

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

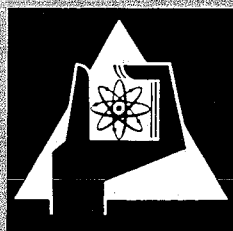
August 1971

KFK 1492

Labor für Elektronik und Meßtechnik

Neues, elektrisches Verfahren
zur Verdichtung technischer Pulver

S. Jacobi, R. Schneider, K. Tradowsky



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



Neues, elektrisches Verfahren zur Verdichtung technischer Pulver

Von Siegfried Jacobi, Rolf Schneider und Klaus Tradowsky *)

Zusammenfassung

Es wird ein neues Verdichtungsverfahren beschrieben, bei dem Pulverteilchen hoher, elektrodynamisch erzeugter Beschleunigung ($20 \cdot 10^3 g$) ausgesetzt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren geschieht die Verdichtung ohne äußere Druckanwendung. Dadurch können verhältnismäßig lange Stäbe mit gleichmäßiger und hoher Dichte (rd. 70 % der theoretischen Dichte) hergestellt werden. Das Verfahren wurde sowohl an oxydischen Pulvern (Al_2O_3 , UO_2) als auch an metallischen Pulvern (Carbonylisen, Molybdän) erprobt.

1. Einleitung

Die Verwendung pulverförmiger Werkstoffe in wissenschaftlichen und technischen Bereichen ist hinsichtlich der geometrischen Formgebung, des Verdichtungsgrades und der Gleichmäßigkeit der Verdichtung von Forderungen abhängig, die mit bisher üblichen Verdichtungsverfahren nur teilweise erfüllt werden.

Zu den wichtigsten herkömmlichen Methoden zählen das Matrizenpressen [1, 2] und das isostatische Pressen [3]. Ebenso muß wegen seiner Bedeutung das Verfahren des Einvibrierens und Rundhämmerns [4] erwähnt werden. Keines dieser Verfahren erfüllt aber summarisch die vorgenannten Forderungen.

Für viele technische Anwendungen tritt jedoch noch die zusätzliche Forderung nach guter Herstellbarkeit und bei radioaktiven Pulvern die Notwendigkeit nach Kontaminationsschutz auf. Das hier beschriebene Verfahren kommt pauschal all diesen Forderungen weitgehend nach, gleichgültig, ob Preßlinge aus oxidischem oder metallischem Pulver herzustellen sind.

Der vorliegende Bericht befaßt sich in erster Linie mit dem elektrotechnischen und elektromechanischen Teil des Verfahrens. Die pulvertechnologischen Versuche und ihre Ergebnisse werden nur soweit gestreift, wie es für das Verständnis des Verfahrens notwendig ist.

2. Grundlage des Verfahrens

Das neue elektrische Verfahren ist elektrodynamischer Natur und nützt die Massenträgheit der einzelnen Pulverteilchen aus, die sich z. B. mit ihrer Schüttdichte in einem Formgefäß (Bild 1) befinden, das beschleunigt wird. Wenn eine homogene Verdichtung verlangt wird, dürfen nur Kräfte F_z in axialer, also in eindimensionaler Richtung auftreten. Zusätzliche radiale Kräfte, wie sie beim Matrizenpressen vorkommen, würden eine dreidimensionale Krafteinwirkung ergeben mit dem Nachteil, daß durch die unterschiedlichen Reibungswiderstände in den einzelnen Richtungen keine gradientenfreie Verdichtung erzielt wird.

Die elektrodynamische Pulververdichtung, die grundsätzlich mittels Trägheitskraft verdichtet, liefert jedoch eine Kraft in eindimensionaler Richtung. Diese ist

$$F_z = m_{pu} b. \quad (1)$$

Dabei stellt m_{pu} die Masse eines Pulverteilchens dar und b die Beschleunigung, die ein elektrodynamisches System auf die Pulverteilchen überträgt. Da m_{pu} klein ist, so muß b groß sein, um überhaupt wirksame Kräfte zu erzeugen. Während des Verdichtens eines Pulverhaufwerkes treten nach der heute

vorherrschenden Ansicht verschiedene Vorgänge zum Teil gleichzeitig auf, die zu einer mehr oder weniger starken Zerkleinerung der Partikel führen [5], und zwar:

1. Zerstörung brückenbildender Partikelanordnungen,
2. Abrieb durch innere Reibung und Wandreibung.

Einen Beitrag zur Verdichtung liefert ferner die plastische Verformung sowie das Einvibrieren der Pulverteilchen. Charakteristisch für den Verdichtungsmechanismus nach dem elektrodynamischen Verfahren ist das Fehlen jeder äußeren Druckanwendung. Die daraus sich ergebenden Vorteile wurden eingangs bereits erwähnt.

3. Theoretische Betrachtungen zur elektrodynamischen Einrichtung

Die in Hochspannungskondensatoren 1 (Bild 1) mit der Kapazität C gespeicherte elektrische Energie E_{el} wird über ein Ignitron 2 auf eine hochspannungsfeste Spule 3 geschaltet. Die Spule 3 liegt mit geringem Abstand z einem Kurzschlußring 4 aus Aluminium gegenüber, der zusätzlich zum Formgefäß ausgebildet sein kann, in welches das zu verdichtende Pulver 5 eingeschüttet wird. Solch eine Anordnung verhält sich wie ein sekundärseitig kurzgeschlossener Transformator, d. h. der Spulenstrom i_1 induziert in dem Kurzschlußring 4 einen um 180° phasenverschobenen Kurzschlußstrom i_2 . Die dabei auftretende senkrechte elektrodynamische Kraft F_z stößt den Kurzschlußring 4 von der festgehaltenen Spule 3 ab. Die Kraft läßt sich nach einem Gesetz der Elektrodynamik [6] angeben zu

$$F_z = i_1 i_2 \partial M / \partial z, \quad (2)$$

wobei M die Gegeninduktivität der Anordnung Spule—Kurzschlußring bei einem Abstand z ist. Für M gilt die Beziehung [7]

$$M = \mu_0 \mu_r N_1 N_2 r \ln(\sqrt{z^2 + r^2}/z) = 4\pi \cdot 10^{-9} (Vs/Acm) N_1 N_2 r \ln(\sqrt{z^2 + r^2}/z) \quad (3)$$

mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} Vs/Acm$ der magnetischen Feldkonstante, $\mu_r = 1$ der Permeabilitätszahl, r dem mittleren Radius der Spule und des Kurzschlußringes, N_1 der Windungszahl der Spule 3, $N_2 = 1$ der Windungszahl des Kurzschlußringes 4 und z dem Abstand zwischen Spule 3 und Kurzschlußring 4. Die Gegeninduktivität M ist eine Funktion der Raumkoordinaten x , y und z . Durch konstruktive Maßnahmen wird jedoch nur die senkrechte Bewegungsrichtung z zugelassen. Die Differentiation in z -Richtung ergibt für Gl. (3)

$$M' = -\mu_0 \mu_r N_1 N_2 \frac{1}{z(r/z) + (z/r)^3}. \quad (4)$$

Damit kann die elektromotorische Kraft F_z , mit welcher der Kurzschlußring 4 von der Spule 3 abgestoßen und somit beschleunigt wird, angegeben werden zu

$$F_z = \mu_0 \mu_r i_1 i_2 N_1 N_2 \frac{1}{(z/r) + (z^3/r^3)}. \quad (5)$$

Da der Radius r der Anordnung groß gegenüber dem Abstand z zwischen Spule und Kurzschlußring ist ($r \gg z$), kann mit folgender Vereinfachung gerechnet werden:

$$F_z \approx \mu_0 \mu_r k i_1 i_2 N_1 N_2 r/z. \quad (6)$$

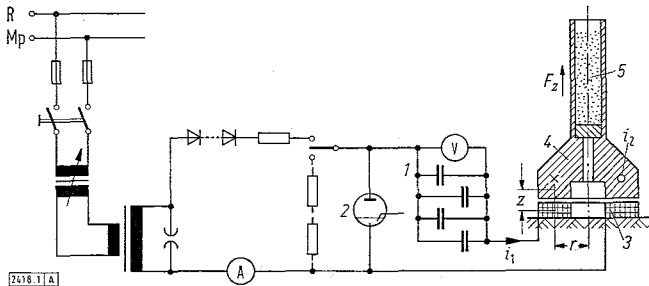


Bild 1. Elektrisches Grundschaltbild. Erläuterungen im Text.

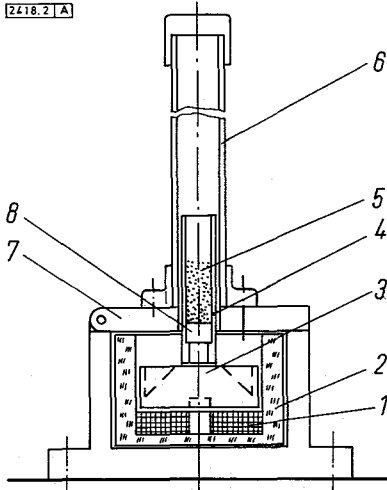


Bild 2. Verdichtungsmechanik. Erläuterungen im Text.

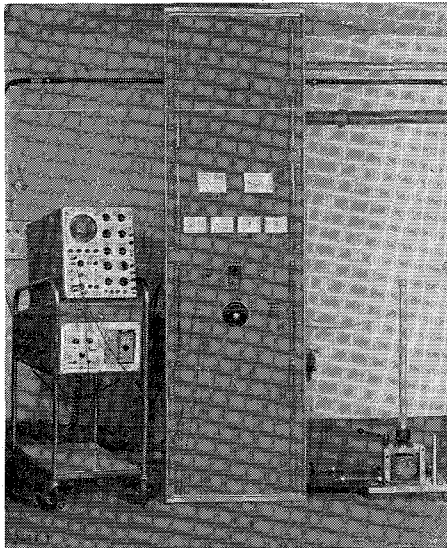


Bild 3. Gesamtaufbau der elektrodynamischen Versuchseinrichtung.

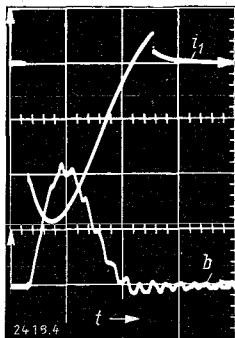


Bild 4. Zeitlicher Verlauf des Entladestromes i_1 und der Beschleunigung b bei $C = 500 \mu\text{F}$, $U_C = 5 \text{ kV}$ und $m = 1150 \text{ g}$.

Maßstab: senkrecht 1 RE $\cong 2,5 \text{ kA}$ für i_1 , 1 RE $\cong 10\,000 \text{ g}$ für b ; waagerecht 1 RE $\cong 0,4 \text{ ms}$ für t .

Der Faktor k ist der Kopplungskoeffizient zwischen der Spule 3 und dem Kurzschlußring 4. Für eine genaue Berechnung von F_z muß jedoch der Hub des Kurzschlußringes berücksichtigt werden, wodurch k nicht konstant bleibt. Mit der Beziehung des sekundärseitig kurzgeschlossenen Transformators [8]

$$(i_1/i_2)_k = N_2/N_1 \quad (7)$$

erhält man die endgültige Gleichung zu

$$F_z = \mu_0 \mu_r k (i_1/N_1)^2 r/z. \quad (8)$$

4. Konstruktive Auslegung

Die Konstruktion der Anlage wurde durch die Interpretation vorstehender Gleichung bestimmt. Um einen möglichst hohen Spulenstrom i_1 zu erhalten, wurde der Spulenradius aus Widerstandsgründen klein gehalten und eine Kondensatorspannung bis maximal $U = 10 \text{ kV}$ gewählt, was gleichzeitig den Vorteil hoher Energiespeicherung bei ziemlich kleiner Kapazität bedeutet. Die Kapazität der Anlage konnte in Stufen zwischen $C = 200$ und $2000 \mu\text{F}$ variiert werden.

Gl. (8) zeigt, daß zur Erzeugung einer großen Kraft F_z auch eine hohe Spulenwindungszahl N_1 günstig ist. Eine derartige Erhöhung ist aber nur sinnvoll, wenn dadurch der Primärstrom i_1 wegen der Zunahme des ohmschen Widerstandes nicht verringert wird. Für die Spule mußte ferner eine hohe Spannungsfestigkeit und das Auftreten hoher dynamischer radialer Spulenkräfte konstruktiv berücksichtigt werden. Eine Windungszahl von $N_1 = 40$ erwies sich als günstig und realisierbar.

Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Verdichtungsmechanik. Aus Gründen der hohen mechanischen Belastung und der Spannungsfestigkeit wurde die Spule 1 in einen glasfaserverstärkten Gießharztopf 2 eingegossen.

Ein Kurzschlußring 3 beschleunigt während der Kondensatorentladung über die Spule das Formgefäß 4, in dem sich das zu verdichtende Pulver 5 befindet. Das Formgefäß bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit im Führungsrohr 6 pneumatisch gedämpft nach oben und fällt danach auf den Kurzschlußring zurück. Nach Schwenken des Deckels 7 kann das Formgefäß 4 aus dem Führungsrohr 6 herausgenommen werden und das verdichtete Pulver über den Kolben 8 ausgestoßen werden.

Den Gesamtaufbau der elektrodynamischen Verdichtungs-einrichtung zeigt Bild 3.

5. Meßergebnisse

Um eine Aussage über die erreichbaren Beschleunigungen zu erhalten, wurde im Boden des Formgefäßes ein Quarzkristall eingebaut, der mittels des Piezoeffektes die Beschleunigung b maß. Das Oszillogramm, Bild 4, zeigt den zeitlichen Verlauf des Entladestromes i_1 und der Beschleunigung b des Kurzschlußringes und Formgefäßes mit einer Gesamtmasse von $m = 1150 \text{ g}$. Der Entladestrom i_1 zeigt einen gedämpften periodischen Verlauf mit einer Schwingungsdauer von rd. $T/2 = 0,8 \text{ ms}$. Er wird durch die Gleichrichterwirkung des Schaltignitrons unterbrochen.

Bemerkenswert ist die der Beschleunigungskurve überlagerte Schwingung, die mit der Resonanzfrequenz des Formgefäßes identisch ist, das beim Abstoß axial schwingt. Diese Resonanzfrequenz bestimmt die obere Grenze der Entladefrequenz der Anlage. Es hat sich gezeigt, daß bei einer Annäherung beider Frequenzen die axialen Schwingungen des Formgefäßes derart zunehmen, daß ihre Amplituden diejenigen der durch die elektrodynamische Kraft erzeugte Beschleunigung b übersteigen. Durch die Überlagerung beider Schwingungen kann eine resultierende, erhebliche negative Beschleunigung auftreten, die für eine Verdichtung unerwünscht ist und stört.

Bild 5 zeigt die gemessenen Beschleunigungen als Funktion der Kondensatorsspannung U_C . Der Parameter ist durch die Kapazität C gegeben. Obwohl die Anlage für eine Kondensatorspannung bis zu 10 kV bemessen war, mußten die Messungen bei 5 kV abgebrochen werden, da sowohl der Quarz-Beschleunigungsgeber als auch die Verdichtungsmechanik einer Beschleunigung von über 20 000 g nicht mehr standhielt. Eine Extrapolation — beispielsweise der 500- μ F-Kurve — erlaubt jedoch die Aussage, daß bei einer Ladespannung $U_C = 10$ kV und einer ausreichend bemessenen Verdichtungsmechanik Beschleunigungen von 100 000 g zu verwirklichen sind. Für die hier vorliegende Masse von 1,150 kg würde dies eine dynamische Kraft von

$$F \approx 10^6 \text{ N} \approx 100 \cdot 10^3 \text{ kp}$$

bedeuten. Wenn der Kopplungskoeffizient k in Gl. (8) für die Kraft F_z eine Konstante wäre, müßte F_z oder die Beschleunigung b der Kapazität C proportional sein, wie durch Einsetzen der Beziehung $i_1 = U \sqrt{C/L}$ unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes deutlich wird. Der senkrechte Abstand der Kurven in Bild 5 zeigt aber eine Abnahme des Faktors k . Größere Kapazität bedeutet längere Entladezeit und damit für den Kurzschlußring einen größeren Hub, bevor das Strommaximum von i_1 erreicht wird.

Ähnliche Effekte treten auch bei der Erhöhung der Spulenwindungszahl N_1 auf. Wegen der Beziehung $L \sim N_1^2$ und der damit verbundenen Verlängerung der Entladezeit nach $T \approx 2\pi \sqrt{LC}$ wird auch hier der Kurzschlußring einen größeren Abstand z einnehmen, bevor das Strommaximum erreicht wird.

All diese Überlegungen zeigen, daß, um eine große Beschleunigung zu erreichen, ein guter Kopplungskoeffizient k zwischen der Spule und dem Kurzschlußring während der Entladung erhalten bleiben muß. Diese Forderung bedeutet jedoch eine kurze Entladezeit $T/2$, die jedoch größer sein muß als die Eigenschwingungszeit des mechanischen Systems. Auf der anderen Seite hat es keinen Zweck, die Kapazität C und Induktivität L für einen Kurzschlußring kleiner Masse zu groß zu wählen, da sich der Kurzschlußring zu sehr aus dem Magnetfeld der Spule entfernt, bevor das Strommaximum erreicht wird.

Von den untersuchten verschiedenen Pulversorten stellt Bild 6 beispielsweise die Verdichtung von UO_2 -Pulver (Korngröße 20 μm) und Al_2O_3 (Korngröße 0 bis 16 μm) als Funktion der elektrischen Energie E_{el} dar. Bei Al_2O_3 wird eine theoretische Dichte von 75 % erreicht, ein Wert, der mit Matrizenpressen bisher unerreichbar ist und beim isostatischen Pressen einen Preßdruck von rd. 15 000 bar erfordert. Uranoxid verhält sich ähnlich. Dabei ist es gelungen, verhältnismäßig lange Stäbe mit einem Längendurchmesser-Verhältnis $l/d = 3$ herzustellen. Im Gegensatz hierzu ist es aber auch möglich, extrem flache Körper zu formen.

All die eingangs erwähnten Vorteile des Verfahrens konnten durch umfangreiche Untersuchungen¹⁾ sowohl bei keramischen als auch bei metallischen Pulversorten bestätigt werden. Die parametrischen Einflüsse wie Preßhilfe, Teilchengröße, Anzahl und Dauer der Beschleunigungsimpulse, werden dabei in weiten Grenzen variiert und führten zu interessanten Ergebnissen [9].

6. Anwendungsmöglichkeiten

Zweifelloos öffnet sich hier für die bereits auf anderen Gebieten der Wissenschaft und Technik eingeführte Stoßstrom-

1) Die Untersuchungen wurden vom Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF) der Gesellschaft für Kernforschung in Karlsruhe unter Leitung von Prof. Dr. Böhm und Prof. Dr. Thümmler durchgeführt. Die Durchführung der Versuche leitete Dr. Bumm, dem hier für seine Initiative und wertvollen Anregungen zu diesem Verfahren gedankt sei.

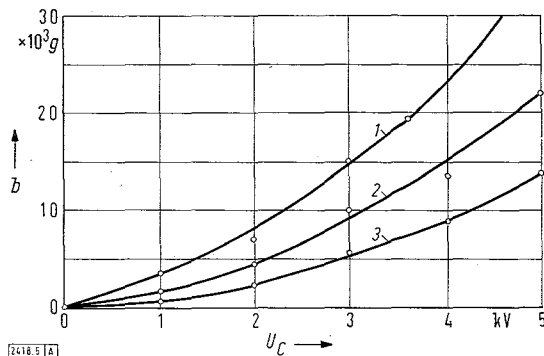


Bild 5. Beschleunigung b einer Masse von $m = 1150$ g als Funktion der Ladespannung U_C für verschiedene Kapazitäten mit einer Spule $N_1 = 40$ Windungen und $r = 3,5$ cm.

Kurve		1	2	3
C	μF	2000	500	200
$T/2$	ms	1,5	0,8	0,3

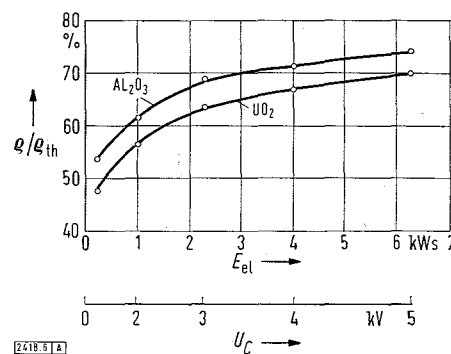


Bild 6. Grünlingsdichten q/q_{th} mit q_{th} der theoretischen Dichte als Funktion der elektrischen Energie E_{el} und der Ladespannung U_C bei $C = 500 \mu\text{F}$.

technik ein neues Anwendungsgebiet. Mit der beschriebenen Anlage wurde eine Entwicklungs- und Experimentierphase abgeschlossen, die bereits zu ermutigenden Ergebnissen führte, obwohl die technologischen Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind.

Mit der Anlage konnte nachgewiesen werden, daß dieses neue, elektrische Verfahren zur Verdichtung und Formgebung technischer Pulver wertvolle technologische Möglichkeiten erschließt, welche die herkömmlichen Verfahren zumindest ergänzen, ohne den technischen Aufwand dabei wesentlich zu erhöhen.

7. Schrifttum

- [7] Siebmans, W.: Herstellung von Uranmononitrid-Pellets verschiedener Dichte durch Kaltpressen und Sintern. Ber. KFK 1049, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1969.
- [2] Kovalenko, M. S.: Theoretische Grundlagen des Heißpressens von Pulvern. Int. Tagung über Pulvermetallurgie, Prag 1966. Bd. I, S. 85–92, KFK-tr-226.
- [3] Groß, R.: Beitrag zur Untersuchung des Einflusses der Verdichtungsmethode auf das Sintergefüge von Al_2O_3 -Probekörpern. Ber. KFK 1129, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1970.
- [4] Hofmann, F., u. Kroll, H., u. Liebmann, B., u. Neumann, O.: Herstellung von UO_2 -Brennelementen durch Einvibrieren und Rundhämmern. Ber. dt. Keram. Ges. Bd. 40 (1963) S. 146–150.
- [5] Bumm, H., u. Liepelt, H.: Über die beim Verdichten keramischer Pulver auftretenden Erscheinungen, insbesondere die Zerkleinerungsvorgänge. Ber. KFK 928, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1969.
- [6] Küpfmüller, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin 1955.
- [7] Rint, C.: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1949.
- [8] Wallot, J.: Schwachstromtechnik, 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin 1948.
- [9] Bumm, H., u. Liepelt, H.: Formen und Verdichten von Pulvern durch Beschleunigen mit Hochenergieimpulsen. Ber. 4/14 des 2. Eur. Symp. Pulvermetallurgie, Stuttgart 1968.

