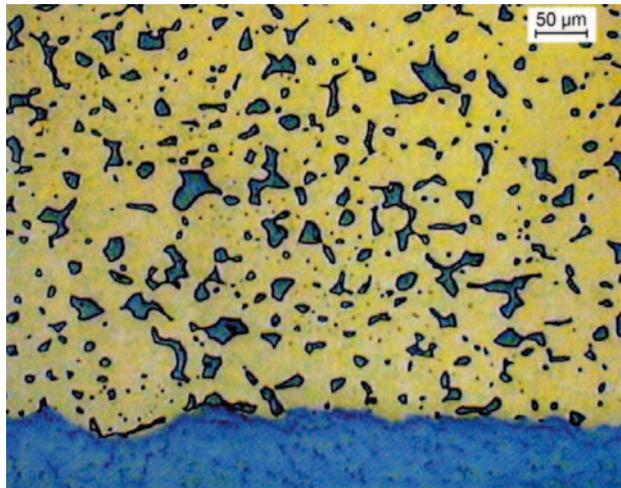


Abb. 1.13 Gefüge eines Verbundlagers aus CuSn10 mit 10 % eingelagertem Blei; unten Stahlblechträger (KS Kolbenschmidt)



gen zeigen ausgezeichnete Notlaufeigenschaften bei Mangelschmierung oder Trockenlauf. Viele dünnwandige Gleitlager werden als kontinuierliche Stahlbänder mit aufgesintertem Lagermetall gefertigt. Dazu lässt man die Bestandteile des Lagermetalls aus einem Breitschlitztrichter als dünne Schicht auf das Stahlband rieseln, sintert das Pulver auf den Stahl auf, walzt das vorgesinterte poröse Verbundmaterial kalt zu voller Dichte, lässt das gewalzte verdichtete Material einen weiteren Sinterofen passieren, worauf gegebenenfalls ein zweiter Walzstich folgt.

In der Vergangenheit waren besonders Bleibronzen, Abb. 1.13, für diese Lager sehr gängig. Aus Umweltgründen wird Blei mehr und mehr durch Wismut ersetzt.

Abb. 1.14 Gleitlager aus Metall-Kunststoff-Verbundwerkstoffen (GGB Bearing Technology)



Bei einer anderen Art von Gleitlagern wird nach einer vergleichbaren Methode kugelige Bronze auf Stahlblech aufgesintert und nur leicht zur Glättung der Oberfläche gewalzt. Die dabei verbleibende Porosität wird mit Kunststoff, meistent mit Polytetrafluoräthylen gefüllt, um adhäsive Reibung zu senken. Eine Auswahl an Gleitlagermaterialien mit Kunststoffeinlagerungen ist in Abb. 1.14 dargestellt.

Neben vielen anderen Matrixmetallen mit Hartstoffeinlagerungen zur Verbesserung des Verschleißverhaltens und statischer Festigkeitskennwerte besonders unter Druck gibt es eine Gruppe von Werkzeugwerkstoffen, bei denen Diamanten oder kubisches Bornitrid in einem metallischen Binder gehalten werden. Bei sehr hohem Anteil an Hartstoff und Bindergehalten unter etwa 5 % verwendet man die Materialien in Form von Wendschneidplatten in der Zerspanung von Metallen. Mit groben Einlagerungen von etwa 10 bis 30 Vol-% in Kobalt- oder Kupferbasismetall dienen diese Stoffe eher zur Bearbeitung und zum Trennen von Glas, Mineralien und Baustoffen. Dazu werden relativ einfache Segmente auf Werkzeuggrundkörper aus Stahl aufgelötet. Eine Auswahl zeigt Abb. 1.15. Zum Aussägen großer Blöcke aus Steinbrüchen oder zum Zersägen von Bauwerken werden z. B. Perlen aus Metallbinder mit grobem Diamantkorn auf Stahlseile aufgefädelt und als Endlosschleife unter Spannung durch das zu trennende Material gezogen.

Diese Anordnung wird Seilsäge genannt und vielfältig bei schwierigen Abbrucharbeiten eingesetzt. Aufgelötete Segmente spielen eine wichtige Rolle bei Kreissägeblättern, bei Bohrkronen für Kernlochbohrungen, für Fräser zum Abarbeiten verschlissener oder unebener Straßendecken, für Trennscheiben oder bei Werkzeugen für die Glasbearbeitung. In Abb. 1.16 ist ein Ausschnitt aus einer Bohrkrone wiedergegeben. In Bearbeitungsrichtung ist der kantige Diamant freigelegt, hinter dem Diamantkorn bildet sich während der Benutzung ein Strömungsschatten aus Bindemetall, der den Diamant abstützt.

Bei einer weiteren Familie pulvermetallurgischer Materialien belässt man den Werkstoff offenporig, um die Porosität technisch zu nutzen. Bei der einen Anwendungsgruppe wird das Porenvolumen mit Schmieröl getränkt. Man erhält selbstschmierende Gleitla-

Abb. 1.15 Trenn- und Schleifwerkzeuge mit Segmenten oder Belägen aus superharten Schleifmitteln in Bindemetall auf Stahlträgern (Saint-Gobain Abrasives)

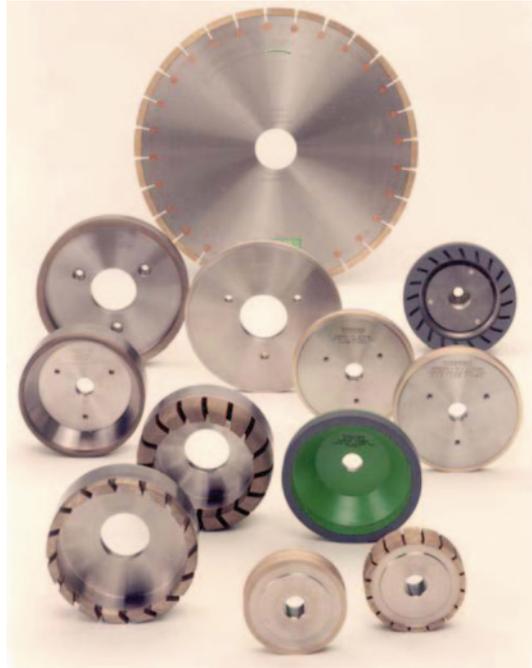


Abb. 1.16 Bohrkronensegment nach Benutzung (Hilti)



gerwerkstoffe, die bei sachgemäßer Verwendung über mehrere Jahrzehnte wartungsfrei betrieben werden können, Abb. 1.17. Typische Werkstoffe sind Bronzen mit 10 % Zinn und niedriglegierte oder unlegierte Stähle, die auch nach Einsatzhärten und Schleifen verwendet werden. Anwendungen finden sich in Phonogeräten, Heimwerker- und Küchenmaschinen sowie in der Automobiltechnik.

Abb. 1.17 Selbstschmierende Gleitlager aus Bronze und Stahl (Ames)



Abb. 1.18 Filterelemente aus kugelliger Bronze (GKN Sinter Metals)



Bei der anderen Anwendungsgruppe hochporöser Werkstoffe handelt es sich um metallische Filtermedien, die aus kugeligem Bronzegranulat, Abb. 1.18, aus unregelmäßigen rostfreien Stahlpulvern, Abb. 1.19, oder aus Stahlfaservlies, Abb. 1.20, das auf ein abstützendes rostfreies Stahlgewebe aufgesintert wird, hergestellt werden. Außer rostfreien Stählen kommen auch für besonders hohe Temperaturen Nickelbasislegierungen oder für extremen Korrosionsangriff Titan zum Einsatz.

Abb. 1.19 Filterelemente aus rostfreiem Stahlpulver (GKN Sinter Metals)



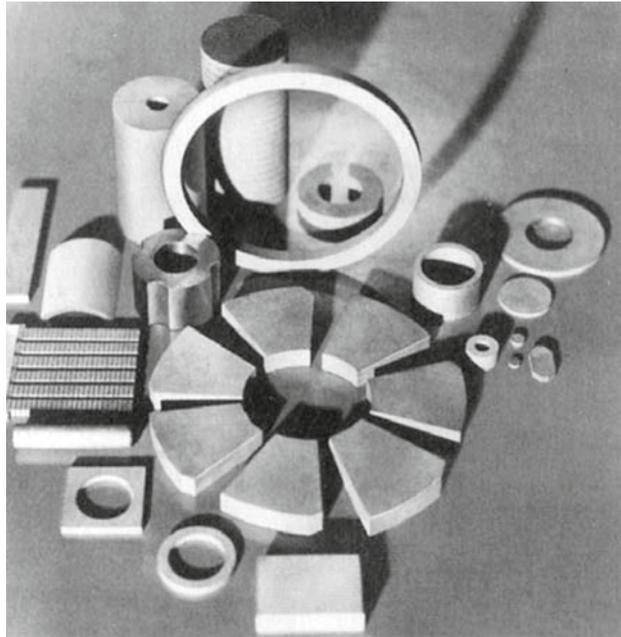
Abb. 1.20 Filter aus rostfreiem Stahlfaservlies (GKN Sinter Metals)



Hart- und Weichmagnete werden für viele Anwendungen aus Pulvern gefertigt, wobei sich die Charakterisierung hart und weich nicht auf mechanische, sondern auf magnetische Eigenschaften bezieht. Unter Hartmagneten versteht man Permanentmagnete, die einer Umpolarisierung einen möglichst großen Widerstand entgegensetzen sollen. Im Gegensatz dazu sollen sich Weichmagnete mit möglichst geringen Verlusten ummagnetisieren lassen.

Die Rohstoffe für die meisten hartmagnetischen Werkstoffe sind nicht plastisch verformbar. Vor dem Pressen werden die einzelnen Pulverpartikelchen im Werkzeug elektromagnetisch ausgerichtet, die Formgebung ist überwiegend geometrisch einfach. Bei kleineren Stückzahlen werden die Bauteile aus Blöcken herausgetrennt. Abbildung 1.21 zeigt einige gesinterte hartmagnetische Bauteile.

Abb. 1.21 Beispiele für gesinterte hartmagnetische Bauteile (Vacuumschmelze)



Anhand der wenigen Beispiele wird deutlich, welchen Bogen die Pulvermetallurgie spannt. Pulvermetallurgische Werkstoffanwendungen finden sich überall in der Technik, ohne dass man sich dessen bewusst ist. Besondere Stärken hat die Verfahrensfamilie auf dem Gebiet komplexer mehrphasiger Materialien, bei der homogenen und isotropen Verteilung von Phasen, bei der Herstellung von Werkstoffen aus nicht ineinander löslichen Bestandteilen, für die Erzeugung hochschmelzender Metalle, in der Fertigung poröser, permeabler Strukturen oder von Strukturen mit sehr großen spezifischen Oberflächen und in der Massenproduktion wiederholgenauer Formteile. Soweit keine großen Werkzeugkosten erforderlich sind, eignen sich pulvermetallurgische Verfahren für Kleinserien oder Einzelfertigung, z. B. bei sehr hohen Materialkosten. Vor allem bei der Entwicklung neuer maßgeschneiderter Werkstoffe für Sonderanwendungen sind pulvermetallurgische Fertigungstechniken unverzichtbar.

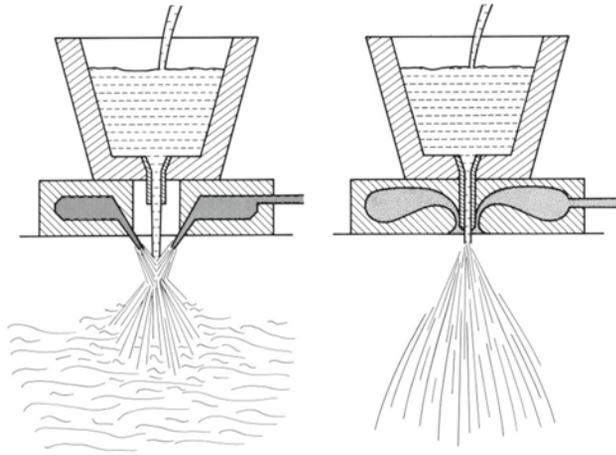
2.1 Pulverherstellung

Es gibt zahlreiche Methoden, Metallpulver herzustellen, von denen hier nur einige besonders wichtige kurz besprochen werden können. Große industrielle Bedeutung hat die Verdüsung einer Schmelze mit Wasser. Im einfachsten Fall lässt man einen flüssigen Metallstrom aus einer Keramikdüse im Boden eines Gießtrichters im freien Fall ausströmen, Abb. 2.1. In kurzem Abstand unter dem Ende der Schmelzedüse trifft aus einer konzentrisch angeordneten Ringdüse Wasser mit hohem Druck unter einem Winkel von ungefähr 30° aus, wodurch die Schmelze mechanisch zerlegt wird und sehr rasch erstarrt. Alternativ zu Ringdüsen werden in manchen Anlagen zwei bis vier Einzeldüsen auf die Schmelze gerichtet. Den entstehenden Partikelchen verbleibt dabei keine Zeit, sich unter dem Einfluss der Oberflächenspannung zur Kugel zusammenzuziehen. Deshalb entstehen bei der Wasserverdüsung Pulver von unregelmäßiger Gestalt. Der Wasserdruck und die Überhitzung der Schmelze sind ausschlaggebend für die mittlere Partikelgröße. Heiße Schmelzen ergeben wegen der verringerten Viskosität und Oberflächenspannung feinere Pulver. Als Faustformel gilt, dass eine Verdopplung des Wasserdrucks die mittlere Partikelgröße um etwa 40 % senkt [DUNK03]. Für Eisen- und niedrig legierte Stahlschmelzen betragen die Wasserdrücke etwa 100–200 bar, pro kg Pulver verbraucht man 6–8 l Wasser, übliche Durchsätze liegen bei 100–1.000 kg Eisen pro Minute. Mit diesen Parametern erhält man mittlere Partikeldurchmesser unter $100\ \mu\text{m}$ mit einem Grobanteil oberhalb von $200\ \mu\text{m}$ von etwa 10 % [DUNK03].

Beim Kontakt der frisch geschaffenen Metalloberfläche mit dem Verdüsungswasser entsteht Metalloxid aus der Zerlegung von Wassermolekülen. Dadurch wird Wasserstoff freigesetzt, der nicht zu Knallgasexplosionen führen darf. Zu diesem Zweck kann man die Anlage unter Stickstoff setzen oder mit soviel Luft spülen, dass der Wasserstoffanteil an der Atmosphäre stets unterhalb der Zündgrenze von etwa 5 % bleibt.

Der typische Materialfluss einer Eisenverdüsungsanlage ist in Abb. 2.2 wiedergegeben [ŠALA95, HÖGA97a]. Besonders für die Herstellung von hoch kompressiblen Eisenpul-

Abb. 2.1 Wasserverdü-
nung mit frei fallendem
Schmelzestrahл, links, und
Gasverdüsung mit anlie-
gender Ringdüse, rechts,
schematisch



vern werden im Wesentlichen Karosserieblechabfälle oder andere Tiefziehbleche mit sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt als Ausgangsstoffe verwendet und im Elektroofen erschmolzen.

Nach dem schlackefreien Bodenabstich des flüssigen Eisens in eine Pfanne wird Sauerstoff in die Schmelze geblasen, um Kohlenstoff, Schwefel oder eventuelle Reste sauerstoffaffiner Legierungselemente zu verbrennen. Als einzige Verunreinigung verbleibt etwa 0,08 % Mangan im Material. Anschließend lässt man die hochreine Schmelze bei etwa 1.680 °C genau dosiert aus dem Boden der Pfanne in einen Gießtrichter oberhalb der Verdünnungsanlage ausströmen. Die Pulverpartikel sammeln sich am Boden der Anlage und werden mit Schlamm-pumpen abgesaugt. Es folgen eine erste magnetische Abscheidung grober keramischer Partikel im nassen Zustand, eine Entwässerung sowie eine Trocknung im Drehrohrofen, eine weitere Magnetseparation im trockenen Zustand und eine Absiebung des Grobanteils.

Bei der Wasserabschreckung wird Eisenpulver trotz der sehr geringen Kohlenstoffgehalte martensitisch und hat schlechte Kompressibilität. Um die Pressbarkeit zu verbessern, muss das Pulver martensitfrei gegläht werden. Das geschieht auf Stahl- oder Nickelbasisblechbändern in kontinuierlichen Durchlauföfen bei 800–900 °C in einer reinen Wasserstoffatmosphäre oder in gespaltenem Ammoniak mit 75 % H₂ und 25 % N₂. Der Sauerstoffgehalt der Oberflächenoxide von etwa 1 %, die sich bei der Verdünnung gebildet haben, wird bei dieser Behandlung auf Werte unter 0,1 % reduziert, eventuelle Kohlenstoffreste reagieren zu CO. Das Pulver versintert dabei zu einem losen Partikelkuchen, der gebrochen und abgesiebt wird. Abschließend werden größere Pulvermengen auf einheitliche Verarbeitungseigenschaften homogenisiert und zwischengelagert oder kundenspezifisch zu pressfertigen Mischungen konfektioniert, automatisch verpackt und verschifft.

In anderen Anlagen zur Wasserverdünnung von Eisen wird von Roheisen mit 3,5 % Kohlenstoff ausgegangen. Bei der Verdünnung und Abkühlung wird ein hoher Sauerstoffgehalt

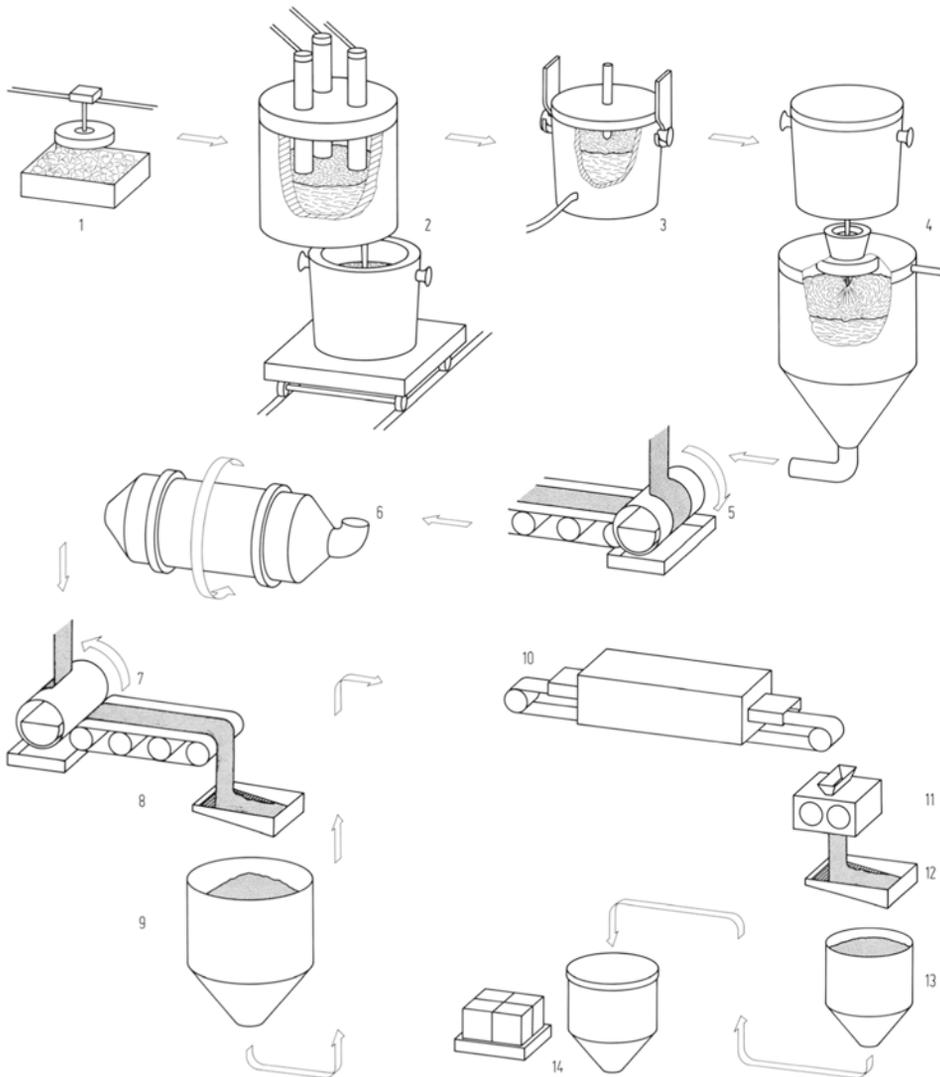


Abb. 2.2 Prinzipieller Ablauf einer Wasserverdüngungsanlage für Eisenpulver aus hochreinem Schrott. 1 Ausgewählte Eisenschrotte. 2 Elektrolichtbogenofen mit Bodenabstich. 3 Stopfenpfanne. 4 Wasserverdüngung. 5 Magnetseparation im nassen Zustand und Entwässerung. 6 Trocknen. 7 Magnetseparation. 8 Sieben. 9 Homogenisieren. 10 Reduktionsglühung. 11 Brechen. 12 Sieben. 13 Homogenisierung. 14 Verpacken, Zwischenlagern

in Form von Oberflächenoxiden angestrebt, damit bei der Reduktionsglühung möglichst stöchiometrisch aus dem C-Gehalt des Pulvers und dem Sauerstoffgehalt der Oberflächenoxide CO_2 entsteht. Die Reduktion wird durch den hohen Wasserstoffanteil einer NH_3 -Spaltgasatmosphäre bei etwa 1.000°C unterstützt. Reicht die Oxidbildung bei Verdüsung

und Abkühlung nicht aus, das Pulver vollständig zu entkohlen, kann man vor der Glühung gemahlene Walzzunder untermischen, um die Stöchiometrie einzustellen [ASM98].

Außer Eisen werden auch niedriglegierte Stähle, rostfreie Stähle, hochlegierte Werkzeugstähle, Nickel und Kupfer sowie ihre Legierungen, Silber und Zink wasserverdüst. Entscheidend ist, dass die Oxide aus der Verdüsung wirtschaftlich reduziert werden können oder, z. B. bei der Verarbeitung von rostfreien Stählen, im weiteren Prozessablauf reduziert werden. Neben Wasser verwendet man bei sehr sauerstoffaffinen Legierungen in Sonderfällen auch flüssige Kohlenwasserstoffe zur Verdüsung. Dabei nehmen die Pulveroberflächen keinen nennenswerten Sauerstoff auf, was Vorteile bei der Weichglühung von Stählen haben kann, vor allem bei höheren Gehalten an Chrom, Mangan oder Vanadium, bei denen die Reduktion von Oxiden ohne feste Versinterung nur im Vakuum abläuft.

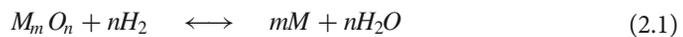
Als Verdüsumedium kommen auch Gase in Frage, die meistens mit dem Metall der Schmelze innerhalb der kurzen Einwirkdauer bis zum Erkalten nicht merklich reagieren sollen. Auf diese Weise erhält man sehr sauerstoffarme Pulver, die gewöhnlich im weiteren Prozess niemals mit Feuchtigkeit oder Luftsauerstoff in Kontakt kommen dürfen. Als Verdüsumgase werden bei hochlegierten Werkzeugstählen Stickstoff, für Nickelbasislegierungen Argon eingesetzt.

Eine Besonderheit stellt Luft als Verdüsumgas dar, weil sich im Kontakt mit dem Luftsauerstoff bei einigen Metallen, besonders Aluminium, Zink und zinkhaltigen Kupferlegierungen, sehr schnell eine feste Oxidschale um jedes Partikelchen bildet. Die Oberflächenspannung der Schmelze reicht nicht aus, die oxidierten Partikel kugelig einzuformen, so dass Pulver mit unregelmäßiger Morphologie entstehen. Dies hat bei der Handhabung von Aluminiumpulver große Vorteile, weil das unregelmäßige Pulver beim Pressen Grünfestigkeit entwickelt und die Oxidhaut aus der Verdüsumg Explosionen bei Luftkontakt verhindert. Um Explosionen bei der Verdüsumg zu vermeiden, muss stets mit großem Luftüberschuss gearbeitet werden, damit die Oxidation aller Partikeloberflächen abgeschlossen ist, ehe das Pulver in Sammelbehältern aufgefangen wird.

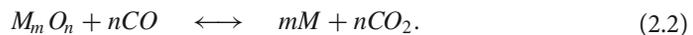
Die Konstruktion der Düsen zur Gasverdüsumg unterscheidet sich etwas von der bei Wasserverdüsumg. Das Gas trifft in einem wesentlich flacheren Winkel auf den Schmelzestrahle. Da bei technischen Anlagen stets Überschallgeschwindigkeiten im Gasstrom auftreten, übt das expandierende Verdüsumgas starke Scherspannungen auf die Schmelze aus. Der Schmelzestrahle ist bei Gasverdüsumg dünner als bei Wasserverdüsumg, und die Gasdrücke überschreiten kaum 15 bar, weil oberhalb dieses Wertes keine nennenswerte Verringerung des mittleren Partikeldurchmessers mehr erreicht wird. Statt Ringdüsen werden auch Anlagen eingesetzt, in denen das Verdüsumgas aus einzelnen Öffnungen austritt, die kreisförmig um den Strahle des flüssigen Metalls angeordnet sind. In anderen Fällen verwendet man asymmetrische Anordnungen oder senkrecht zur Schmelze auftreffende Gasströme, um horizontal zu verdüsumg. Die genauen Einzelheiten sind meistens Betriebsgeheimnis, da die Düsenkonstruktion und die Führung des Verdüsummediums entscheidenden Einfluss auf den Prozess ausüben.

Wird in den Folgearbeitsgängen eine möglichst große Packungsdichte des Pulvers benötigt, lässt man die Partikelchen im freien Fall erstarren, damit die Oberflächenspannung der Schmelze jedes Pulverkorn zur Kugel einformen kann. Feine Partikelchen erstarren schnell und werden durch Gaswirbelungen in Schwebelage gehalten. Dadurch kommt es zu Kollisionen mit großen Teilchen, die noch teilflüssig sind und die feinen Partikelchen oberflächlich binden und verschweißen lassen. Große Pulverkörner sind deshalb überwiegend mit einer Vielzahl eingefangener feiner Satellitenpartikel dekoriert, die die Fließ-eigenschaften des Pulvers beeinträchtigen und die Schüttdichte herabsetzen.

Metalle mit mäßiger Sauerstoffaffinität wie Cu, Ni, Fe, Mo, W lassen sich durch Reduktion im festen Zustand mit H_2 oder CO aus ihren Oxiden gewinnen. Die Summenreaktionen lauten für ein Metalloxid mit der Stöchiometrie $M_m O_n$



bzw.



Dabei steht M für das betrachtete Metall, m und n sind die beteiligten Mole. Ob die Reaktion abläuft, ergibt sich aus der Verringerung der freien Enthalpie bei der Reaktion. Darauf wird im Abschnitt über Schutzgase beim Sintern näher eingegangen. Starke Karbidbildner eignen sich nicht zur Reduktion in Kohlenmonoxid, da sich statt des Metalls Karbide bilden.

Zur Reduktion sehr sauerstoffaffiner Metalle, z. B. bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen aus ihren Oxiden für Permanentmagnete, muss man stärkere Reduktionsmittel als H_2 oder CO einsetzen, etwa metallisches Kalzium, um den Sauerstoff zu binden.

Die bekannteste Verfahrensgruppe zur Festphasenreduktion von Metallen aus ihren Oxiden ist die Herstellung von Eisenpulvern aus hochreinen oxidischen Erzen oder aus Walzzunder, der bei der Aufheizung z. B. großer Brammen vor der Warmumformung entsteht. Ein solches Verfahren ist der Schwammeisenprozess von Höganäs AB in Schweden, Abb. 2.3 [HÖGA97a].

Ausgangsstoff ist ein gemahlenes, schwefel- und phosphorarmes vulkanisches Fe_3O_4 -Erz, das nach einer Trocknung in Magnetseparatoren von grober Gangart getrennt wird. Parallel wird eine feinkörnige Mischung aus 85 % Koksgrus und 15 % gemahlenem Kalkstein aufbereitet, die mit dem Erz konzentrisch in rohrförmige SiC-Retorten eingefüllt wird, Abb. 2.4. Bis zu 36 dieser Retorten befinden sich auf einem Herdwagen, der auf Schienen durch einen gasbeheizten Tunnelofen von 260 m Länge gefahren wird. In der Hochtemperaturzone des Ofens herrschen etwa 1.260 °C. Aus dem Kalkstein und dem Koksgrus und dem Sauerstoff des Erzes bilden sich CO_2 bzw. CO, das unter weiterer Reduktion des Erzes zu CO_2 oxidiert. Im Kontakt mit dem Koks entsteht daraus erneut CO, bis der Koks bzw. der Sauerstoffgehalt des Erzes verbraucht sind. Der Schwefelgehalt des Kokes wird an das Kalksteinmehl der Reduktionsmischung gebunden. In der Kühlzone

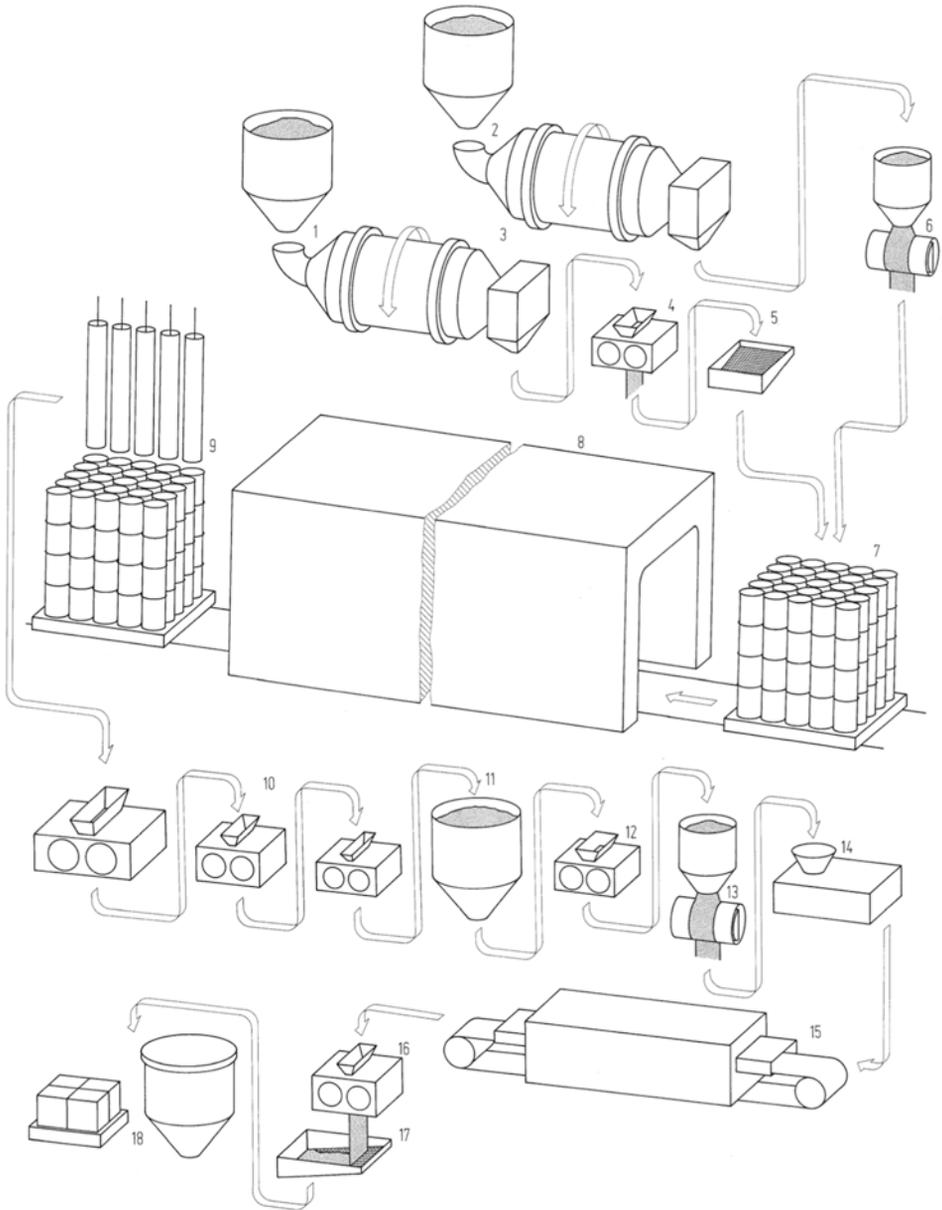
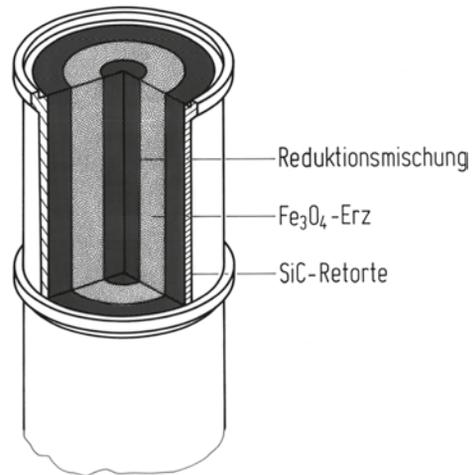


Abb. 2.3 Herstellung von Schwammeisen nach dem Höganäs-Verfahren. 1 Reduktionsmischung aus Koksgrus und Kalkstein. 2 Eisenerz. 3 Trocknen. 4 Brechen. 5 Sieben. 6 Magnetseparation. 7 Füllen der SiC-Rohre. 8 Reduktion des Erzes im Tunnelofen. 9 Entnahme des Eisenschwamms. 10 Mehrstufiges Zerkleinern. 11 Zwischenlagerung. 12 Brechen. 13 Magnetseparation. 14 Kollern und Sieben. 15 Weichglühung und Nachreduktion. 16 Brechen. 17 Sieben. 18 Verpacken, Zwischenlagern

Abb. 2.4 Schichtenfolge innerhalb der SiC-Retorten innerhalb der Höganäs-Verfahren

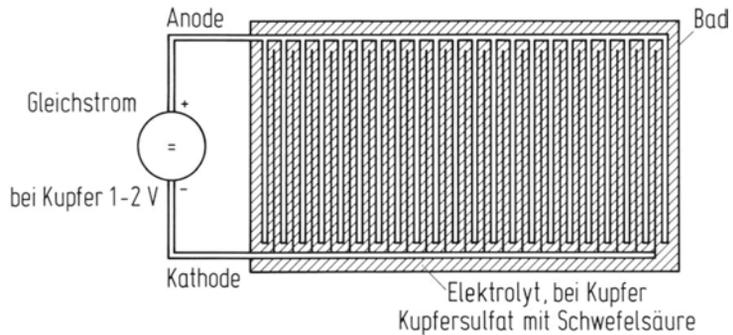


des Ofens geht die Temperatur auf etwa 250 °C zurück. In den Retorten ist während der Ofenreise von etwa 68 h eine dickwandiges Rohr aus Schwammeisen mit einer Dichte von ungefähr 1,8 g/cm³ entstanden, daneben finden sich Koksreste und eine schwefelreiche Asche. Das Schwammeisenrohr wird entnommen, die Retorte von Koks und Asche gesäubert und neu befüllt. Der Eisenschwamm wird in mehreren Stufen zerkleinert, gebrochen, gereinigt und abgesiebt, ehe in einem Glühvorgang bei etwa 900 °C in Wasserstoff Reste von Oxiden und Kohlenstoff reduziert bzw. verbrannt werden. Der entstehende Partikelkuchen wird abschließend gebrochen und abgesiebt. Schwammeisenpulver haben höhere Grünfestigkeit, aber geringere Pressbarkeit als wasserverdünnte Eisenpulver.

Einige Metalle, für pulvermetallurgische Zwecke vor allem Kupfer, Silber und Eisen, können mit vertretbaren Kosten in Pulverform elektrolytisch aus wässrigen Lösungen abgeschieden werden, indem man eine Anode des Metalls in einem geeigneten Bad auflöst und auf einer Kathode auskristallisieren lässt. Damit sich auf der Kathode kein zusammenhängender Film, sondern diskrete Partikelchen abscheiden, muss die Konzentration der Metallionen in der wässrigen Lösung gering gehalten werden. Die elektrische Leitfähigkeit der Lösung wird durch Säurezusätze erhöht. Die Stromdichte an der Kathode muss hoch sein, die Bäder werden auf Temperaturen unter 60 °C gekühlt und nur sehr wenig bewegt [SCHA94, DUNK03].

Das Hauptprodukt ist elektrolytisches Kupferpulver. Das Bad besteht aus Kupfersulfat mit einem Schwefelsäurezusatz. Die Stromdichte an der Anode beträgt 300–700 A/m², an der Kathode 2.000–4.000 A/m², die Badspannung 1–2 V. Dazu muss die Kathodenoberfläche entsprechend kleiner sein als die Anodenfläche. Für höchste metallurgische Reinheit des Pulvers muss bereits die Anode eine hohe Reinheit haben. Nur so lassen sich bei Kupfer und Silber höchste elektrische Leitfähigkeiten erreichen. Die Kathode in Form von Stäben oder Streifen besteht aus Kupfer, einer Blei-Antimon-Legierung, Aluminium oder rostfreiem Stahl. Das Arbeitsprinzip ist schematisch in Abb. 2.5 dargestellt.

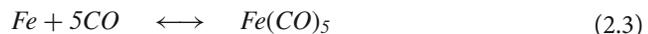
Abb. 2.5 Prinzipieller Aufbau einer Elektrolysezelle zur Metallpulvererzeugung



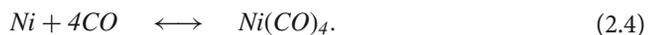
Die Kupferkonzentration im Bad, die zwischen 5 und 35 g/l liegt, sowie die chemische Zusammensetzung des Bades bestimmen die Pulvermorphologie. Dabei werden Schwefelsäuregehalte von 100 bis 250 g/l verwendet. Ausgeprägt dendritische Pulver mit Schüttdichten von etwa $0,5 \text{ g/cm}^3$ verlangen niedrige Metallkonzentration und einen Chlorzusatz zum Bad. Weitere Additive können Borsäure, Glukose u. a. sein, um die Pulverform zu beeinflussen. Mit der Badchemie und der Kupferkonzentration lässt sich die Schüttdichte, die ein Maß für die Unregelmäßigkeit der Morphologie ist, zwischen 0,5 und etwa $3,5 \text{ g/cm}^3$ variieren. Die Partikelgröße und die Schüttdichte werden durch das Ernteintervall mitbestimmt. Da die Haftung an der Kathode nicht besonders groß ist, reicht es, die Kathode periodisch zu rütteln, abzustreifen oder zu bürsten. Im vollautomatischen Betrieb sammelt sich das Pulver auf dem Boden der elektrolytischen Zelle und wird nach einigen Tagen geborgen. Daran schließen sich Waschen, Trocknen, Sieben und eventuell eine Reduktionsglühung bei 480–760 °C in Stickstoff mit geringen Gehalten an CO und H₂ an. Der Energieverbrauch beträgt im Mittel etwa 2 kWh/kg Kupferpulver [DUNK03].

Feine, kugelige Metallpulver lassen sich als Eisen, Nickel, Kobalt und Molybdän, bei dem allerdings die H₂-Reduktion aus Molybdänoxid erheblich größere Bedeutung hat, aus Karbonyldämpfen ausfällen. Für pulvermetallurgische Anwendungen haben Karbonyleisenpulver großen Marktanteil bei den spritzfähigen Vorprodukten des Metallpulverspritzgusses und Karbonynickel als Feinpulver für Legierungszwecke in vielen Sinterstählen.

Beim Karbonylprozess überführt man kostengünstige metallische Ausgangsstoffe bei materialspezifischen Drücken und Temperaturen im Kontakt mit Kohlenmonoxid exotherm in den dampfförmigen Karbonylzustand. Eisen kann mehrere Karbonyle bilden, angestrebt wird Eisenpentakarbonyl Fe(CO)₅:



Nickel bildet nur ein Karbonyl, Nickeltetrakarbonyl Ni(CO)₄:



Beide Karbonyle sind sehr giftig, so dass der Prozess gekapselt ablaufen muss. Je nach metallischen Einsatzmaterialien bilden sich beide Karbonyle gleichzeitig. Unter Druck kondensieren die Gase und können durch Destillation getrennt werden, da bei Umgebungsdruck $\text{Fe}(\text{CO})_5$ einen Siedepunkt von $103\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Ni}(\text{CO})_4$ einen Siedepunkt von $43\text{ }^\circ\text{C}$ hat. Der flüssige Zustand ist zur Zwischenlagerung gut geeignet. Zur Gewinnung des Metalls muss das Karbonyl zersetzt werden, wobei es sich um eine endotherme Reaktion handelt.

Großtechnisch wird $\text{Ni}(\text{CO})_4$ bei etwa 70 bar und $180\text{ }^\circ\text{C}$ als Flüssigkeit hergestellt. Zur Zersetzung wird die Flüssigkeit verdampft und in Zersetzungsbehälter geleitet, deren Wände auf $250\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$ beheizt sind. Dabei entstehen im Temperaturbereich um $200\text{ }^\circ\text{C}$ Keime, um die metallisches Nickel kugelig ankrystallisiert. Bei höheren Temperaturen und Karbonylkonzentrationen entstehen viele Keime und damit sehr feine Pulverpartikelchen. Zur Steuerung der Partikelgröße wird auch der Druck, bei dem die Karbonylzersetzung stattfindet, variiert. Die feinsten Partikelchen von nur etwa $3\text{ }\mu\text{m}$ stellen sich bei Zersetzungsdrücken von etwa 250 bar ein. Das bei der Zerlegung freiwerdende Kohlenmonoxid wird wiederverwendet. Der Niederschlag wird gesammelt, in Wasserstoff reduziert, zur Vermeidung von Bränden gezielt rückoxidiert und verpackt [ASM98]. Für pulvermetallurgische Zwecke sind Karbonylnickelpulver mit mittleren Partikeldurchmessern von 3 bis etwa $15\text{ }\mu\text{m}$ handelsüblich.

Eisenkarbonyl für die Pulverherstellung wird typischerweise bei etwa $220\text{ }^\circ\text{C}$ und 170 bar als Flüssigkeit erzeugt. Die Zersetzung der verdampften Flüssigkeit findet bei etwa $250\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ in einer NH_3 -Atmosphäre statt. Eisen katalysiert die beteiligten Gase, wodurch Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff in das Gitter der wachsenden Partikelchen eingebaut werden. Die Ammoniakatmosphäre mindert vor allem den Kohlenstoffgehalt des entstehenden Pulvers. Die hohe Defektdichte führt zu einer Mikrohärtigkeit von etwa 850 HV, die für Formgebungsverfahren ohne plastische Verformung des Pulvers belassen werden kann. Wenn plastische Verformbarkeit gefragt ist, wird eine Glühung bei $500\text{ }^\circ\text{C}$ in Wasserstoff angeschlossen, bei der der Sauerstoff- und der Kohlenstoffgehalt sowie die Pulverhärtigkeit verringert werden.

Beim Karbonylverfahren können Stoffe, die keine Karbonyle bilden, aus dem Endprodukt ferngehalten werden. Das trifft besonders auf S, P, Mn, Si, Cu, As und Sb zu, die nicht in Lösung gehen können. Karbonyleisen ist darüber hinaus sehr arm an Cr, Ni, V und Mo. Hoher Prozessdruck unterstützt die chemische Trennwirkung bei der Herstellung. Karbonyleisen ist in mittleren Partikeldurchmessern von etwa 3 bis $8\text{ }\mu\text{m}$ erhältlich und mit niedrigen C-, N- und O-Gehalten sowie in unreduzierten Zuständen verfügbar [DUNK03].

2.2 Pulvermorphologie

Wesentliche Merkmale von Pulvern sind Form und Größe der Partikel sowie deren Verteilung, die sich bei der Herstellung ergeben. Größe und Morphologie können durch statistische Auswertung von Schattenrissen einer großen Anzahl von Partikelchen in Zahlen gefasst werden. Diese Technik ist noch recht jung und industriell zur Formcharakterisierung

Abb. 2.6 Typisches Aussehen von wasserverdüstern Reineisenpulver

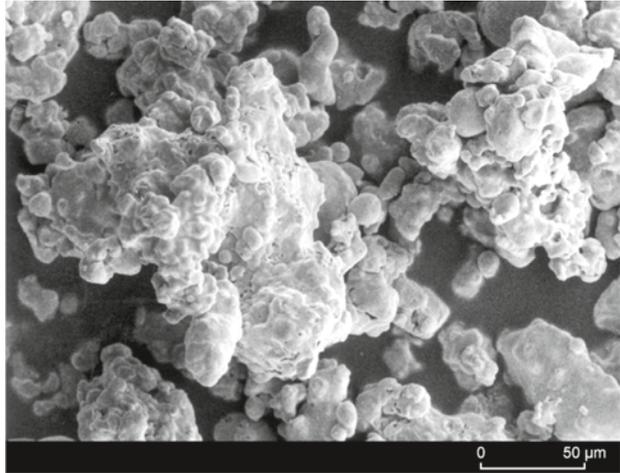
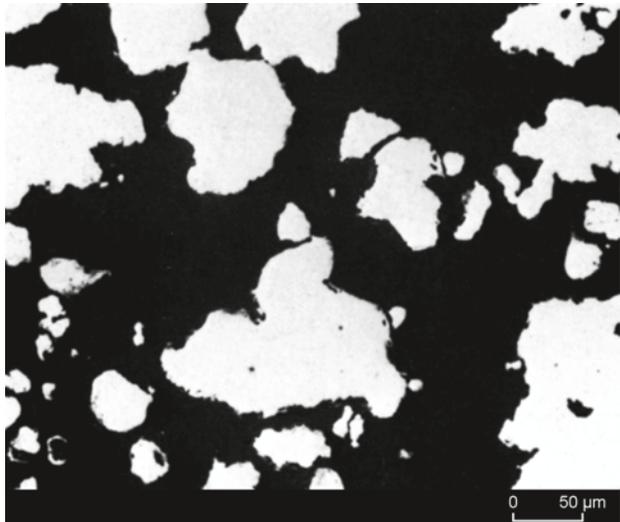


Abb. 2.7 Querschliff durch wasserverdüstertes Reineisenpulver



noch nicht sehr verbreitet, zur Größenbestimmung dagegen gut etabliert. Metallographische Schliffe von Pulvern vermitteln einen Eindruck von der Pulvergestalt, auch hierbei sind quantitative Aussagen über die Form mit Hilfe bildanalytischer Verfahren möglich. Zur Veranschaulichung eignet sich jedoch die Rasterelektronenmikroskopie am besten. In den Abb. 2.6–2.9 werden wasserverdüstertes Reineisen und ein Schwammeisenpulver miteinander verglichen. Das Schwammeisen stammt aus einer Reduktion bei hoher Temperatur von mehr als 1.200 °C. Das wasserverdüsterte Pulver sieht knollig aus und hat eine unregelmäßige Gestalt. An der Partikeloberfläche haften kleinere Teilchen, teilweise finden sich Partikelagglomerate, die beim Brechen nach der Reduktionsglühung nicht zerteilt wurden. Insgesamt ist die Partikeloberfläche verhältnismäßig glatt. Im metallographischen Querschliff, Abb. 2.7, erkennt man nur wenige kleine innere Poren, im Wesentlichen sind