

Untersuchungen an Kratern von Mikroprojektilen im Geschwindigkeitsbereich von 0,5 bis 10 km/sec

V. RUDOLPH

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

(Z. Naturforsch. **24 a**, 326–331 [1969]; eingegangen am 15. November 1968)

Iron spheres of μ -size were accelerated by a modified 2 MV Van de Graaff accelerator to velocities from 0.5 to 10 km/sec. With these particles craters were produced in metal targets. The dimensions of the craters were measured by an electron microscope (Stereoscan). Systematical measurements were made for lead, cadmium, silver, copper and aluminum targets. The dependence of the crater diameter, depth and volume as function of the mass and the velocity of the projectile and of the target material is described.

Die schnell fortschreitende Entwicklung der Technik in der Weltraumfahrt erlaubt genauere Untersuchungen des kosmischen Staubes mit Hilfe von Raketen und Satelliten. Im Rahmen dieses Forschungsprogramms wurden Detektoren entwickelt, die während des Fluges die physikalischen Parameter der kosmischen Teilchen, wie Impuls, Masse und Geschwindigkeit, messen und zur Erde übermitteln^{1–4}. Eine weitere Meßmethode ist die Sammlung von kosmischem Staub auf Flächen während des Fluges mit anschließender Analyse im Labor^{5–9}. Im Zusammenhang mit diesen Experimenten wurden die folgenden Untersuchungen an Kratern, die durch künstlich beschleunigten Staub erzeugt wurden, ausgeführt.

Zur Beschleunigung steht ein modifizierter Van de Graaff-Druckkesselbeschleuniger zur Verfügung^{10, 11}, der sich von einem kernphysikalischen Beschleuniger durch die Staubquelle, den Staubdetektor und ein Massen-Geschwindigkeits-Filter¹² unterscheidet. Beschleunigt wurden Eisenkugeln mit Durchmessern von einigen Zehntel μ bis einigen μ auf Geschwindigkeiten von 0,5 bis 10 km/sec. Diese Projektilen wurden in Metalltargets senkrecht eingeschossen. Die dabei entstehenden Krater wurden mit Hilfe eines Elektronenauflichtmikroskops (Stereoscan) ausgewertet.

Die wesentlichen geometrischen Bestimmungsstücke eines Kraters sind der mittlere Außendurchmesser D_a , der Innendurchmesser D , die Tiefe T und das Volumen. Zur Bestimmung des Kraterdurchmessers genügt eine Aufnahme in Lotrichtung auf den Krater. Zur Ermittlung der Kratertiefe benötigt man eine zweite Aufnahme unter einem anderen Winkel α , siehe Abb. 1. Hierbei ist das entstehende Bild die Projektion des Kraters auf die Ebene senkrecht zur Blickrichtung. Daher gilt, wenn P_1 ein Punkt außerhalb des Kraters auf der Targetoberfläche und P_2 ein Punkt am Kraterboden ist, für den Abstand P_1P_2 auf der Projektionsebene

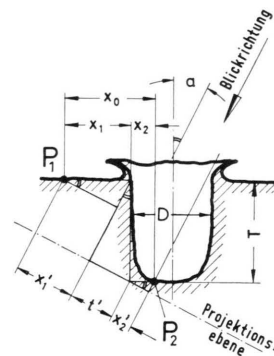


Abb. 1. Querschnitt eines Kraters zur Bestimmung der Tiefe.

¹ S. CLIFTON u. R. NAUMANN, NASA-Report TM X-1316 [1966].

² S. AUER u. K. SITTE, Earth Planet. Sci. Letters **4**, 178 [1968].

³ C. S. NILSON, C. W. MCCracken, W. M. ALEXANDER, O. E. BERG u. L. SECRETAN, Nature **208**, 673 [1965].

⁴ C. W. MCCracken, W. M. ALEXANDER u. M. DUBIN, NASA-Report TN D-1174 [1962].

⁵ C. L. HEMENWAY u. D. S. HALLGREN, Space Res. **VIII**, 521 [1968].

⁶ N. H. FARLOW, M. B. BLANCHARD u. G. V. FERRY, Space Res. **VIII**, 557 [1968].

⁷ C. L. HEMENWAY u. R. K. SOBERMANN, Astrophys. J. **67**, 256 [1962].

⁸ J. H. WEIHRAUCH, U. GERLOFF u. H. FECHTIG, Space Res. **VIII**, 566 [1968].

⁹ U. GERLOFF, J. H. WEIHRAUCH u. H. FECHTIG, Naturwiss. **54**, 275 [1967].

¹⁰ H. SHELTON, C. D. HENDRICKS u. R. F. WUERKER, J. Appl. Phys. **31**, 1243 [1960].

¹¹ J. F. FRICHTENICHT, Rev. Sci. Instr. **33**, 209 [1962].

¹² V. RUDOLPH, Z. Naturforsch. **21 a**, 1993 [1966].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

für $a = 0$

$$\overline{P_1 P_2} = x_1 + x_2 = x_0 \quad \text{und}$$

für $a \neq 0$

$$\overline{P_1 P_2} = x_1' + x_2' + t' = x_0'.$$

$$\text{Wegen} \quad x_1' = x_1 \cos a, \quad x_2' = x_2 \cos a$$

$$\text{und} \quad t' = T \sin a$$

$$\text{folgt dann} \quad T = (x_0' - x_0 \cos a) / \sin a.$$

Da x_0 und x_0' den Kraterbildern entnommen werden können und a meßbar ist, läßt sich die Tiefe T eines Punktes am Kraterboden angeben. Im folgenden sei unter der Kratertiefe T der Abstand von der Mitte des Kraterbodens zur ungestörten Targetoberfläche verstanden.

Allgemeines Erscheinungsbild der Krater

Im folgenden Abschnitt wird in verallgemeinerner Weise das typische Erscheinungsbild der Krater als Funktion der Versuchsbedingungen beschrieben.

Kennzeichnend für einen Einschlagskrater bei Projektilgeschwindigkeiten über 1 km/sec ist der Kratertrand. Das Verhältnis von mittlerem Krateraußendurchmesser D_a zum Kraterinnendurchmesser D ist eine Konstante, die unabhängig von der Projektilgeschwindigkeit, der Projektilmasse und dem Targetmaterial ist (siehe Abb. 1 und Abb. 2). Es gilt ungefähr

$$D_a \approx 1,5 D.$$

Die Kraterform hängt bei den meisten Metallen in typischer Weise von der Projektilgeschwindigkeit ab. Abb. 3 * zeigt stellvertretend für die meisten Metalle die Form der Cu-Krater bei verschiedenen Projektilgeschwindigkeiten. Bei kleiner Geschwindigkeit, etwa von 0,5 bis 1,5 km/sec, dringt das Projektil nahezu unverändert in das Target ein, so daß der Kraterinnendurchmesser etwa gleich dem Projektildurchmesser ist. Die Kratertiefe wächst dabei mit steigender Geschwindigkeit.

Über etwa 1,5 km/sec beginnt das Projektil sich zu verformen, d. h. es verbreitert sich oder zerbricht. Daher wächst der Kraterdurchmesser mit steigender Geschwindigkeit.

Bei Projektilgeschwindigkeiten über etwa 4 km/sec wird das Projektil so zertrümmert, daß es im Krater nicht mehr zu erkennen ist. Mit Hilfe einer Mikroanalyse läßt sich aber noch Eisen im Krater nachweisen. Außerhalb des Kraters wurde vom Projektil praktisch kein Material gefunden.

* Abb. 3 auf Tafel S. 328 a.

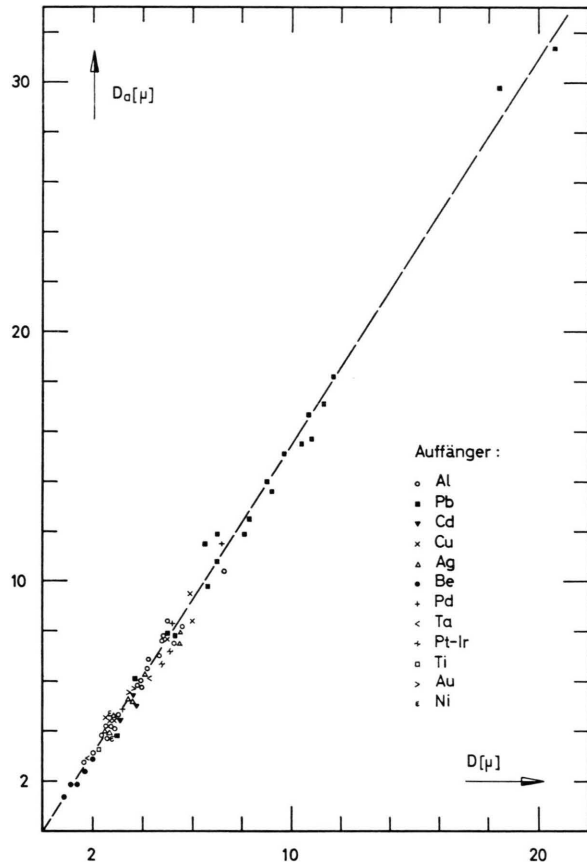


Abb. 2. Der Krateraußendurchmesser D_a als Funktion des Kraterinnendurchmessers D für verschiedene Projektilgeschwindigkeiten ($v > 1$ km/sec) und bei verschiedenen Targetmaterialien.

Der Kraterdurchmesser

Der Kraterdurchmesser D ist eine Funktion der Projektilgeschwindigkeit v des Projektildurchmessers d und des Targetmaterials M .

Experimentell ergibt sich, daß bei gleichem Targetmaterial und konstantem v :

$$D \sim d$$

und damit $D/d = \text{const}$ ist. Abb. 4 zeigt diese Beziehung für Al-Targets bei 4,15 km/sec und Cd-Targets bei 4,0 km/sec.

Für die untersuchten Targetmaterialien Al, Ag, Cd, Cu und Pb ist das Verhältnis D/d nur eine Funktion des Targetmaterials und der Projektilgeschwindigkeit v . Abb. 5 zeigt das Verhältnis D/d als Funktion von v für Pb und Al.

Bei kleiner Geschwindigkeit ($v < 1$ km/sec), wenn das Projektil sich nicht wesentlich ändert, gilt un-

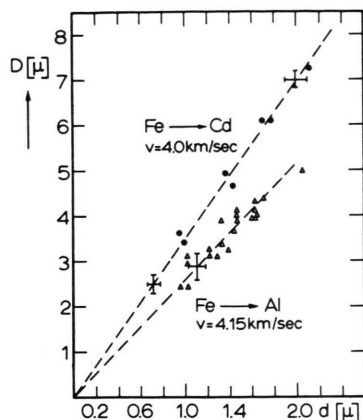


Abb. 4. Der Kraterdurchmesser D als Funktion des Projektildurchmessers d in Cd bei $(4,0 \pm 0,1)$ km/sec und Al-Targets bei $(4,15 \pm 0,15)$ km/sec.

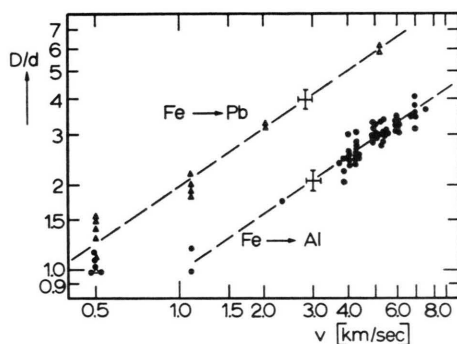


Abb. 5. Das Verhältnis Kraterdurchmesser zu Projektildurchmesser, D/d , als Funktion der Projektilgeschwindigkeit v .

abhängig von der Projektilgeschwindigkeit v und dem Targetmaterial:

$$D \approx d.$$

Für größere Geschwindigkeiten ($v > 1$ km/sec) erhält man die Beziehung

$$D = c_1 d v^{2/3},$$

wobei c_1 eine Materialkonstante ist. Für die anderen Targetmaterialien ergeben sich ähnliche Kurven, die in Richtung v -Achse verschoben sind. Ihre Konstanten c_1 können der Tab. 1 entnommen werden.

Target-material	c_1	c_2	c_3
Pb	$9,4 \cdot 10^{-4}$	0,62	$1,3 \cdot 10^{-10}$
Cd	$7,2 \cdot 10^{-4}$	0,52	$0,43 \cdot 10^{-10}$
Ag	$5,7 \cdot 10^{-4}$	0,53	$0,32 \cdot 10^{-10}$
Cu	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0,6	$0,17 \cdot 10^{-10}$
Al	$4,6 \cdot 10^{-4}$	1,0	$0,34 \cdot 10^{-10}$

Tab. 1. Die Konstanten der Gleichungen in C.G.S.-Einheiten.

Die Kratertiefe

Für die Kratertiefe lassen sich zwei verschiedene Tiefen angeben, einmal die Tiefe gemessen über dem Projektil oder Projektilrest (die meßbare Kratertiefe T) und zum anderen die Tiefe ohne Projektil oder Projektilrest (die eigentliche Kratertiefe T').

Die meßbare Kratertiefe T ist wie der Kraterdurchmesser D eine Funktion des Projektildurchmessers d , der Projektilgeschwindigkeit v und des Targetmaterials. Bei gleichem Targetmaterial und konstantem v ist die Kraterform streng ähnlich, d. h.

$$T \sim D$$

oder $T/D = \text{const.}$ Abb. 6 zeigt diese Abhängigkeit, T als Funktion von D für die Targetmaterialien Al und Cu bei $v = 4$ km/sec. Diese Gleichung ist für

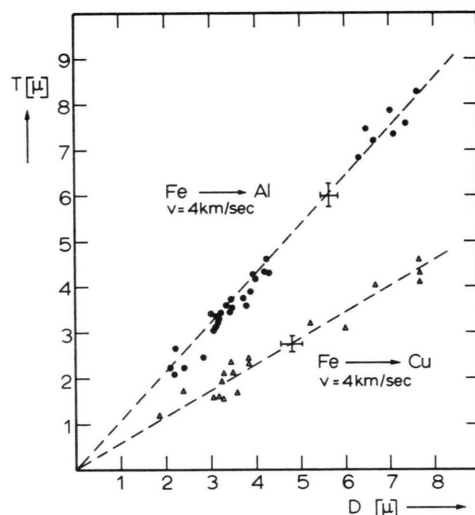
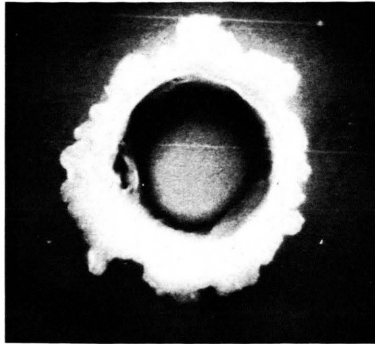


Abb. 6. Die meßbare Kratertiefe T als Funktion des Kraterdurchmessers D für verschiedene Projektilmassen. Die Targets sind Al und Cu, die Projektilgeschwindigkeit beträgt $(4,0 \pm 0,1)$ km/sec.

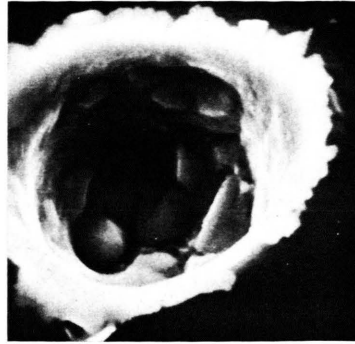
alle Materialien und bei allen Geschwindigkeiten gültig, wobei die Konstante material- und geschwindigkeitsabhängig ist. In Abb. 7 ist das Verhältnis T/D als Funktion der Geschwindigkeit v für Al und Ag dargestellt.

Die eigentliche Kratertiefe T' kann näherungsweise berechnet werden, indem man zur meßbaren Tiefe T die Höhe h des deformierten Projektils hinzurechnet, $T' = T + h$. Unter der Annahme, daß die ganze Projektilmasse sich im Krater befindet und die Projektilform erhalten bleibt oder in ein Rotationellipsoid deformiert wird, dessen Durchmesser

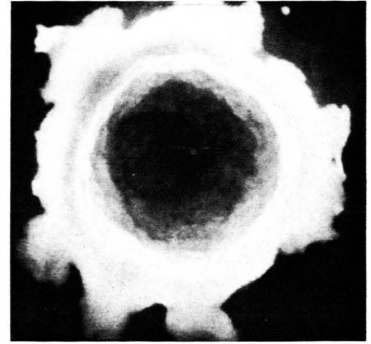
Fe \longrightarrow Cu



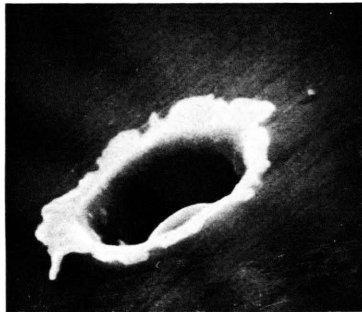
0°



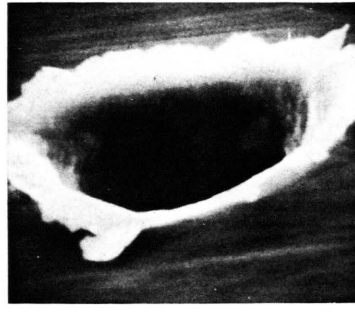
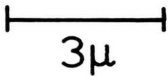
30°



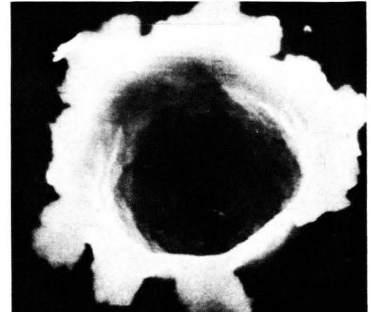
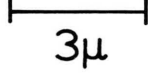
0°



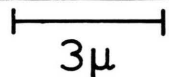
60°



60°



30°



$D = 3.2 \mu$
 $d = 2.9 \mu$
 $T = 0.66 \mu$
 $v = 0.5 \text{ km/sec}$

$D = 5.9 \mu$
 $d = 3.5 \mu$
 $T = 3.0 \mu$
 $v = 2.4 \text{ km/sec}$

$D = 4.9 \mu$
 $d = 1.5 \mu$
 $T = 2.8 \mu$
 $v = 5.2 \text{ km/sec}$

Abb. 3. Die Form der Cu-Krater unter verschiedenen Aufnahmewinkeln bei Projektilgeschwindigkeiten von $v=0.5 \text{ km/sec}$, $v=2.4 \text{ km/sec}$ und $v=5.2 \text{ km/sec}$. Bei $v=0.5 \text{ km/sec}$ ist das Projektil nahezu unverändert, bei $v=2.4 \text{ km/sec}$ ist es zerstört und bei $v=5.2 \text{ km/sec}$ ist es nicht mehr erkennbar. (Fe kann aber noch im Krater nachgewiesen werden.)

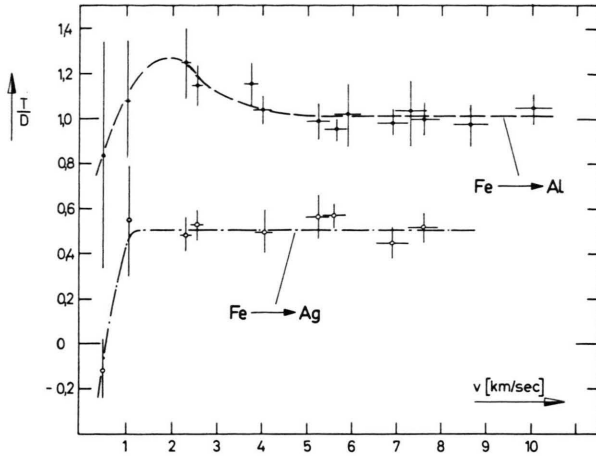


Abb. 7. Das Verhältnis der meßbaren Kratertiefe zum Kraterdurchmesser, T/D , als Funktion der Projektilgeschwindigkeit v für verschiedene Massen. Die Targets sind Al und Ag.

D und dessen Symmetrieachse die Kraterachse ist, folgt für die Höhe h dieses Rotationsellipsoids

$$h = d^3/D^2.$$

Das Verhältnis T'/D als Funktion der Projektilgeschwindigkeit v ist für Al und Ag in Abb. 8 dargestellt. Den Kurven liegen die aus Abb. 7 errechneten Werte zugrunde. Bei hohen Geschwindigkeiten ist das Verhältnis T'/D konstant,

$$T'/D = c_2,$$

d. h. die Kraterformen sind dort streng ähnlich. Für Cd, Pb und Cu erhält man Kurven, die wenig von der Ag-Kurve abweichen. Die Konstante c_2 für verschiedene Materialien kann der Tab. 1 entnommen werden.

Bei kleinen Geschwindigkeiten wächst T'/D mit der Geschwindigkeit. Da in diesem Bereich der Kraterdurchmesser D praktisch konstant ist, nimmt folglich die Kratertiefe zu und damit das Verhältnis T'/D . Im Deformationsbereich dagegen nimmt das Verhältnis T'/D ab, da der Kraterdurchmesser schneller wächst als die Tiefe. Ab etwa 4 km/sec bleibt dann das Verhältnis T'/D konstant.

Ganz allgemein haben die Krater bei größeren Projektilgeschwindigkeiten in den meisten Targetmaterialien (Ag, Cu, Pb, Cd, Au, Ti, Ni, Pd, Ta und Pt-Ir) eine halbelliptische Kraterform, die wenig von der halbkugeligen Form abweicht. Ausnahmen bilden die Targetmaterialien Al und Be. Ihre Krater haben Topfform, wobei ihr T'/D -Verhältnis etwa 1 ist.

Das Kratervolumen

Für Projektilgeschwindigkeiten über 1 km/sec ist das Kratervolumen der kinetischen Energie des Projektils proportional,

$$V(T') = c_3 E_p,$$

wobei die Konstante c_3 materialabhängig ist. Abb. 9 zeigt diese Abhängigkeit für Al-Targets. Die Meßpunkte entsprechen verschiedenen Massen und verschiedenen Geschwindigkeiten. Diese Beziehung ist

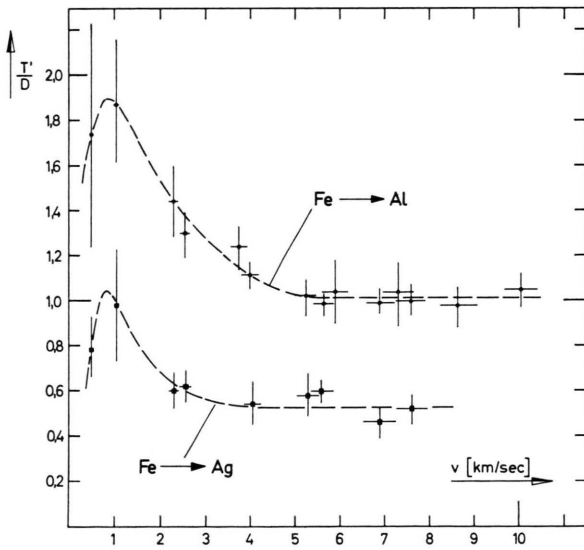


Abb. 8. Das Verhältnis von eigentlicher Kratertiefe zum Kraterdurchmesser, T'/D , als Funktion der Projektilgeschwindigkeit v bei verschiedenen Projektilmassen. Die Target sind Al und Ag.

neten Werte zugrunde. Bei hohen Geschwindigkeiten ist das Verhältnis T'/D konstant,

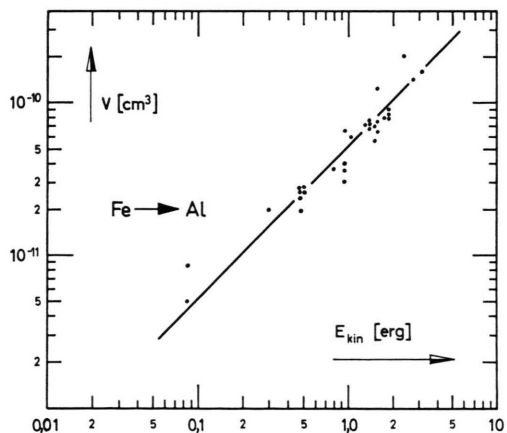


Abb. 9. Das eigentliche Kratervolumen $V(T')$ in Al als Funktion der Projektilenergie E_{kin} . Die Meßpunkte entsprechen verschiedenen Projektilmassen und verschiedenen Projektilgeschwindigkeiten (für $v > 1$ km/sec).

also massen- und geschwindigkeitsabhängig. Für die anderen Materialien gilt die gleiche Beziehung mit anderen Konstanten, die in Tab. 1 angegeben sind.

Die Materialabhängigkeit

Die Bildung der Krater entsteht durch sich schnell ändernde Stoßwellen, deren mathematische Beschreibung von ÖPIK¹³, BJORK¹⁴ und anderen Autoren auf verschiedene Arten versucht wurde. Eine Entscheidung zwischen diesen theoretischen Überlegungen läßt sich jedoch durch diese Arbeit nicht herbeiführen, da signifikante Unterschiede in den Voraussetzungen erst bei Einschlaggeschwindigkeiten von mehr als 10 km/sec auftreten. Komplizierte Prozesse lassen sich aber teilweise durch Näherungsprozesse beschreiben. Betrachtet man die Bildung des Kraters näherungsweise als Schmelzvorgang, so kann man eine Abschätzung für das Kratervolumen und die Materialabhängigkeit gewinnen. (Der Verdampfungsprozeß scheidet hierbei aus, da die Projektilenergie nicht ausreicht, das ganze Kratervolumen zu verdampfen.)

Die für das Kratervolumen notwendige Schmelzenergie E_s ist

$$E_s = m_t L_t = \rho_t V_t L_t,$$

wobei L_t die Schmelzwärme/Gramm, m_t die Masse des Kratervolumens V_t und ρ_t die Targetdichte ist. Wird die gesamte Projektilenergie E_p in Form von Schmelzenergie im Krater umgesetzt, so gilt

$$E_s = E_p$$

oder

$$\rho_t V_t L_t = E_p = m v^2/2$$

und daher

$$V_t = \frac{E_p}{\rho_t L_t} = \frac{m v^2}{2 \rho_t L_t} = \frac{\rho_p V_p v^2}{2 \rho_t L_t}.$$

Abb. 10 zeigt den Vergleich dieser Gleichung mit dem Experiment, und zwar das Verhältnis Kratervolumen/Projektilvolumen als Funktion der Geschwindigkeit v für Al, Pb und Cu. Die eingezeichneten Geraden, die aus der obigen Gleichung errechnet sind, stimmen recht gut mit den experimentellen Werten überein.

Die Abhängigkeit des Kratervolumens vom Targetmaterial ist in Abb. 11 gezeigt, und zwar in der Form $V(T')/V_p$ als Funktion von $\rho_t L_t$. Die Projek-

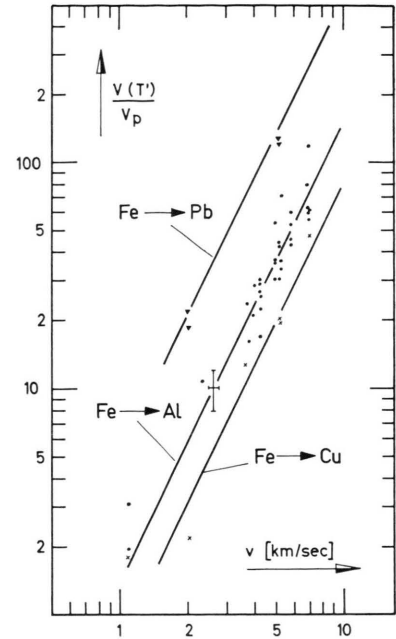


Abb. 10. Das Verhältnis von eigentlichem Kratervolumen zum Projektilvolumen, $V(T')/V_p$, als Funktion der Projektilgeschwindigkeit v . Targetmaterial ist Pb, Al und Cu. Die Geraden haben die Steigung 2.

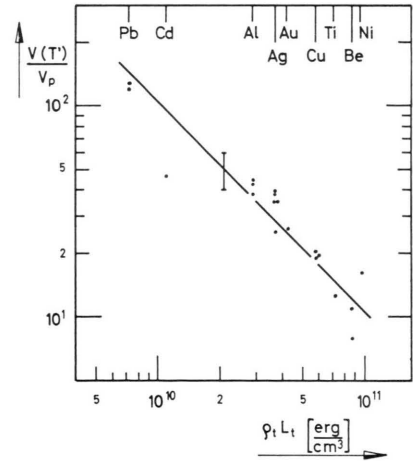


Abb. 11. Das Verhältnis von eigentlichem Kratervolumen zum Projektilvolumen, $V(T')/V_p$, als Funktion von $\rho_t L_t$ (Targetdichte \times spez. Schmelzwärme des Targets) für Pb, Al, Cd, Ag, Au, Cu, Ti, Be und Ni. Die Projektilgeschwindigkeit beträgt $(5,2 \pm 0,15)$ km/sec und der Projektildurchmesser $0,91 \mu \pm 10\%$.

tilgeschwindigkeit ist $v = 5,2$ km/sec, der Projektildurchmesser $d = 0,91 \mu$ und die untersuchten Targetmaterialien sind Pb, Cd, Al, Ag, Au, Cu, Ti, Be und Ni. Die obige Gleichung ist hierbei recht gut bestätigt.

¹³ E. J. ÖPIK, Irish Astron. J. **5**, 14 [1958].

¹⁴ R. L. BJORK, 10th Intern. Astronaut. Congr., London, 505 [1959].

Ähnlichkeitsgesetze

In Abb. 12 sind die Messungen der Krater von cm-Projektilen von KINEKE¹⁵ mit den eigenen Messungen an μ -Projektilen verglichen. KINEKE benutzte Eisengeschosse (deren Form unbekannt ist), die eine Masse zwischen 0,18 g und 8,86 g hatten. Die eigenen Projektilen hatten ungefähr eine Masse von 10^{-12} g. Er benutzte als Targetmaterial technisches Material. Das Targetmaterial bei den Versuchen mit μ -Projektilen war extrem reines Material.

Die gefundenen Gesetzmäßigkeiten stimmen bei den beiden Projektilarten überein. Die Konstanten unterscheiden sich maximal um einen Faktor zwei. Wenn man hierbei bedenkt, daß sich bei den beiden Versuchsreihen die Massen um ungefähr einen Faktor 10^{12} unterscheiden, sind die Abweichungen nicht sehr erheblich und es gelten wahrscheinlich Ähnlichkeitsgesetze zwischen beiden sehr unterschiedlichen Projektilgrößen.

Herrn Prof. W. GENTNER möchte ich für sein großes Interesse an dieser Arbeit danken. Zu besonderem Dank bin ich Herrn Prof. J. ZÄHRINGER und Herrn Prof. K. SITTE sowie Herrn E. GRÜN für viele anregende Diskussionen verpflichtet. — Die vorliegende Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung gefördert.

¹⁵ J. H. KINEKE, 4th Symp. Hypervelocity Impact, Vol. 1 [1960].

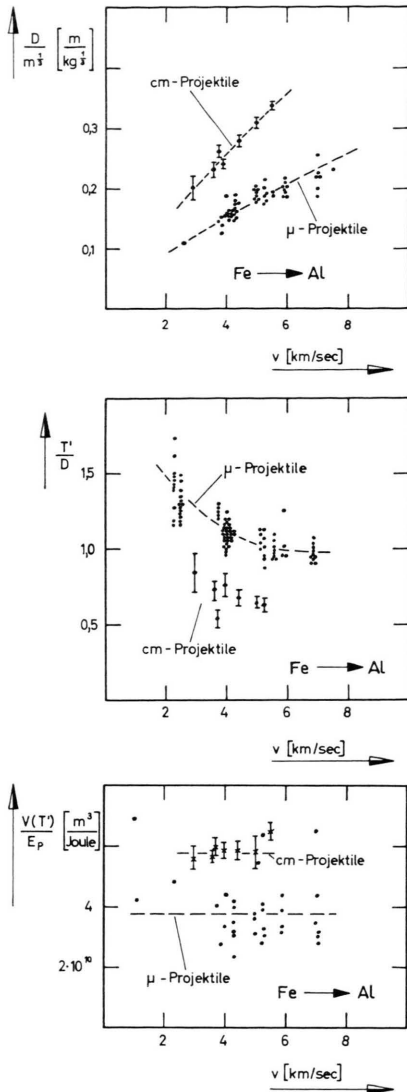


Abb. 12. Der Vergleich der Kraterexperimente von cm-Projektilen mit denen von μ -Projektilen. Als Funktion der Projektilgeschwindigkeit v ist dargestellt: a) das Verhältnis Kraterdurchmesser/Projektillmasse^{1/3} ($D/m^{1/3}$); b) das Kratertiefen-Kraterdurchmesserverhältnis (T'/D); c) das Verhältnis vom Kratervolumen zur Projektilenergie [$V(T)/E_p$].