

IMPULSTRANSFERMESSUNGEN BEI EINSCHLÄGEN VON PROJEKTILEN IM HYPERVELOCITYBEREICH

Georg Schäfer, Dominik Haas, Tobias Hoerth und Frank Schäfer – Fraunhofer EMI (Ernst-Mach-Institut), Eckerstr. 4, 79104 Freiburg, Deutschland

Zusammenfassung

Derzeit sind mehr als 8000 erdnahe Objekte in unserem Sonnensystem bekannt, die potenziell auf der Erde einschlagen und große Schäden verursachen können. Eine drohende Kollision kann möglicherweise durch einen kinetischen Impaktor, d. h. den Einschlag einer Masse bei hoher Geschwindigkeit, abgewehrt werden. Dieses Szenario wird in dieser Arbeit anhand grundlegender Laborexperimente untersucht. Beim Einschlag eines Impaktors findet ein Impulstransfer statt, der eine signifikante Bahnänderung des Himmelskörpers bewirken soll. Die Größe des Impulstransfers ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig, welche es genauer zu beschreiben und zu betrachten gilt.

Am Fraunhofer EMI werden mithilfe von zweistufigen Leichtgasbeschleunigern Aluminiumprojekteile in Modellversuchen auf Materialien, die eine asteroidenähnliche Charakteristik aufweisen, beschleunigt.

In dieser Arbeit werden die experimentellen Methoden zur Untersuchung von Impulstransfermessungen im Hypervelocitybereich mithilfe eines ballistischen Pendels vorgestellt. Ein weiteres Augenmerk liegt auf anlagenspezifischen Besonderheiten, welche die Impulstransfermessungen stören. Hierzu werden Lösungsansätze, wie z.B. ein Schnellschlussventil zur Blastreduktion, vorgestellt.

Weiter erfolgt eine exemplarische Ermittlung des Impulsübertrags und des damit verbundenen Impulserhöhungsfaktors β anhand verschiedener Zielkörpermaterialien. Diese Materialien sind Sandstein, Quarzit, Kalkstein und Porenbeton, welche unterschiedliche Materialcharakteristiken (z.B. Dichte und Porosität) aufweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Materialeigenschaften der Zielkörper einen signifikanten Einfluss auf den Impulserhöhungsfaktor haben. So wurde beispielsweise beim hochporösen Porenbeton der kleinste- und beim nichtporösen Quarzit der größte Wert für den Impulserhöhungsfaktor β gemessen ($\beta = 1,77$ im Vergleich zu $\beta = 4,35$).

1. EINLEITUNG

Einschläge von Himmelskörpern haben auf der Erde zahlreiche Krater erzeugt. Eine drohende Kollision eines Himmelskörpers mit der Erde kann durch die Ablenkung des Körpers aus seiner Bahn abgewendet werden.

Eine aussichtsreiche Methode zur Ablenkung stellt der Impulstransfer durch einen kinetischen Impaktor dar. Ein kinetischer Impaktor ist ein Objekt mit Masse m und Geschwindigkeit v , das mit möglichst hohem Impuls $\vec{p} = m\vec{v}$ („kinetisch“) auf den Zielkörper (Himmelskörper) auftrifft. Der Impulsvektor des Impaktors zeigt dabei idealerweise senkrecht zur Flugbahn des Himmelskörpers durch den Schwerpunkt des Objekts, um durch den Impact eine optimale Ablenkung aus der Bahn zu erzielen. Neben dem Impulsübertrag durch den Impaktor erzeugt die Auswurfsmasse entgegen der Einschlagsrichtung („Ejekta“) eine Rückstoßwirkung, die eine zusätzliche Impulskomponente liefert.

Am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, wird das Prinzip, Himmelskörper durch Impulstransfer abzulenken, in grundlegenden Laborexperimenten untersucht. Mithilfe eines sogenannten zweistufigen Leichtgasbeschleunigers werden Aluminiumprojekteile auf Materialien beschleunigt, die eine asteroidenähnliche Charakteristik aufweisen. Ein zentraler Punkt der Untersuchungen ist die Ermittlung des Impulsübertrags aus den erfassten Messdaten.

2. EXPERIMENTELLE METHODEN

2.1. Zweistufiger Leichtgasbeschleuniger

Für die Untersuchung von Impactvorgängen im Hypervelocitybereich werden am Fraunhofer EMI sogenannte zweistufige Leichtgasbeschleuniger eingesetzt. Mit einem zweistufigen Leichtgasbeschleuniger lassen sich sehr hohe Projektilgeschwindigkeiten von bis zu 10 km/s erreichen.

Der Beschleunigungsvorgang läuft folgendermaßen ab und ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt:

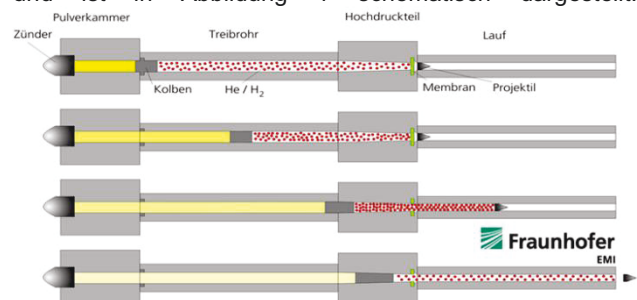


Abbildung 1: Schematischer Ablauf im zweistufigen Leichtgasbeschleuniger

Das Treibladungspulver wird in der Pulverkammer entzündet und verbrannt. Der dadurch entstehende Druck treibt einen Kolben aus Kunststoff voran. Der Kolben komprimiert das Leichtgas im Treibrohr. Am Ende des Treibrohrs wird der Kolben abgebremst und deformiert, was zu einem Maximum des Druckpulses führt. Nach

ausreichender Kompression des Leichtgases reißt am Ende des Hochdruckteils eine Membran und das Treibgas strömt in den Lauf. Hier wird das Projektil, welches sich in einem Projektilträger (Treibspiegel oder Sabot genannt) befindet, beschleunigt und tritt aus dem Lauf aus. Die Trennung von Projektil und Projektilträger erfolgt im sogenannten Blasttank aufgrund des Luftwiderstands. Anschließend erfolgt der Impact des Projektils auf den Zielkörper in der Targetkammer bei Unterdruck.

Abbildung 2 zeigt eine zweistufige Beschleunigeranlage am Fraunhofer EMI, die im Wesentlichen für die Entwicklung von Schutztechnologien für Satelliten gegen Weltraummüll eingesetzt wird.

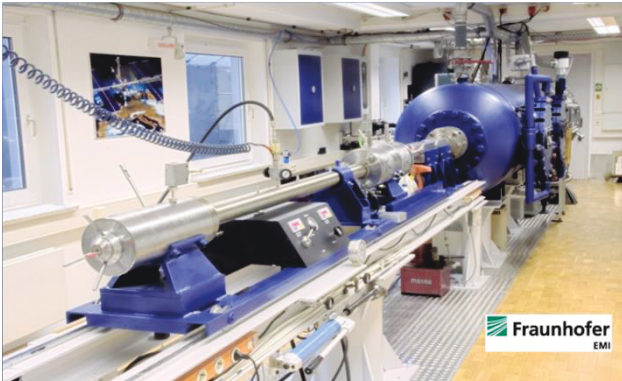


Abbildung 2: Leichtgasbeschleuniger am Fraunhofer EMI

2.2. Ballistisches Pendel

Zur Messung des Impulstransfers wird ein ballistisches Pendel verwendet. Ballistische Pendel repräsentieren eine der ältesten und bewährtesten Methoden zur Messung des Impulstransfers, und bilden somit ein zentrales Kernstück der Impulstransfermessung.

Mit dem Ansatz der Energieerhaltung $E_{kin} = E_{pot}$ und den Gesetzen der Trigonometrie (siehe Abbildung 3) kann bei

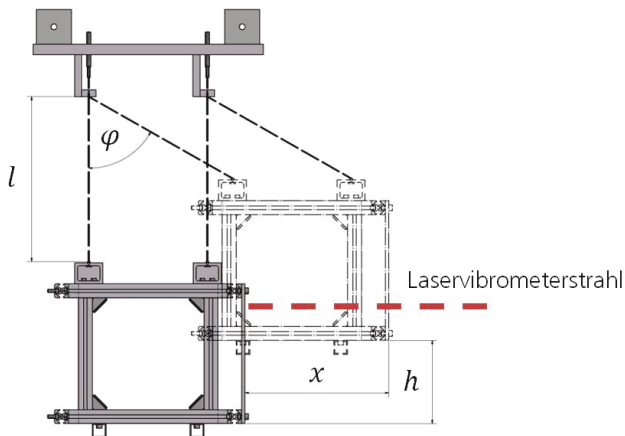


Abbildung 3: Prinzipskizze des ballistischen Pendels zur Messung des Impulstransfers

gegebener Masse des Pendels und Zielkörpers, Pendellänge und Erdbeschleunigung, durch Messung der horizontalen Auslenkung des Pendels der Impuls nach dem Impact wie folgt berechnet werden:

$$(1) \quad p' = (m_T' + m_P) \sqrt{2gl \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{l}\right)^2} \right)}$$

mit: p' Impuls nach dem Impact
 m_T' Masse des Zielkörpers nach dem Impact
 m_P Masse des Pendels
 g Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)
 l Pendellänge
 x Horizontale Auslenkung

Aufgrund der hier an das Pendel gestellten Anforderungen wie z.B. hohe Ausschlagempfindlichkeit bei einfacher und sicherer Handhabung, stellt sich ein ballistisches Pendel mit Seilaufhängung für Impactversuche im Hypervelocitybereich als zweckmäßigste Lösung heraus. Abbildung 4 zeigt schematisch das montierte Pendel mit Seilaufhängung in der Targetkammer.

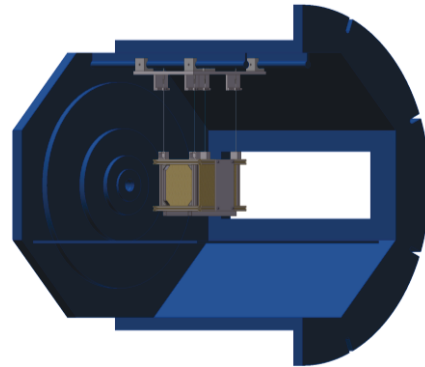


Abbildung 4: Ballistisches Pendel mit Seilaufhängung in der Targetkammer

Durch die Seilaufhängung kann von einer nahezu reibungsfreien Lagerung bei sehr geringem Eigengewicht der bewegten Teile ausgegangen werden. Eine Ausrichtung und Montage des Pendels lässt sich über die Seilaufhängung einfach realisieren. Über einen Aufnahmerahmen, welcher modular umgebaut werden kann, können verschiedene Formen und Größen der Zielkörper montiert werden. Es können Quader mit bis zu 200 mm Kantenlänge und einem Gewicht von bis zu 25 kg aufgenommen werden.

2.3. Schnellschlussventil

Beim Beschleunigungsvorgang wird ein Druck von mehreren 1000 bar im Hochdruckteil der zweistufigen Leichtgaskanone erzeugt. Dieser Druck strömt dem Projektil nach und kann erst nach verlassen des Laufs in der Blastkammer bzw. Targetkammer zum sogenannten Blast expandieren. Der Blast, welcher nach dem Projektil ungehindert auf den Zielkörper strömt, beeinflusst insbesondere Impulstransfermessungen entscheidend. In Abbildung 5 wird der Blast durch die Verwirbelungen der Ejekta in den markierten Bereichen ersichtlich. Bei der Impulstransfermessung äußert sich der Blast in Form eines überhöhten Pendelausschlages, welcher analog zu einem verfälschten Messergebnis und somit zu einem überhöhten ermittelten Impulstransfer führt. Für Projektile mit einem Durchmesser von 5 mm bei einer Geschwindigkeit von ca. 6 km/s tritt der Blast im Mittel 30 ms nach

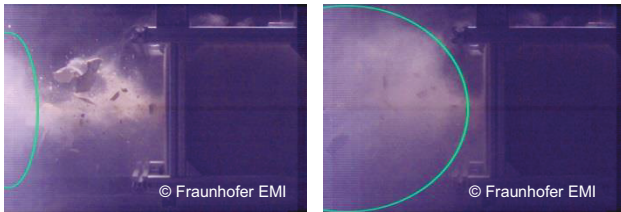


Abbildung 5: Visualisierung des Blasts

dem Impakt auf. Mit dem am Fraunhofer EMI verwendeten Beschleuniger können auch weitaus höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass bei höherer Projektilgeschwindigkeit der Auftretzeitpunkt des Blasts früher bzw. schneller erfolgen kann.

Um diesem Effekt entgegen zu wirken, wird ein Schnellschlussventil an der Projektilaustrittsöffnung der Targetkammer angebracht. Es handelt sich hierbei um einen elektromagnetischen Hubzylinder, welcher eine Verschlussplatte beschleunigt. Diese gleitet in seitlich angebrachten Führungen und läuft auf einem mechanischen Anschlag in die Endstellung ein und verschließt somit die Projektilaustrittsöffnung. In Abbildung 6 ist die Funktionsweise des Schnellschlussventils erläutert.

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Schnellschlussventil in Grundstellung <ul style="list-style-type: none"> ■ Linearzylinder eingefahren ■ Projektilaustrittsöffnung offen | <ul style="list-style-type: none"> ■ Schnellschlussventil in Endposition <ul style="list-style-type: none"> ■ Linearzylinder ausgefahren ■ Projektilaustrittsöffnung geschlossen ■ Verschlusszeit < 16 ms |
|--|---|



Abbildung 6: Funktionsprinzip Schnellschlussventil

Das am Fraunhofer EMI eingesetzte Schnellschlussventil kann innerhalb von weniger als 16 ms einen Stellweg von 40 mm überbrücken. Validierungsmessungen bestätigten, dass diese Schließzeit ausreichend hoch ist, um in der erforderlichen Zeit bis zum Auftreffen des Blasts die Projektilaustrittsöffnung zu verschließen. Weiter ist eine hohe Wiederholgenauigkeit des Schließvorgangs bei einfacher Montage des Schnellschlussventils am Flansch der Targetkammer gewährleistet. Die Verschlussplatte ist gut zugänglich und leicht auszutauschen. Durch einen mechanischen Anschlag ist diese in ihrer Endposition im geschlossenen Zustand gesichert.

2.4. Messtechnik

Ein hohes Augenmerk bei der Impulstransfermessung muss auf die Messtechnik gelegt werden. Der Impulstransfer kann über mehrere Messgrößen ermittelt werden. Bei dem gewählten Pendelsystem sind dies beispielsweise Pendelgeschwindigkeit, Pendelwinkel und horizontaler oder vertikaler Pendelausschlag. Die Messtechnik sollte zudem eine reibungsfreie und vibrationsarme Messung (mechanisch entkoppelt) ermöglichen, um denkbare Störgrößen zu unterbinden. Weiter sollten Durchführungen für Messleitungen möglichst vermieden werden, um das Grobvakuum in der

Targetkammer nicht negativ zu beeinflussen. Aus diesen Gründen wird auf berührungslose Messinstrumente, welche außerhalb der Targetkammer angebracht werden können, zurückgegriffen. Dazu zählen eine Hochgeschwindigkeitskamera, die mit bis zu 100 000 Bildern pro Sekunde den Impakt und den Materialauswurf aufzeichnet, und ein Laservibrometer, mit dem der horizontale Ausschlag des Pendels gemessen werden kann.

3. GRUNDLAGEN ZUM IMPULSTRANSFER BEI HYPERVELOCITY-EINSCHLÄGEN

Grundlage für die Impulstransfermessung bildet der Impulserhaltungssatz. Dieser besagt, dass der Gesamtimpuls \vec{p}_{ges} eines Systems erhalten bleibt (d. h. er ist zeitlich konstant), wenn die resultierende äußere Kraft auf das System gleich Null ist.

$$(2) \quad \vec{p}_{ges} = \sum m_i \vec{v}_i = \text{konstant}$$

3.1. Impulstransfer und Stoßvorgänge

Vor dem Stoß gelten beim vollkommen plastischen Fall und dem Fall im Hypervelocitybereich dieselben Bedingungen. Der Initialimpuls besteht lediglich aus dem Impulsanteil des Projektils mit

$$(3) \quad \vec{p}_{Proj.} = m_{Proj.} \vec{v}_{Proj.}$$

da sich der Zielkörper (Target) in Ruhelage ($v_T = 0$) befindet.

Nach dem Stoßvorgang beim vollkommen plastischen Fall bewegen sich das Projektil und der Zielkörper mit einer gemeinsamen Geschwindigkeit \vec{v}' in Schussrichtung. Somit ergibt sich der Impuls nach dem Stoß (\vec{p}_T') aus

$$(4) \quad \vec{p}_T' = (m_{Proj.} + m_T) \vec{v}'$$

Da die Masse des Projektils wesentlich kleiner ist als die Masse des Zielkörpers, kann Gleichung 4 zu

$$(5) \quad \vec{p}_T' \approx m_T \vec{v}'$$

vereinfacht werden.

Beim Stoß im Hypervelocitybereich sorgt der Materialauswurf entgegen der Schussrichtung (Ejekta) für eine zusätzliche Impulskomponente in Schussrichtung. Somit ergibt sich für den Impuls des Zielkörpers nach dem Stoß im Hypervelocitybereich, unter Vernachlässigung der Projektilmasse, folgender Zusammenhang:

$$(6) \quad \vec{p}_T' - \vec{p}_E = m_T \vec{v}' - m_E \vec{v}_E$$

Dabei ist zu beachten, dass sich die Masse des Zielkörpers (m_T') nach dem Stoß durch den Einschlag und dem damit verbundenen Materialauswurf ändert.

3.2. Impulsbilanzen und Impulserhöhungsfaktor β

Stellt man nun für die beiden Fälle die Impulsbilanz auf, indem man den Impuls nach dem Stoß jeweils mit dem Projektilimpuls vor dem Stoß gleich setzt, und nach dem Impuls des Zielkörpers \vec{p}_T' auflöst, ergibt sich für den vollkommen plastischen Stoß

$$(7) \quad \vec{p}_T' = \vec{p}_{Proj.}$$

und für den Stoß im Hypervelocitybereich

$$(8) \quad \vec{p}_T' = \vec{p}_{Proj.} + \vec{p}_E$$

Über die Impulsbilanzen kann nun der Impulserhöhungsfaktor β eingeführt werden. In [1] setzt sich β aus dem Quotienten des Zielkörperimpulses nach dem Stoß und dem Projektilimpuls zusammen. Durch Umformen der Gleichungen 7 und 8 folgt für den vollkommen plastischen Stoß β_p mit

$$(9) \quad \beta_p = \frac{|\vec{p}_T'|}{|\vec{p}_{Proj.}|} = 1$$

und für den Stoß im Hypervelocitybereich β_h

$$(10) \quad \beta_h = \frac{|\vec{p}_T'|}{|\vec{p}_{Proj.}|} = 1 + \frac{|\vec{p}_E|}{|\vec{p}_{Proj.}|}$$

Aus Gleichung 9 und 10 geht hervor, dass beim vollkommen plastischen Stoß der Impulserhöhungsfaktor $\beta_p = 1$ und beim Stoß im Hypervelocitybereich $\beta_h > 1$ beträgt, aufgrund des Impulsanteils, der zusätzlich durch den Materialauswurf verursacht wird. In Tabelle 1 ist zusammenfassend ein Vergleich zwischen den Stoßarten mit Impulsbilanz und den daraus resultierenden Impulserhöhungsfaktoren dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich zwischen vollkommen plastischem Stoß und Stoß im Hypervelocitybereich

Vor dem Stoß	Nach dem Stoß	
	Vollkommen plastischer Stoß	Stoß im Hypervelocitybereich
$\vec{p}_{Proj.}$	\vec{p}_T'	$\vec{p}_T' - \vec{p}_E$
Impulsbilanz	$\vec{p}_T' = \vec{p}_{Proj.}$	$\vec{p}_T' = \vec{p}_{Proj.} + \vec{p}_E$
Impulserhöhungsfaktor	$\beta_p = \frac{ \vec{p}_T' }{ \vec{p}_{Proj.} } = 1$	$\beta_h = 1 + \frac{ \vec{p}_E }{ \vec{p}_{Proj.} }$

4. IMPULSTRANSFERMESSUNG IM HYPERVELOCITYBEREICH

4.1. Versuchsaufbau

Die Messung des Impulstransfers findet am Ende der Beschleunigungsanlage in der Targetkammer (Vakuumkammer) statt. Dort schlägt das Projektil auf den Zielkörper ein. Für die Schussversuche wird die Kammer auf einen Druck von 100 mbar abgepumpt (Grobvakuum). Abbildung 7 zeigt schematisch den Versuchsaufbau in der Ansicht von oben.

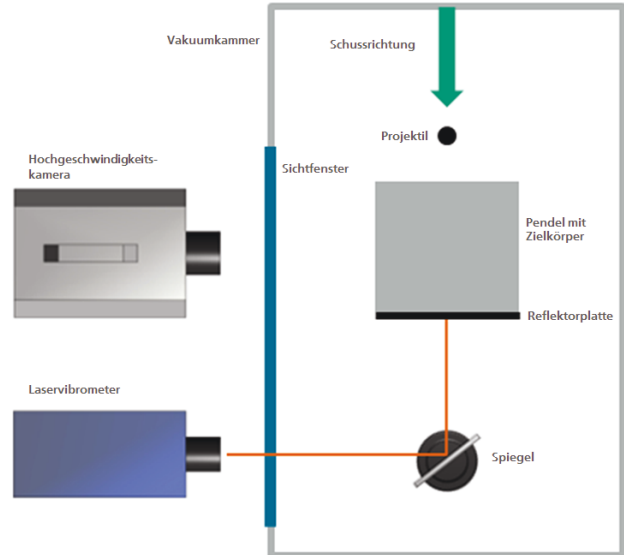


Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Impulstransfermessung

Das Projektil trifft auf den Zielkörper, welcher im Pendel befestigt ist. Durch den übertragenen Impuls wird das Pendel in Schussrichtung ausgelenkt. Das Laservibrometer ist außerhalb der Vakuumkammer platziert und dessen Laserstrahl ist durch das Sichtfenster über einen Umlenkspiegel auf die Reflektorplatte des Pendels gerichtet. Mit entsprechendem Decoder lässt sich mit dem Laservibrometer über den Doppler-Effekt die Pendelschwingung aufzeichnen und daraus der Impulstransfer berechnen. Neben dem Laservibrometer befindet sich eine Hochgeschwindigkeitskamera, die mit 30 000 Bildern pro Sekunde die ersten 50 ms des Impakts zur Charakterisierung des Materialauswurfs (Auswurfskegel, Auswurfgeschwindigkeit) aufzeichnet.

4.2. Zielkörper- und Projektilparameter

Als Zielkörper wurden vier verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Porositäten verwendet, da der zu ermittelnde Impulserhöhungsfaktor β stark materialabhängig ist [2]. Es soll hier ein möglichst großer Bereich an unterschiedlichen Materialcharakteristiken abgedeckt werden, um eine breite Datengrundlage für erste Messungen zum Impulstransfer zu erhalten. Als Zielkörper zur Impulstransfermessung dienten die in Abbildung 8 zu sehenden Gesteine. Ein Sandstein, ein Quarzstein, ein Kalkstein und ein Porenbetonstein mit einer Kantenlänge von jeweils 200 mm.

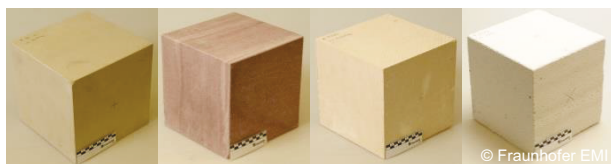


Abbildung 8: Zielkörper: Sandstein, Quarzitstein, Kalkstein, Porenbetonstein (v. l. n. r.)

Die höchste Dichte weist Quarzit mit $2,64 \text{ g/cm}^3$ auf, gefolgt von Sandstein mit einer Dichte von $2,04 \text{ g/cm}^3$, anschließend Kalkstein mit einer Dichte von $1,78 \text{ g/cm}^3$ und zuletzt Porenbeton mit einer Dichte von $0,36 \text{ g/cm}^3$. Die Porosität von Sandstein (ca. 25,3 %) und Kalkstein (ca. 31,0 %) ähneln sich in etwa. Quarzit mit einer Porosität von ca. 2,9 % kann als nahezu porenfrei angesehen werden. Da viele Asteroiden eine sehr hohe Porosität aufweisen [3] wurde ein Porenbeton mit einer Porosität von ungefähr 87,5 % gewählt.

Als Projektile wurden Aluminiumkugeln mit einem Durchmesser von 5 mm verwendet. Die Messung der Projektilgeschwindigkeit erfolgte über zwei Laserlichtschranken. Um den Einfluss der Materialeigenschaften

des Zielkörpers auf den Impulsübertrag zu untersuchen, wurden alle übrigen Parameter (Projektilgeschwindigkeit, -masse und -größe) konstant gehalten.

4.3. Ergebnisse

Anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wird im Folgenden der Materialauswurfsprozess näher erläutert und charakterisiert. Tabelle 2 zeigt die Hochgeschwindigkeitssequenzen der Versuche auf unterschiedliche Zielkörper bei $t = 60 \mu\text{s}$, $t = 360 \mu\text{s}$ und $t = 2340 \mu\text{s}$ nach dem Impact.

Je nach Zielkörpermaterial ist eine unterschiedliche Ausbildung des Auswurfskegels und der Auswurfgeschwindigkeit der Ejekta zu beobachten. Grundsätzlich entsteht bei Einschlägen in Gesteinen zuerst eine kegelförmige Fragmentwolke [4]. Die Kegelform (Kegelwinkel) variiert stark in Abhängigkeit der Materialeigenschaften des Zielkörpers. Auffällig ist die zunehmende Aufweitung der Fragmentwolke mit Abnahme der Dichte bei steigender Porosität des Zielkörpermaterials.

Tabelle 2: Impactsequenzen der Versuche bei $t = 60 \mu\text{s}$, $t = 360 \mu\text{s}$ und $t = 2340 \mu\text{s}$

	$t = 60 \mu\text{s}$	$t = 360 \mu\text{s}$	$t = 2340 \mu\text{s}$
Quarzitstein			
Sandstein			
Kalkstein			
Porenbeton			

Abbildung 9 zeigt die Pendelauslenkung in Abhängigkeit der Zeit, wobei eine positive Auslenkung eine Auslenkung in Schussrichtung beschreibt. Der Zeitpunkt $t = 0$ s entspricht dem Impaktzeitpunkt.

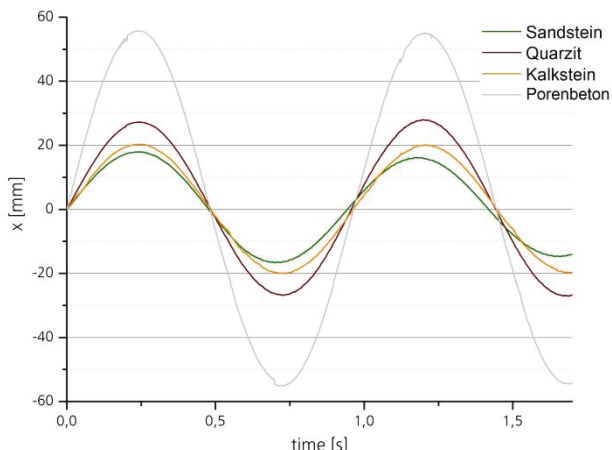


Abbildung 9: Pendelauslenkung in Abhängigkeit der Zeit

Die aufgenommenen Messdaten zeigen eine sinusförmige Schwingung des ballistischen Pendels in der Eigenfrequenz. Die Schwingung kann nahezu als reibungsfrei angenommen werden. Bei der Betrachtung der Messwerte für die Maxima und Minima ist eine vernachlässigbar kleine Abnahme der Amplituden (Dämpfung) zu verzeichnen. Betrachtet man den ersten Pendelausschlag, so ist ersichtlich, dass die größte Auslenkung beim Porenbeton gemessen wurde. Dies ist nicht auf einen sehr hohen Impulstransfer zurückzuführen, sondern durch sein geringes Eigen-gewicht verschuldet. Quarzit, Kalkstein und Sandstein weisen weitaus geringere Pendelausschläge auf.

Abbildung 10 zeigt die experimentell ermittelten Werte für den Impulserhöhungsfaktor β für die oben genannten Zielkörper in Bezug auf einen ideal plastischen Stoß. Der Impuls nach dem Impact ist in Abhängigkeit des Projektilimpulses vor dem Impact aufgetragen.

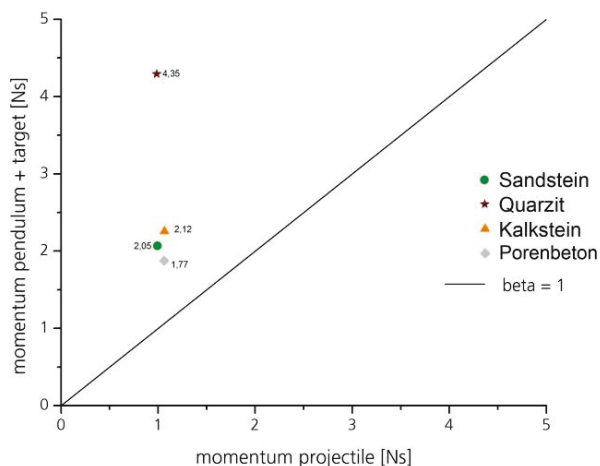


Abbildung 10: Impulserhöhungsfaktor β

Die schwarze Ursprungsgerade mit der Steigung $\beta = 1$ steht für einen ideal plastischen Stoß. Hierdurch ist der Effekt der Impulserhöhung aufgrund der Auswurfsmasse entgegen der Schussrichtung eindeutig ersichtlich.

Quarzit zeigt den größten Impulserhöhungsfaktor mit $\beta = 4,35$. Eine mögliche Erklärung ist die höhere

Ejektageschwindigkeit des ausgestoßenen Quarzitmaterials. Für den Kalkstein konnte ein Impulserhöhungsfaktor von $\beta = 2,12$ ermittelt werden und für den Sandstein ein Impulserhöhungsfaktor von $\beta = 2,05$. Der Porenbeton erzielte mit einem Wert von $\beta = 1,77$ den geringsten Impulserhöhungsfaktor. Ein möglicher Erklärungsansatz ist die geringe Auswurfgeschwindigkeit beim Impact in hochporöse Körper [5, 6], die zu einem kleinen Impulserhöhungsfaktor β führt [1].

4.4. Wirksamkeit des Schnellschlussventils

Um eine Verfälschung der Messdaten durch den dem Projektil nachströmenden Blast auszuschließen, wird ein Schnellschlussventil eingesetzt. In Abbildung 11 ist ein Vergleich der Auslenkungskurve eines Versuchs ohne Schnellschlussventil (blaue Kurve) mit der Kurve eines Versuchs mit Schnellschlussventil (rote Kurve) dargestellt.

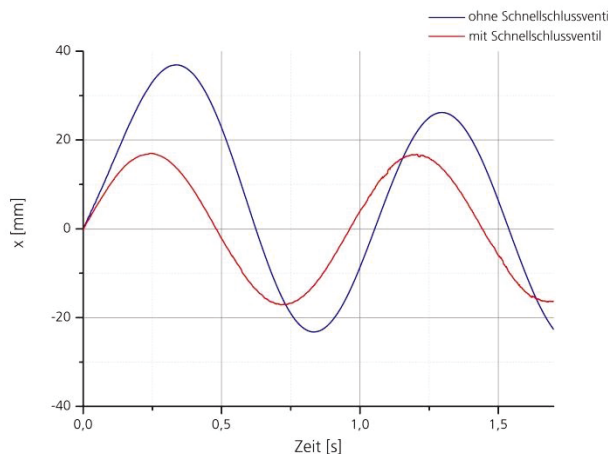


Abbildung 11: Vergleich der Auslenkungskurven der Versuche ohne Schnellschlussventil (blau) und mit Schnellschlussventil (rot)

Bei dem Versuch mit Schnellschlussventil ist eine konstante Schwingung in der Eigenfrequenz zu erkennen. Die Charakteristik, welche die blaue Kurve zeigt und durch den Blast verursacht wird (1. Maximum höher als 2. Maximum und 1. Minimum höher als 2. Minimum), bleibt bei der roten Kurve aus. Die horizontale Auslenkung hat sich bei dem Versuch mit Schnellschlussventil mehr als halbiert. Analog dazu hat sich der daraus resultierende Impuls nach dem Impact um etwa die Hälfte reduziert. Der Fehler, welcher durch den Blast in Bezug auf den resultierenden Impuls entsteht, liegt bei diesem Vergleich bei etwa 100 %. Die Wirksamkeit des Schnellschlussventils ist hierdurch bestätigt, und trägt somit erheblich zu einer Verringerung der Messunsicherheit bei Impactversuchen im Hypervelocitybereich bei.

5. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Studie wurde der Impulstransfer beim Impact im Hypervelocitybereich auf verschiedenartige Materialien mithilfe eines ballistischen Pendels gemessen. Durch Modifizierung des dazu verwendeten zweistufigen Leichtgasbeschleunigers konnte eine hohe Genauigkeit der Messung erreicht sowie Störeinflüsse unterdrückt werden. Im Folgenden sind die Ergebnisse aufgeführt:

- Der Impulsübertrag hängt stark vom Material des Zielkörpers ab.
- Bei spröden Gesteinen ist der Impulserhöhungsfaktor $\beta > 1$. In dieser Versuchsreihe konnten Impulserhöhungsfaktoren von $\beta = 1,77$ (Porenbeton) bis $\beta = 4,35$ (Quarzit) gemessen werden.
- Mit steigender Porosität verringert sich der Impulsübertrag aufgrund der geringeren Auswurfgeschwindigkeiten.

Diese Ergebnisse führen zu einem besseren Verständnis des Einflusses von Asteroideneigenschaften auf den Impulsübertrag beim Einsatz eines kinetischen Impaktors. Weitere Experimente werden in der Zukunft notwendig sein, um auch den Einfluss der Eigenschaften des Impaktors (Geschwindigkeit, Größe und Form) zu untersuchen.

6. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts NEOShield angefertigt, das mit Mitteln der Europäischen Kommission im Siebten Rahmenprogramm gefördert wird (Contract No. FP7-SPACE-2011-282703).

7. REFERENZEN

- [1] Housen, K. R. and Holsapple, K. A. 2012. Deflecting asteroids by impacts: What is beta? 43rd Lunar and Planetary Science Conference.
- [2] Holsapple, K. A. and Housen, K. R. 2012. Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling. *Icarus* 221:875-887.
- [3] Britt, D. T., Yeomans, D., Housen, K., and Consolmagno, G. 2002. Asteroid density, porosity, and structure. Asteroids III. University of Arizona Press, pp. 485-500.
- [4] Hoerth, T., Schäfer, F., Thoma, K., Kenkmann, T., Poelchau, M. H., Lexow, B., and Deutsch, A. 2013. Hypervelocity impacts on dry and wet sandstone: Observations of ejecta dynamics and crater growth. *Meteoritics & Planetary Science* 48:23-32.
- [5] Housen, K. R. and Holsapple, K. A. 2003. Impact cratering on porous asteroids. *Icarus* 163:102-119.
- [6] Michikami, T., Moriguchi, K., Hasegawa, S., and Fujiwara, A. 2007. Ejecta velocity distribution for impact cratering experiments on porous and low strength targets. *Planetary and Space Science* 55:70-88.