MODELLVERSUCHE ZUR UNTERSUCHUNG DES IMPULSTRANSFERS DURCH IMPAKT UNTERSCHIEDLICHER PROJEKTILGEOMETRIEN AUF ASTEROIDENÄHNLICHE MATERIALIEN

N. Reichenbach, J. Hupfer, T. Hoerth, F. Schäfer – Fraunhofer Ernst-Mach-Institut (EMI), Eckerstr. 4, 79104 Freiburg, Deutschland

Kurzfassung

Zur Vermeidung von Kollisionen von erdnahen Objekten (NEOs) mit der Erde besteht die Möglichkeit, mit einem kinetischen Impaktor durch einen Impulstransfer dieses NEO von seiner Bahn abzulenken. Der Impuls nach dem Impakt eines kinetischen Impaktors auf einen Asteroiden ist aufgrund der dabei entstehenden Auswurfsmasse entgegen der Einschlagsrichtung größer als der Initialimpuls des Impaktors vor dem Einschlag. Dabei ist die Größe des Impulstransfers von verschiedenen Faktoren, wie z.B. der Form des Impaktors, abhängig.

Am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI) in Freiburg im Breisgau wird diese Möglichkeit zur Asteroidenabwehr experimentell untersucht. Mit einem zweistufigen Leichtgasbeschleuniger werden Aluminiumprojektile auf asteroidenähnliche Materialien beschleunigt.

In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss der Projektilgeometrie auf den Impulstransfer untersucht. Dabei wurden Projektile mit unterschiedlichen Geometrien, aber mit identischen Randbedingungen (Masse und Impaktgeschwindigkeit) auf Porenbetonsteine beschleunigt. Dabei ergab sich die Erkenntnis, dass Projektile, die keine kugelförmige Projektilgeometrie (z.B. Zylinder oder Quader) aufweisen, einen größeren Impulstransfer verursachen als kugelförmige Projektile. Weiterhin wurde der Anstellwinkel der Projektile gemessen. Dieser kann den Impulstransfer ebenfalls beeinflussen.

1. EINLEITUNG

Einschläge von Asteroiden oder Kometen auf der Erde sind Ereignisse, die immer wieder vorkommen können. Auch in der Vergangenheit gab es viele solcher Vorkommnisse. Krater wie der Barringer-Krater in Arizona, USA oder das Nördlinger Ries sind Beweise für stattgefundene Einschläge von Himmelskörpern auf der Erde. Um solche Katastrophen vermeiden zu können, werden Methoden entwickelt, die die Erde vor solchen Einschlägen schützen sollen. Ein Bespiel für solch eine Methode ist das Ablenken des Asteroiden durch einen kinetischen Impaktor. Dieser soll den Asteroiden durch einen Impulstransfer von seiner ursprünglichen Umlaufbahn ablenken und somit eine Kollision mit der Erde verhindern. Das Fraunhofer EMI ist in dem von der Europäischen Union ins Leben gerufenen Projekt NEOShield involviert. Dabei werden am FMI Impaktexperimente im Hypervelocitybereich durchgeführt, mit denen man den Impulstransfer eines kinetischen Impaktors auf asteroidenähnliche Materialien messen kann. Der Impulstransfer hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Neben der Geschwindigkeit und der Masse des Impaktors spielt auch die Geometrie des Impaktors eine Rolle. In diesem Paper werden die experimentellen Methoden und die Ergebnisse dieser Experimente dargestellt. Dabei wird die Abhängigkeit des Impulstransfers von der Geometrie der verwendeten Projektile aufgezeigt.

2. EXPERIMENTELLE METHODEN

Am Fraunhofer Ernst-Mach-Institut (EMI) können mithilfe eines zweistufigen Leichtgasbeschleunigers (SLGG) kleine Projektile auf Geschwindigkeiten von bis zu 10 km/s beschleunigt werden. Damit kann das Szenario eines Einschlages eines Impaktors auf einen die Erde gefährdenden Asteroiden im Modell nachgestellt werden. In Abbildung 1 ist der für diese Studie verwendete Leichtgasbeschleuniger abgebildet.



Abbildung 1: Leichtgasbeschleuniger (SLGG) am EMI

2.1. Beschleunigungstechnik

Der Beschleunigungsvorgang erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird in einer Pulverkammer eine Treibladung entzündet und damit ein Kolben im Treibrohr in Bewegung gebracht. Dieser komprimiert Leichtgas, sodass im Hochdruckteil des Beschleunigers eine Membran zum Bersten gebracht wird. Durch das Bersten der Membran wird das komprimierte Gas expandiert und beschleunigt das Projektil im Laufrohr. Das Projektil wird in ein sog. Sabot eingebettet. Der Beschleunigungsvorgang ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.



Abbildung 2: Beschleunigungsvorgang schematisch

2.1.1. Sabot

Das Sabot wird an den Durchmesser des Laufrohres angepasst. Dieses Sabot dient dazu, das Projektil im Laufrohr genau zu positionieren. Darüber hinaus können dadurch Projektile mit unterschiedlicher Geometrie beschleunigt werden. Da sich das Sabot mit Projektil innerhalb von ca. 1,8 m im Laufrohr aus dem Stillstand auf die Impaktgeschwindigkeit von 4000 m/s beschleunigt, wird dieses sehr stark belastet. Aus diesem Grund wurde eine Belastungsanalyse mit dem CAD-Programm Inventor durchgeführt. Dadurch wurde jedes Sabot individuell ausgelegt und an das Projektil angepasst.

In Abbildung 3 sind Projektile mit unterschiedlicher Formgebung, eingebettet in Sabots, dargestellt.



Abbildung 3: In Sabots eingebettete Projektile

2.2. Projektile

Zur Auswahl der Basisform der Projektile wurde u.a. die Deep Impact Mission der NASA [1] herangezogen. Hierbei wurde die Geometrie des damals verwendeten Impaktors betrachtet. Bei diesem Impaktor, der im Juli 2005 in einen Kometen einschlug, können quaderförmige und zylindrische Geometrien erkannt werden.

Darüber hinaus wurden Projektile ausgewählt, welche sich an der SLGG am EMI in Freiburg optimal beschleunigen lassen. Des Weiteren wurde darauf geachtet, eine einfache Basisform zu wählen, die eine eindeutige Erfassung der Geometrie ermöglicht. Mit der groben Orientierung an der Deep Impact Mission bzw. der Form des damals verwendeten Impaktors und der aufgezeigten Randbedingungen wurden zylindrische und quaderförmige Projektile für die Impaktexperimente eingesetzt. Die quaderförmigen Projektile wurden als quadratische Prismen gefertigt. Zudem wurde eine Hülse als Repräsentant einer möglichen Raketenoberstufe als Projektil hinzugefügt. Bereits durchgeführte

Impaktexperimente mit kugelförmigen Projektilen dienen als Referenz.

2.2.1. Formfaktor

Bei Impaktexperimenten mit Projektilgeometrien, die von der Kugelform abweichen, wurde ihre Geometrie mithilfe eines Parameters beschrieben. In den Veröffentlichungen von Schäfer et al. ([2], [3]) wurde ein sog. Formfaktor eingeführt. Dieser beschreibt mithilfe eines Parameters die Geometrie eines Ellipsoiden. Um diesen Formfaktor auf die Basisformauswahl beziehen zu können, wurde ebenfalls ein geometrisches Verhältnis der Projektile eingeführt. Dieses Verhältnis wurde als Formfaktor f gekennzeichnet. Der Formfaktor beschreibt bei zylindrischen Projektilen und bei der Hülse das Verhältnis der Länge zum Außendurchmesser. Bei quaderförmigen Projektilen beschreibt der Formfaktor das Verhältnis der Länge zur Kantenlänge der quadratischen Fläche. In



Abbildung 4 sind die Formfaktoren für die beiden Basisformen grafisch dargestellt.

Abbildung 4: Bestimmung des Formfaktors bei Zylinder und Quader

2.2.2. Projektil-Endauswahl

Für jede Form wurde ein Formfaktor kleiner als eins, ein Formfaktor gleich eins und ein Formfaktor größer als eins gewählt. Zusätzlich wurde eine Hülse mit Formfaktor 1,9 ausgewählt. Zum Vergleich wurden Impaktexperimente mit Aluminiumkugeln und einem Durchmesser von 5 mm durchgeführt. In Abbildung 5 ist die Projektil-Endauswahl graphisch dargestellt.



Abbildung 5: Projektil-Endauswahl

2.2.3. Bestimmung des Anstellwinkels

Bei Impaktexperimenten mit Projektilgeometrien unterschiedlicher Formfaktoren ist es wichtig, den Anstellwinkel beim Impakt messen zu können. Dafür wurde die in Abbildung 6 gezeigte Spiegelkonfiguration vor das Target gestellt. Über die beiden Spiegel konnte der horizontale und vertikale Winkel des Projektils gemessen werden. Dabei wurde angenommen, dass sich der Winkel über die Strecke von der Spiegelkonfiguration bis zum Target nicht mehr ändert.



Abbildung 6: Messung des horizontalen und vertikalen Anstellwinkels



Abbildung 7: Skizze zur Bestimmung des Anstellwinkels

Mit den beiden gemessenen Winkeln aus Abbildung 7 konnte mithilfe der Formel

1) =
$$\tan^{-1}\left(\sqrt{(\tan(\theta_{H}))^{2} + (\tan(\theta_{V}))^{2}}\right)$$

der resultierende Anstellwinkel θ berechnet werden.

2.3. Targetmaterial

(

Nach Britt et al. [4] liegen viele Asteroiden als poröse oder sogar als hochporöse Gesteinsbrocken vor. Aus diesem Impaktexperimente Grund wurden für die 200 mm x 200 mm x 200 mm große Porenbetonblöcke mit einer Porosität von ungefähr 87 % herangezogen. Durch die industrielle Fertigung weisen diese Blöcke einheitliche Materialeigenschaften auf, was eine optimale Vergleichbarkeit der einzelnen Experimente gewährleistet. In Abbildung 8a ist der Porenbetonblock dargestellt.





Abbildung 8a: Porenbeton

Abbildung 8b: Target im Pendel

2.4. Ballistisches Pendel

Das Target wurde, wie in Abbildung 8b dargestellt, in einen Rahmen befestigt. Dieser wurde an vier dünnen Stahlseilen an der Decke der Targetkammer frei beweglich montiert. Dieses ballistische Pendel ist horizontal und vertikal verstellbar. Somit konnte es für jeden Versuch individuell angepasst werden.



Abbildung 9: a) Target im ballistischen Pendel; b) Horizontaler Ausschlag der Punktmasse

Der durch den Impakt erzeugte Ausschlag des Pendels wurde mithilfe eines Laservibrometers gemessen. Betrachtet man das Target im Rahmen als punktförmige Masse, kann mit dem in Abbildung 9b dargestellten horizontalen Ausschlag x der Impuls des Targets nach Schäfer et al. [5] wie folgt berechnet werden¹:

(2)
$$\vec{p} = (m_T + m_p) \sqrt{2gl \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{X}{l}\right)^2}\right]}$$

2.5. Impulserhöhungsfaktor β

Vergleicht man nun den Impuls des Targets nach dem Impakt mit dem Impuls des Projektils vor dem Impakt, fällt auf, dass die Beträge der beiden Impulse unterschiedlich sind.

Bei unelastischen Stößen ist der Impuls des Projektils vor dem Stoß gleich dem Impuls des Targets nach dem Stoß. Daher ist der Quotient der beiden Impulse bei unelastischen Stößen

(3)
$$\frac{p_{T}'}{p_{\text{Proj.}}} = 1$$

Bei Impaktexperimenten im Hypervelocitybereich wird Masse aus dem Target in die entgegengesetzte Richtung herausgeschleudert. Daher gilt für den Impakt im Hypervelocitybereich:

(4)
$$p_T = p_{Proj} + p_{Ejekta}$$

Der Impuls des Projektils vor dem Impakt kann mit seiner Masse und seiner gemessenen Impaktgeschwindigkeit über

(5)
$$p = m_{Proj.} * v$$

berechnet werden. Für den Quotienten aus dem Impuls des Targets nach dem Impakt und dem Impuls des Projektils vor dem Impakt gilt:

(6)
$$\frac{p_{T}'}{p_{\text{Proj.}}} = 1 + \frac{p_{\text{Ejekta}}}{p_{\text{Proj.}}} = \beta$$

Dieser Quotient wird Impulserhöhungsfaktor β genannt und ist bei Einschlägen im Hypervelocitybereich größer als eins.

2.6. Versuchsaufbau

In Abbildung 10 ist der Versuchsaufbau für die durchgeführten Impaktexperimente schematisch dargestellt.



Abbildung 10: Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung des Impulstransfers

Die Geschwindigkeit der Projektile wurde mithilfe zweier Laserlichtschranken gemessen (2). Zur Verhinderung des Einströmens von Gasen, die beim Beschleunigungsvorgang entstehen und die einen signifikanten Einfluss auf Pendelauslenkung haben. wurde die ein Schnellschlussventil verwendet (3). Weiterhin wurde eine spezielle Spiegelkonfiguration zur Messung des Anstellwinkels der Projektile eingesetzt (6) (siehe Kapitel 2.4.3). Der Impakt und der Auswurfsprozess wurden mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras aufgezeichnet. Mithilfe des Laservibrometers wurde der maximale Ausschlag des ballistischen Pendels gemessen. Damit wurde nach Gleichung (2) und Gleichung (6) der Impuls nach dem Impakt und der Impulserhöhungsfaktor ß ermittelt.

Um die einzelnen Versuche bestmöglich miteinander vergleichen zu können, wurden möglichst viele Parameter konstant gehalten. Die Parameter Masse und Impaktgeschwindigkeit der Projektile spielen hierbei eine essentielle Rolle und wurden bei allen Impaktexperimenten konstant gehalten. Somit erhielten alle Proiektile denselben Initialimpuls vor dem Impakt. Über den zu berechnenden Impulserhöhungsfaktor ß wurden die Versuche miteinander verglichen. Daraus konnte eine Geometrie der Projektile abgeleitet werden, die den höchsten Impulserhöhungsfaktor der hier

¹ ' bezeichnet Größen nach dem Impakt

durchgeführten Versuche lieferte. Der Anstellwinkel der Projektile während des Impakts kann jedoch ebenfalls erheblichen Einfluss auf den Impulstransfer nehmen und sollte daher nicht vernachlässigt werden.

3. ERGEBNISSE

Zur Auswertung der Impaktexperimente wurden die Ergebnisse in zwei Versuchsgruppen eingeteilt. Eine Versuchsgruppe beinhaltete neben den Versuchen mit kugel- und hülsenförmigen Projektilen die Versuche mit zylinderförmigen Projektilen. Die zweite Versuchsgruppe beinhaltete neben den kugel- und hülsenförmigen Projektilen die Versuche mit quaderförmigen Projektilen. Die Ergebnisse der beiden Versuchsgruppen wurden jeweils separat ausgewertet und die einzelnen Versuche innerhalb der Versuchsgruppen miteinander verglichen.

3.1. Impulstransfermessungen

Mithilfe des maximalen Ausschlags des ballistischen Pendels wurde jedem Versuch ein bestimmter β-Faktor, wie er in Kapitel 0 definiert ist, zugeordnet. Für die Versuche mit zvlinderförmigen Projektilen wurden ß-Faktoren mit Werten zwischen 1,6 und 2,0 berechnet. Bei den Versuchen mit quaderförmigen Projektilen waren β-Faktoren zwischen 1,6 und 2,2 zu beobachten. Dabei konnten jedoch die gemessenen Anstellwinkel der Projektile nicht vernachlässigt werden. Bei Versuchen mit Projektilen, deren Formfaktoren größer als eins waren, wurden Anstellwinkel von bis zu 47° gemessen. Bei Versuchen mit Projektilen, deren Formfaktoren kleiner oder gleich eins waren, wurden Anstellwinkel mit Werten kleiner als 5° gemessen. Darüber hinaus waren Impaktgeschwindigkeiten, die von der zu erreichenden Impaktgeschwindigkeit von 4000 m/s abwichen, zu erkennen. Da außerdem kleine Abweichungen der Massen der Projektile auftraten, war der Initialimpuls der Projektile nicht optimal konstant. Damit eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden konnte, wurde ein
B-Korrektur-Faktor eingeführt. Dieser verschiebt den gemessenen β-Faktor auf einen theoretischen Wert, den der Versuch bei "optimalen Bedingungen" gehabt hätte. Optimale Bedingungen bedeutet eine Impaktgeschwindigkeit von 4000 m/s mit einer Projektilmasse von 0,185 g. Abbildung 11 zeigt, dass sich der ß-Faktor linear über der Impaktgeschwindigkeit bei Impaktgeschwindigkeiten zwischen 3000 m/s und 5000 m/s bei gleicher Basisform der Projektile verhält.



Abbildung 11: Lineare Regression im Bereich 3000 m/s bis 5000 m/s

Anhand dieser Annahme wurde zwischen zwei gemessenen β -Faktoren eine lineare Interpolation durchgeführt. Dabei wurde für jeden Formfaktor ein β -Korrektur-Faktor berechnet. Das arithmetische Mittel der β -Korrektur-Faktoren innerhalb einer Basisform bildete den β -Korrektur-Faktor für diese Basisform.

Werden diese β -Korrektur-Faktoren in die erzielten Ergebnisse mit einberechnet, erhält man die in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellten Diagramme, in denen die korrigierten β -Faktoren in Abhängigkeit der Formfaktoren aufgetragen sind.



Abbildung 12: Beta-Faktor über Formfaktor bei zylinderförmigen Projektilen



Abbildung 13: Beta-Faktor über Formfaktor bei quaderförmigen Projektilen

Als Vergleichswerte wurden in die Diagramme der beiden Versuchsgruppen die Ergebnisse der Versuche mit Hülsen und Kugeln mit aufgenommen.

Abbildung 12 zeigt, dass alle Versuche mit zylinder- und hülsenförmigen Projektilen höhere korrigierte β -Faktoren aufweisen als die Versuche mit kugelförmigen Projektilen. Ein eindeutiger Trend, ob korrigierte β -Faktoren mit steigendem Formfaktor ansteigen oder fallen ist bei den Versuchen mit zylinderförmigen Projektilen (Abbildung 12) nicht zu erkennen. Allerdings liegen die korrigierten β -Faktoren der Versuche mit zylinderförmigen Projektilen und Formfaktor gleich eins höher als die der anderen Versuche mit zylinderförmigen Projektilen.

Aus Abbildung 13 ist ebenfalls zu erkennen, dass alle korrigierten β -Faktoren der Versuche mit quaderförmigen Projektilen und mit Hülsen, mit einer Ausnahme des Versuchs der Nummer 5578, höhere Werte aufweisen als die Versuche mit kugelförmigen Projektilen. Aus Abbildung 13 lässt sich darüber hinaus ein Trend erschließen. Mit steigendem Formfaktor steigt auch der korrigierte β -Faktor der Versuche mit quaderförmigen Projektilen an. Allerdings sei nochmals darauf hingewiesen, dass sehr hohe Anstellwinkel bei Versuchen mit Projektilen, deren Formfaktor größer als eins ist, gemessen wurden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Studie wurden Impaktexperimente an einem zweistufigen Leichtgasbeschleuniger zur Messung des Impulserhöhungsfaktors β in Abhängigkeit der Projektilgeometrie durchgeführt. Als Targets wurden hochporöse Porenbetonblöcke verwendet.

Neben den zylinder- und guaderförmigen Projektilen mit Formfaktoren f < 1, f = 1 und f > 1 wurden auch Versuche mit kugel- und hülsenförmigen Projektilen durchgeführt. Unabhängig von den Formfaktoren und mit einer Ausnahme zeigen alle für diese Impaktexperimente zylindrischen und verwendeten quaderförmigen β-Faktoren Projektilgeometrien höhere als die kugelförmigen Projektile. β-Faktoren mit Werten bis zu 2,1 wurden bei nicht kugelförmigen Projektilgeometrien gemessen, Versuche mit kugelförmigen Projektilen ergaben β -Faktoren mit Werten zwischen 1,7 und 1,8.

5. DANKSAGUNG

Diese Studie wurde im Rahmen des Projekts NEOShield angefertigt, das mit Mitteln der Europäischen Kommission im Siebten Rahmenprogramm gefördert wird.

6. REFERENZEN

- [1] W.H. Blume: *Deep Impact Mission Design,* Space Science Reviews, Springer 2005
- [2] F.K. Schäfer, M. Herrwerth, S.J. Hiermaier and E.E. Schneider: Shape Effects in Hypervelocity Impact on Semi-Infinite Metallic Targets, International Journal of Impact Engineering, Seite 699 – 711, Dezember 2001
- [3] F. Schäfer, S. Hiermaier, E. Schneider: Ballistic Limit Equation for the Normal Impact of Unyawed Ellipsoid-Shaped Projectiles on Aluminium Whipple Shields, IAC-03-IAA.5.3.06 54th International Astronautical Congress, Bremen, 2003
- [4] D.T. Britt, D. Yeomans, K. Housen, G. Consolmagno: Asteroid density, porosity, and structure. Asteroids III, S.485-500, 1987
- [5] Schäfer, G., Haas, D., Hoerth, T. und Schäfer, F. 2013. Impulstransfermessungen bei Einschlägen von Projektilen im Hypervelocitybereich. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2013
- [6] Impaktor Deep Impact Mission: http://deepimpact.umd.edu/gallery/jpg/impactor1.jpg, 28.8.14