

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER SCHADWIRKUNG VON STAUBEINSCHLÄGEN UNTER VERSCHIEDENEN WINKELN WÄHREND LUNAREN LANDEVORGÄNGEN

C. Bühler

Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15,
85748 Garching, Deutschland

Zusammenfassung

Die Apollo 12 Mission hat gezeigt, dass durch lunare Landevorgänge zuvor gelandete Systeme beschädigt werden können. Die Triebwerke des Apollo 12 Landers wirbelten während der Landung Staubpartikel auf, die an der zuvor gelandeten Surveyor 3 Sonde nachweisliche Schäden hinterließen. Bei zukünftigen Mondmissionen kann es zu ähnlichen Szenarien während Versorgungsflügen oder Sample Return Missionen kommen. In dieser Arbeit wurden deshalb experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Schäden, die an technischen Oberflächen durch den Einschlag von Mondstaub entstehen können, zu charakterisieren. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil der durch Landevorgänge hervorgerufenen Einschläge nicht normal zur Targetoberfläche stattfindet. Aus diesem Grund wurden zwei unterschiedliche optische Materialien und Aluminiumproben mit dem Mondanalogmaterial JSC-1A unter verschiedenen Einschlagwinkeln beschossen. Die Staubpartikel wurden hierbei mit einem Wirbelstrombeschleuniger auf ungefähr 360 m/s beschleunigt. Bei allen Materialien wurde die Massenänderung der Proben durch den Staubpartikeleinschlag bestimmt. Zusätzlich wurde bei den beiden optischen Materialien die Transmissionsänderung und für die Aluminiumproben die Rauigkeitsänderung gemessen. Die Auswertung der Versuche zeigt eine signifikante Winkelabhängigkeit der Schädigungen sowie der Massenänderung bei allen Werkstoffen. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, dass bei duktilen Werkstoffen ein Anhaften der Staubpartikel der dominierende Schadeffekt ist, wohingegen bei dem verwendeten spröden optischen Werkstoff der Materialabtrag dominiert.

1. EINLEITUNG UND STAND DER TECHNIK

Die Erforschung des Erdmondes ist nicht nur wissenschaftlich höchst interessant, der Mond stellt durch seine verhältnismäßige Nähe zur Erde auch eine ideale Plattform für die Erprobung von Schlüsseltechnologien für spätere interplanetare Missionen dar. Seine gebundene Rotation und die Tatsache, dass der Mond sich auf seiner Erdumlaufbahn mit der Erde um die Sonne bewegt, begünstigen eine relativ sichere Heimkehr von Astronauten innerhalb weniger Tage bei etwaigen Stör- oder Unglücksfällen. Ein Beispiel für ein erfolgreiches Rettungs-Szenario demonstrierte die Apollo 13 Mission. Die Crew konnte nach einem Störfall auf dem Hinflug innerhalb kurzer Zeit wieder sicher zur Erde zurückkehren.

Der Erdmond ist mit einer Schicht feinkörnigem Regolith bedeckt. Dieser zeichnet sich unter anderem durch seinen besonders scharfkantigen Charakter aus [1], da die Partikel nicht wie bei irdischem Sand durch Verwitterung abgerundet werden, sondern nur durch Impakte weiter zerkleinert werden. Diese Eigenschaft stellt sowohl für technische Systeme, wie auch für die Astronauten eine große Herausforderung dar. So gab es bereits in der Vergangenheit bei etlichen Apollo-Missionen immer wieder Beeinträchtigungen, die auf lunaren Regolith zurückgeführt werden können [2]. Eine Vielzahl anderer Himmelskörper in unserem Sonnensystem ist ebenfalls von feinkörnigem Material bedeckt. Somit können die auf dem Mond gewonnenen Erkenntnisse beim Umgang mit Regolith auch in einem gewissen Rahmen auf Oberflächenmaterialien anderer Himmelskörper

übertragen werden. Viele der Probleme im Zusammenhang mit Regolith werden durch die Anwesenheit des Menschen auf dem Mond bedingt oder verstärkt. Oberflächenaktivitäten, wie zum Beispiel Landungen, tragen zur Bewegung und Aufwirbelung des feinkörnigen Materials bei. So wurde bei der Apollo 12 Mission die zuvor gelandete Surveyor 3 Sonde durch das landende Apollo Landemodul regelrecht gesandstrahlt [3]. Da die Sonde sich in nur etwa 155 Metern Entfernung zum Apollo Landeplatz befand, konnte sie durch die Astronauten untersucht werden. Zudem konnten Teile der Sonde für weitere Untersuchungen zur Erde zurückgebracht werden. *BILD 1* zeigt den Apollo Astronauten Alan Bean bei der Untersuchung der Surveyor 3 Sonde. Im Hintergrund ist das Apollo Landemodul zu erkennen.



BILD 1: Alan Bean bei der Untersuchung der Surveyor 3 Sonde [4]

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurden in den letzten Jahren von Immer et al. [5] durchgeführt. Hierbei wurden die zurückgebrachten Proben noch einmal mittels Elektronenmikroskopie untersucht. Das Ergebnis dieser Studien zeigt, dass ein Großteil der Schädigungen an den Surveyor 3 Komponenten tatsächlich auf Partikeleinschlag, der durch das Apollo Landemodul verursacht wurde, zurückzuführen ist. Somit wird deutlich, dass ein tiefergehendes Verständnis dieser Vorgänge für zukünftige Missionen unerlässlich ist. Dies wurde bereits vor den ersten Apollo Landungen erkannt und es wurden verschiedenste Tests durchgeführt, die sich mit der sogenannten Jet Erosion von Partikeln beschäftigen [6]. In den letzten Jahren konnten diese Vorgänge aufgrund der gestiegenen Rechenleistung mit modernen Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysen simuliert werden. Morris [7] führte mit Hilfe von CFD-Simulationen und der Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) Methode Untersuchungen durch, die sich mit dem Ausbreitungsverhalten des Abgasstrahls des Lunar Landing Modules und seiner Interaktion mit verhältnismäßig kleinen Regolithpartikeln beschäftigen. Hierbei ging er insbesondere auf die Auswirkungen unterschiedlicher Flughöhen des Landers ein. Kahila [8] verwendete ähnliche Analysemethoden, um die Interaktion zwischen Abgasstrahl und größeren Staubpartikeln zu untersuchen, beschäftigte sich hierbei aber mit dem europäischen Astrium S400-15 Triebwerk. In der Arbeit von Lane et al. [9] wurden ebenfalls CFD Analysen eingesetzt, um die Trajektorien der aufgewirbelten Staubpartikel während einer Landung für unterschiedliche Höhen über Grund zu simulieren. Hierbei wurde insbesondere die Korrelation zwischen Korngröße und Geschwindigkeit der Teilchen herausgearbeitet. Wittbrodt et al. [10] untersuchten in ihrer Arbeit die Auswirkung von Regolithschlägen auf Glasoberflächen unter Verwendung des Mondstaubanalogmaterials JSC-1A.. Die Staubpartikel in der Größenordnung zwischen 450 µm und 1000 µm wurden für die Untersuchungen mit Hilfe eines Sandstrahlers auf Geschwindigkeiten von bis zu 90 m/s beschleunigt. Die durch den Einschlag entstandenen Schäden auf den Glasoberflächen wurden mit Hilfe des *Portable Handheld Optical Window Inspection Device (PHOWID)* charakterisiert. Die Auswertung der mit dem Weißlichtinterferometer gewonnenen Daten zeigt, dass die Staubpartikel selbst bei moderaten Geschwindigkeiten in der Lage sind die Glasoberfläche signifikant zu schädigen. Nach Aussage der Autoren konnte allerdings keine direkte Abhängigkeit zwischen der Größe der Schadstellen und der Geschwindigkeit der Staubpartikel gefunden werden. Mpagazehe et al. [11] verwendeten in ihrer Studie den *TOPAS Solid Aerosol Generator*, um die Auswirkungen von erosivem Verschleiß auf Solarkonzentratoren zu untersuchen. Hierzu wurden JSC-1AF-Partikel auf eine Geschwindigkeit von circa 105 m/s beschleunigt. Die Partikel wurden für die Untersuchungen auf einen zur Hälfte abgedeckten Solarkonzentrator geschossen. Die in der Studie gezeigten Aufnahmen, die nach dem Beschuss gemacht wurden, zeigen deutlich den Unterschied zwischen dem geschützten und dem ungeschützten Bereich. Zusätzlich wurde der Ausgangsstrom der kompletten Anlage vor und nach dem Beschuss gemessen. Nach Aussage der Autoren zeigen die Messergebnisse, obwohl nur die Hälfte des Solarkonzentrators dem Einschlag von Staubpartikeln ausgesetzt war, dass der Ausgangsstrom der erodierten Anlage auf 60% des ursprünglichen Stroms absinkt. Eine

weitere experimentelle Studie, die sich mit dem erosiven Verschleiß durch Regolithpartikel beschäftigt, wurde ebenfalls von Mpagazehe et al. [12] durchgeführt. Für diese Untersuchungen wurde ebenfalls das Mondstaubanalogmaterial JSC-1AF verwendet. Die Staubpartikel wurden hierbei mit Hilfe des *Dust Erosion Experimental Rig (DEER)* auf Geschwindigkeiten von circa 105 m/s beschleunigt. Für ihre Untersuchungen verwendeten Mpagazehe et al. [12] drei unterschiedliche Materialien als Oberflächenmaterial, Stahl, Aluminium und Acrylglas. Für diese Materialien wurde der durch Erosion hervorgerufene Volumenverlust gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Volumenverlust der verwendeten 0,25 Inch dicken Proben bei weniger als 1% liegt. Auf der Oberfläche der Proben befanden sich aber zusätzlich Spuren des verwendeten Analogmaterials. Des Weiteren wurde bei den metallischen Werkstoffen die Reflektionsänderung untersucht, deren Oberflächenrauheit gemessen und eine Veränderung der Oberflächentopographie dokumentiert. Für den optischen Werkstoff wurde stattdessen seine Transmissionsänderung gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Beschuss zum Teil zu einer mehr als 70%igen Reduzierung der Transmission und des Gesamtreflektionsgrades führt. Die experimentellen Studien [10, 11, 12] zeigen deutlich, dass selbst langsame Einschläge bis 110 m/s von Regolithpartikeln zu einer signifikanten Schädigung verschiedenster Materialien und Systeme führen kann. Die Studien verwendeten aber zum Teil nicht vollständig repräsentative Geschwindigkeiten für die einschlagenden Staubpartikel. Die Simulationsarbeit von Lane et al. [9] weist nach, dass die Staubpartikel in realen Landeszenarien deutlich höhere Geschwindigkeiten erreichen können (von 200 m/s bis über 1400 m/s). Zudem wurde in der Arbeit dargelegt, dass die erreichten Geschwindigkeiten der aufgewirbelten Staubpartikel für große Korngrößen auch für unterschiedliche Landerhöhen gut übereinstimmen. Hin zu kleineren Partikelgrößen weichen die Simulations-Ergebnisse hingegen, je nach durchgeführter Simulation, stark voneinander ab. Aus diesem Grund wurde in der hier vorliegenden eigenen Studie ein Korngrößenbereich zwischen 250 µm und 350 µm gewählt. Die für diesen Korngrößenbereich benötigten Geschwindigkeiten von im Mittel circa 360 m/s lassen sich zudem mit dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen elektromagnetischen Beschleuniger reproduzierbar und verlässlich erreichen. Der Beschleuniger wurde noch aus einem weiteren Grund gewählt. Eine zuvor durchgeführte Studie hat nachgewiesen [13], dass bei einer Geschwindigkeit von circa 360 m/s speziell bei duktilen Materialien ein Anhaften der Partikel stattfindet. Mit Hilfe des verwendeten Beschleunigers ist es daher möglich durch vorheriges Wiegen der Impaktpartikel eine genau definierte Masse an Staubpartikeln auf den zu untersuchenden Oberflächen einschlagen zu lassen. Hierdurch kann der Anteil an anhaftenden Partikeln genau bestimmt werden. Des Weiteren soll in der vorliegenden Studie untersucht werden, welche Auswirkungen unterschiedliche Einschlagwinkel auf die Schädigung von technischen Oberflächen haben. Der Grund dafür ist, dass die Einschlagwinkel von Regolithpartikeln, die durch Landevorgänge aufgewirbelt werden, zu einem Großteil nicht normal zur Materialoberfläche sein werden. Zu diesem Zweck wurden in der durchgeführten Studie die Materialien Aluminium, Quarzglas und Polycarbonat (Makrolon®) verwendet. Die Materialauswahl resultiert

zum einen daraus, dass ähnliche Materialien bereits in experimentellen anderen Studien verwendet wurden [10, 11, 12], zum anderen soll durch die Materialauswahl an eine zuvor durchgeführte Studie angeknüpft werden [13].

2. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

2.1. Der elektromagnetische Beschleuniger

Für diese Studie wurde ein am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der Technischen Universität München entwickelter elektromagnetischer Beschleuniger verwendet [14]. *BILD 2* zeigt eine schematische Darstellung der aktuell verwendeten Konfiguration des Beschleunigers. Eingebettet im Gehäuse befindet sich die Primärspule. Sie ist eine Flachspule mit 11 Wicklungen und durch einen zweiteiligen Isolator vom Sabot getrennt. Das Sabot ist ein dünnes Aluminiumplättchen und erfüllt hierbei zwei unterschiedliche Aufgaben. Einerseits werden darauf die zu beschleunigenden Projektile platziert zum anderen fungiert es als „sekundäre Spule“. Durch die primäre Spule wird ein Wirbelstrom im Sabot induziert. Die daraus resultierende abstoßende Kraft beschleunigt es in Richtung der Stopperplatte. Bei der Kollision mit dieser Platte wird die Aluminiumscheibe abgebremst, die sich darauf befindenden Partikel hingegen fliegen ungehindert weiter und treffen auf die zu untersuchende Probe.

Zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Beschleunigers wurden einige konstruktive Veränderungen gegenüber früheren Ausführungen vorgenommen. Die erste Änderung betrifft die Stopperplatte. In der zuvor verwendeten Konfiguration war die Platte komplett eben, wodurch das Sabot teilweise schräg auftraf und die darauf platzierten Partikel mit den Innenwänden der Durchgangbohrung kollidierten. Um diesem Problem beizukommen wurde der Bereich, der das Sabot stoppt, an den Durchmesser des Sabots angepasst. Dadurch konnte die Zielgenauigkeit und damit auch die Reproduzierbarkeit der Versuche deutlich erhöht werden. Eine weitere Veränderung wurde am Isolator durchgeführt, der zuvor als ein einziges Bauteil ausgeführt war. Bei jedem Beschleunigungsvorgang drückt die Spule von unten gegen den Isolator und wölbt diesen über die Zeit leicht nach oben. Dies führt zu Leistungseinbußen, da der Abstand zwischen primärer und sekundärer Spule erhöht wird. Zudem schlägt das Sabot nach dem Abbremsvorgang wieder auf dem Isolator auf, was insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten zur Beschädigung des Isolators führen kann. Durch den zweigeteilten Aufbau erhöht sich die Wartungsfreundlichkeit des Beschleunigers, denn der innere Teil des Isolators kann nun leicht ausgetauscht werden.

Da der innere Teil in dieser Konfiguration bewusst als Verschleißteil verwendet wird, kann er auch deutlich dünner ausgeführt werden, was in einer Leistungssteigerung von circa 15% resultiert.

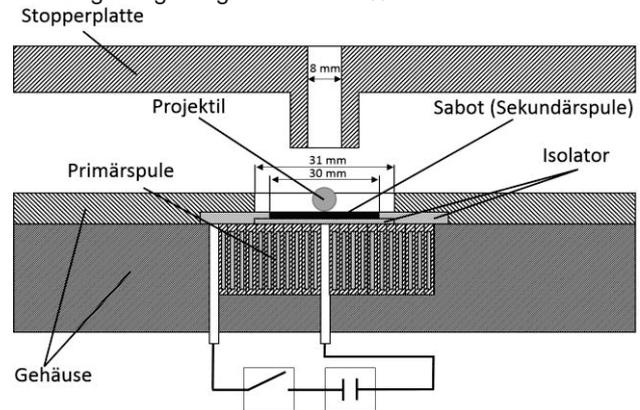


BILD 2: Schematische Darstellung des elektromagnetischen Beschleunigers, mit Änderungen nach [14]

Der Beschleuniger kann Projektilmassen von 10 mg auf Geschwindigkeiten bis zu 400 m/s beschleunigen. Hierzu stehen zwei unterschiedliche Betriebszustände zur Verfügung, die sich durch den jeweils als Energiequelle verwendeten Kondensator auszeichnen. Für Geschwindigkeiten bis 400 m/s wird ein 60 μF Kondensator mit einer maximalen Ladespannung von 10.000 V verwendet. Die obere Grenze für die erreichbare Geschwindigkeit resultiert aus der mechanischen Belastungsgrenze der Spule. Bei höheren Geschwindigkeiten und den damit verbundenen höheren Strömen und Spannungen wird sie so stark beansprucht, dass es zur Zerstörung des Spulenaufbaus kommen kann. Bei der Verwendung des 60 μF Kondensators ergibt sich zudem ein unteres Limit, da sich bei sehr geringen Ladespannungen von kleiner als 1.000 V die Ansteuerung schwierig gestaltet. Für niedrige Geschwindigkeiten wird daher ein kleinerer 10 μF Kondensator mit einer maximalen Ladespannung von 10.000 V verwendet. Die mit diesem kleineren Kondensator maximal erreichbaren Geschwindigkeiten liegen bei ungefähr 200 m/s, wodurch keine Lücke in den möglichen Geschwindigkeitsbereichen entsteht. Innerhalb der realisierbaren Geschwindigkeitsbereiche ist die erzielte Geschwindigkeit direkt proportional zur Ladespannung und hängt nur von der beschleunigten Masse und der Kapazität des jeweiligen Kondensators ab. Damit ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche gewährleistet. In *BILD 3* ist exemplarisch das Leistungsspektrum des elektromagnetischen Beschleunigers, bei der Verwendung eines 1 Gramm schweren Sabots dargestellt.

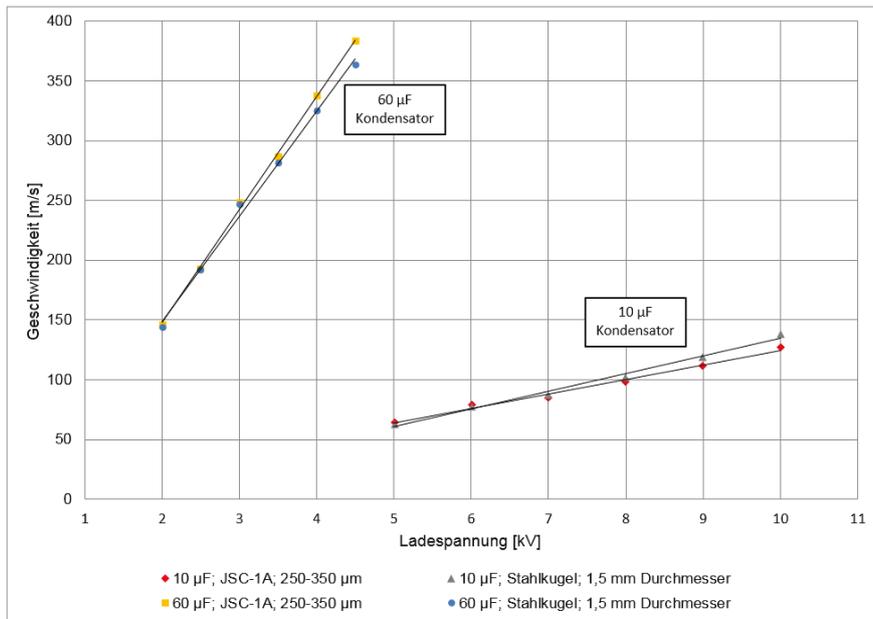


BILD 3: Leistungsspektrum des elektromagnetischen Beschleunigers

2.2. Charakterisierung der verwendeten Projektile

Lunarer Regolith zeichnet sich anders als irdischer Sand durch seine scharfkantige zerklüftete Oberfläche aus. Dies ist dadurch bedingt, dass auf dem Mond jegliche erodierenden Wettereinflüsse wie Wind und Regen sowie fließendes Wasser nicht vorhanden sind. Auf der Erde sorgen diese Umgebungsbedingungen dafür, dass die Sandkörner über die Zeit zerkleinert und rund geschliffen werden. Auf dem Mond findet eine Zerkleinerung der Partikel lediglich durch Einschläge von zum Beispiel Mikrometeoriten statt. Gerade der scharfkantige Charakter von Mondstaub hat aber aller Voraussicht nach einen signifikanten Einfluss auf das Impaktverschleißverhalten sowie auf die Tendenz der Staubpartikel in technischen Oberflächen stecken zu bleiben. Da auf der Erde nur eine sehr geringe Menge von wenigen hundert Kilogramm an tatsächlichem Mondmaterial zur Verfügung steht [15], wird in der vorliegenden Studie auf das Mondstaubsimulat JSC-1A zurückgegriffen.

Dieses Material wurde am Johnson Space Center als ein repräsentatives Material für die Mare-Regionen auf dem Mond definiert und in Auftrag gegeben. Dabei wurde der scharfkantige Charakter der Partikel durch eine speziell dafür entwickelte Mahltechnik erreicht. Das hier beschriebene Mondanalogmaterial wurde zudem in weiteren Studien verwendet, die sich ebenfalls mit dem Abrasions- und Verschleißverhalten durch Regolith beschäftigen [10, 11, 12, 16]. Durch die Verwendung desselben Materials ist somit eine sinnvolle Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. BILD 4 zeigt einige Mikroskopaufnahmen mit unterschiedlicher Vergrößerung des verwendeten Analogmaterials. In der vorliegenden Arbeit wurden für die Impaktuntersuchungen nur Partikel mit einer Korngröße zwischen 250 und 350 µm verwendet. Dazu wurden die Partikel durch Aussieben aus dem ursprünglichen JSC-1A gewonnen. Die Beschränkung auf diesen Korngrößenbereich wurde auf der Grundlage der in Kapitel 1 beschriebenen Arbeit von Lane et al. [9] gewählt. Die für diesen Korngrößenbereich benötigten Geschwindigkeiten von im Mittel circa 360 m/s lassen sich zudem mit dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen elektromagnetischen Beschleuniger erreichen.

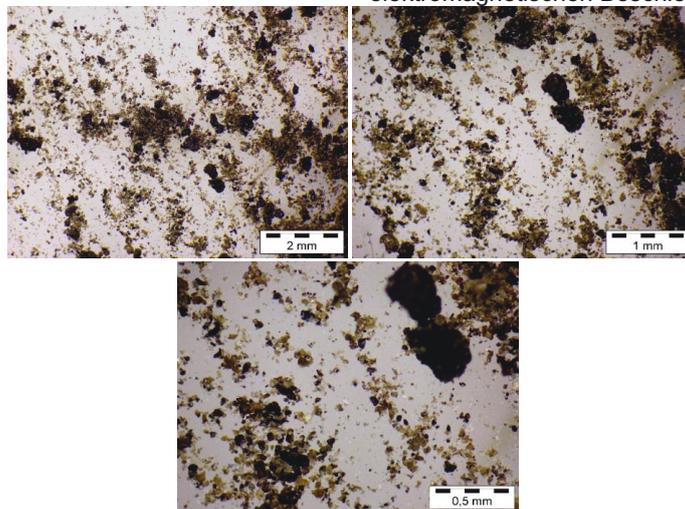


BILD 4: Mikroskopaufnahmen des Mondstaubsimulats JSC-1A

2.3. Probenhandhabung

Für die Impaktverschleißuntersuchungen in dieser Studie wurden die drei Materialien Aluminium, Quarzglas und Polycarbonat (Makrolon®) verwendet. Für die Untersuchungen wurde eine Probendicke von 3 mm gewählt. Für Einschlagwinkel kleiner 60° wurden quadratische Proben mit einer Kantenlänge von 50 mm verwendet. Bei größeren Winkeln wurden rechteckige Proben mit den Maßen 50x60 mm verwendet. Die optischen Proben wurden direkt vom Hersteller bezogen und vor ihrer Verwendung mit destilliertem Wasser gereinigt. Die Aluminiumproben wurden zusätzlich poliert, um eine vergleichbare Oberflächengüte zu garantieren. Sie wurden nach den Polierarbeiten mit Isopropanol gereinigt. Bei allen verwendeten Proben wurde vor und nach dem Beschuss das Gewicht mit Hilfe einer Analysewaage (Ohaus, Discovery, DV215CD) bestimmt. Jede Probe wurde dazu vor und nach dem Beschuss dreimal gewogen. Hierbei wurden die Proben nach dem Beschuss im ursprünglichen Zustand belassen und nicht gereinigt. Dadurch lässt sich die Gesamtmasse der in die Oberfläche eingebrachten Partikel bestimmen.

Zusätzlich wurde bei den metallischen Proben die Oberflächenrauheit vor und nach dem Beschuss mit einem Laserinterferometer (Rodenstock RM600) bestimmt, um die Veränderung der Oberflächengüte zu charakterisieren. Bei den verwendeten optischen Materialien wurde deren Transmissionsänderung mit einem Spektrophotometer (Perkin Elmer UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19) ermittelt. Bei allen Untersuchungen wurden die Proben ebenfalls nach dem Beschuss nicht gereinigt.

3. ERGEBNISSE

Die Auswirkungen des Beschusses (abhängige Variablen: Gewichtsänderung, Rauhtiefe und optische Eigenschaften Variablen) wurde unter anderem als Funktion des Einschlagwinkels auf die Oberfläche, unter gleicher Geschwindigkeit, quantifiziert. Hierzu wurden sechs verschiedene Einschlagwinkel gewählt. Die Angabe der Gradzahl bezeichnet hierbei den Winkel zwischen der Schussrichtung und der Oberflächennormalen, mit 0° = normal zur Oberfläche, und 75° = streifend.

3.1. Untersuchung von Aluminiumproben

3.1.1. Gewichtsänderung durch Einschlag auf Aluminium

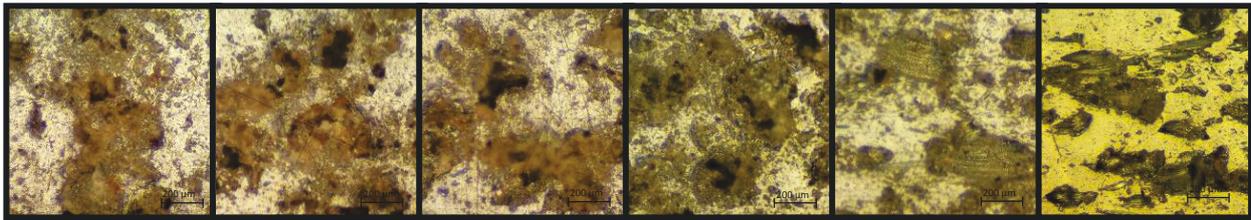


BILD 5: Mikroskopaufnahmen von Aluminiumproben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal), 15° , 30° , 45° , 60° , 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A bei 32-facher Vergrößerung

RESULTATE: In dieser Studie wurde die Gewichtsveränderung von Aluminiumproben durch den Beschuss unter verschiedenen Beschusswinkeln mit dem Mondstaubsimulat JSC-1A untersucht. Die angegebenen Beschusswinkel sind hierbei die Winkel zwischen der Oberflächennormalen der Probe und Schussrichtung. Für die Untersuchung der Gewichtsänderung wurden in BILD 6 die relativen und absoluten Gewichtsänderungen der Proben über die unterschiedlichen Beschusswinkel aufgetragen. Die relative Gewichtsänderung berechnet sich hierbei aus der absoluten Gewichtsänderung der Probe bezogen auf die Partikelmasse der einschlagenden Partikel. Hierdurch ist es möglich die einzelnen Proben direkt miteinander zu vergleichen, auch wenn die Gesamtpartikelmasse leicht variiert.

DISKUSSION: In BILD 6 ist zu erkennen, dass die Gesamtmasse der Proben bis zu einem Beschusswinkel von 60° durch den Beschuss zunimmt. Es wird Simulatmaterial auf der Probenoberfläche abgelagert. Die größte Materialablagerung ist bei einem Einschlagwinkel von 15° zu verzeichnen. Hier beträgt die Gewichtssteigerung circa 6% der Partikelmasse. Unter diesem Winkel sind die scharfkantigen Regolithpartikel offensichtlich am besten in der Lage in die Oberfläche einzudringen und an den Schadstellen zu haften. Dies zeigt sich auch in den Mikroskopaufnahmen in BILD 5. Hier ist zu erkennen, dass große Teile der Probe mit

Regolithpartikeln bedeckt sind. Bei einem kleineren Winkel bleiben deutlich weniger Partikel an der Oberfläche haften. Die eingebrachte Masse reduziert sich um etwas mehr als 4% der Impaktpartikelmasse. Auch bei größeren Winkeln bis 45° sinkt die Masse der abgelagerten Partikel wieder deutlich gegenüber dem Einschlag unter 15° ab. Der steigende Anstellwinkel der Proben sorgt dafür, dass die Partikel an den Schadstellen abgleiten und nicht mehr so stark an ihnen haften. Der Materialeintrag sinkt hier wieder auf vergleichbare Werte wie für Einschläge normal zur Oberfläche ab. Auch dies lässt sich anhand der Mikroskopaufnahmen erkennen. Ab einem Beschusswinkel von 60° kommt es zu Materialabtrag, der sich bei einem Beschusswinkel von 75° noch steigert. Die Mikroskopaufnahmen in BILD 5 belegen diese Aussage. Man erkennt deutlich, dass bei einem Einschlagwinkel von 60° und 75° kaum Material auf den Proben haftet. Im Gegensatz zu kleineren Beschusswinkeln sind aber deutliche Riefen und Kratzer zu erkennen, die auf Materialabtrag schließen lassen. Somit zeigt sich, dass für die Beschusswinkel kleiner als 60° der Materialeintrag und das Haften des Materials an der Probenoberfläche der dominierende Effekt ist, wohingegen es bei größeren Einschlagwinkeln zu einem Materialabtrag und Schleiferscheinungen auf der Oberfläche kommt.

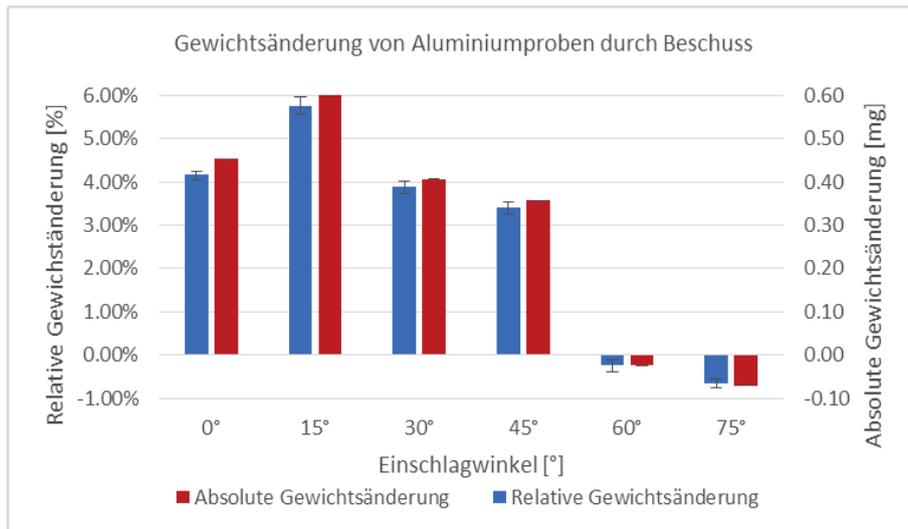


BILD 6: Gewichtsänderung von Aluminiumproben nach Beschuss (0° = normal, 75° streifend)

3.1.2. Änderung der Oberflächenrauheit durch Einschlag auf Aluminium

RESULTATE: In *BILD 7* ist die Oberflächenrauheit der Aluminiumproben vor und nach dem Beschuss unter verschiedenen Winkeln mit JSC-1A-Partikeln dargestellt (0° = normal, 75° streifend). Für die Berechnung der Oberflächenrauheit wurde der Mittelwert zweier senkrecht zueinander angeordneten Messungen gebildet. Die Ausnahme dazu bilden die beiden Beschusswinkel 60° und 75°, hier wurden zwei parallele Messungen in Beschussrichtung durchgeführt. Anders als bei kleineren Winkeln treten hier keine runden Schadstellen mehr auf, sondern die Schädigung ist über ein schmales Band in Schussrichtung verteilt. Somit ist durch diese Messmethode sichergestellt, dass nicht ein großer Bereich der Proben vermessen wird, der gar nicht im Einschlagsbereich liegt. Dadurch ist die Vergleichbarkeit mit den anderen Messwerten sichergestellt. Zudem wurde für die Vermessung der beschossenen Proben die ISO 4288 (04/98) absichtlich nicht vollständig erfüllt. Es wurde hier grundsätzlich ein Cut-off von 2,5 gewählt, um die Messstrecke über alle Proben gleich zu halten.

DISKUSSION: *BILD 7* zeigt, dass die Oberflächenrauheit nach dem Beschuss mit JSC-1A für Beschusswinkel kleiner 75° um mehr als das Zehnfache ansteigt. Zudem ist der Trend zu erkennen, dass die Oberflächenrauheit hin zu größeren Beschusswinkeln abnimmt, wobei der Wert der Oberflächenrauheit im Bereich zwischen 0° und 60° nur langsam absinkt. Über das gesamte Spektrum dieser Winkel ist eine Reduzierung um circa 20% zu verzeichnen. Ein deutlicher Unterschied tritt erst zwischen den Beschusswinkeln von 60° und 75° auf. Hier sinkt die Oberflächenrauigkeit um circa 25% Prozent ab. Dies lässt sich damit erklären, dass die einschlagenden Staubpartikel durch den hohen Anstellwinkel weit verteilte Kratzer und Riefen auf der Oberfläche hinterlassen. Wie auch die Mikroskopaufnahmen in *BILD 5* Bereiche zeigen, in denen die Oberfläche nur wenig durch den Partikeleinschlag beschädigt wird. Dies sorgt für einen geringeren Anstieg der Oberflächenrauheit im Vergleich zu kleineren Beschusswinkeln. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Massenänderung der Proben und der Änderung der Oberflächenrauheit konnte nicht gefunden werden. Dies liegt daran, dass nicht nur der Partikeleintrag, sondern auch Schädigungen der Oberfläche an denen keine Partikel haften zur Veränderung der Oberflächenrauheit beitragen.

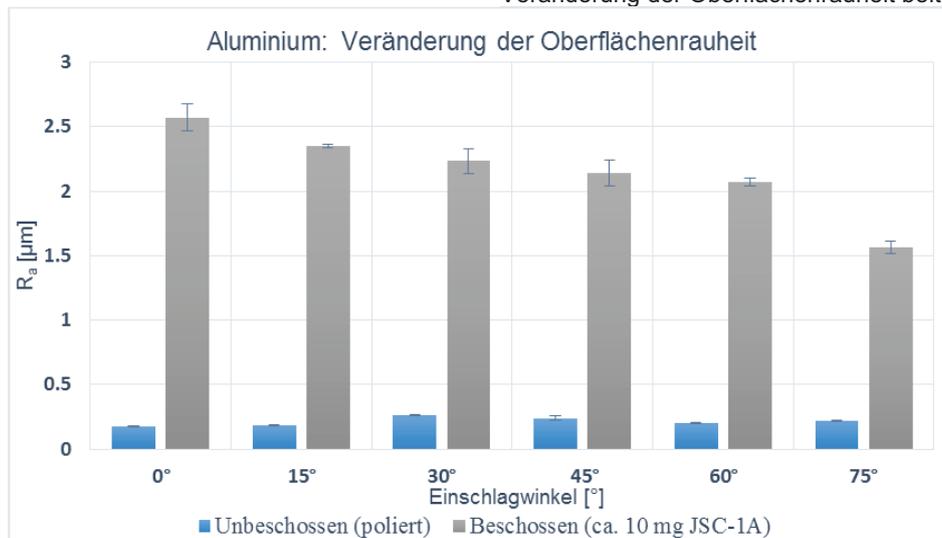


BILD 7: Veränderung der Oberflächenrauheit von Aluminium nach Beschuss mit JSC-1A (0° = normal, 75° streifend)

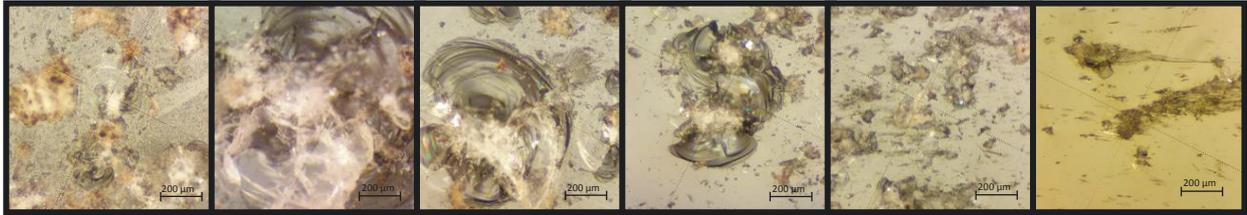


BILD 8: Mikroskopaufnahmen von Glasproben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0°, 15°, 30°, 45° 60°, 75°) nach Beschuss mit JSC-1A bei 32-facher Vergrößerung

3.2. Untersuchung von optischen Materialien

3.2.1. Gewichtsänderung durch Einschlag auf Glasproben

RESULTATE: In der vorliegenden Studie wurde die Gewichtsänderung von Glasproben durch den Beschuss von Mondstaubsimulat untersucht (0° = normal). In *BILD 9* ist die relative und die absolute Gewichtsänderung der Glasproben nach dem Beschuss mit JSC-1A für die unterschiedlichen Beschusswinkel dargestellt. Die relative Gewichtsveränderung berechnet sich hierbei aus der Gewichtsänderung der jeweiligen Probe bezogen auf die Gesamtmasse der verwendeten Beschusspartikel. Da die Gesamtmasse der Staubpartikel variiert, lassen sich hierdurch die unterschiedlichen Einschlagwinkel miteinander vergleichen.

DISKUSSION: In *BILD 9* ist zu erkennen, dass der Beschuss für alle Winkel kleiner 75° zu einer Gewichtsreduzierung führt. In einer vorangegangenen Studie unter gleichen Testbedingung [13] wurde bereits gezeigt, dass durch den Beschuss Teile der Glasproben herausgeschlagen werden und es zu muschelförmigen Schädigungen kommt. Dieser Effekt ist auch hier zu beobachten und resultiert aus der Sprödigkeit der Glasproben. *BILD 9* zeigt, dass bei einem Einschlag normal zur Oberfläche der Partikeleintrag und die Masse der herausgeschlagenen Partikel nahezu gleich sind. Dies resultiert daraus, dass bei diesem Winkel noch eine Vielzahl der Partikel in den entstandenen Schädstellen haften bleiben.

Die in *BILD 8* gezeigten Mikroskopaufnahmen der Glasproben nach Beschuss verdeutlichen dies. Man erkennt, dass im ersten Bild links eine große Menge an Partikeln in den Schädstellen abgelagert ist. Bei einem Winkel von 15° nimmt die Massenabnahme fast um das Fünffzehnfache zu. Die einschlagenden Staubpartikel sind somit in der Lage deutlich mehr Material abzutragen und werden zudem mit den entstehenden Splintern weggeschleudert. Auch dies zeigt sich in den Mikroskopaufnahmen deutlich. Die Schädstelle füllt hier fast den kompletten Bildbereich aus und es sind fast keine Partikelrückstände mehr zu erkennen.

In *BILD 9* zeigt sich der Trend, dass bei größer werdenden Einschlagwinkeln der Gewichtsverlust abnimmt. Bei einem Winkel von 75° führt der Einschlag sogar zu einer Gewichtszunahme. Dies lässt sich damit erklären, dass unter diesem Winkel nur noch geringe Schädigungen auftreten, die Staubpartikel aber aufgrund ihrer scharfkantigen Oberfläche an den Glasproben haften. Diese Aussage lässt sich ebenfalls anhand der Mikroskopaufnahmen belegen. Die Schädstellen werden hier mit größer werdenden Einschlagwinkeln signifikant kleiner. Ab einem Einschlagwinkel von 60° zeigen sich zudem erste Kratz- und Schleifspuren auf den Proben. Bei einem Einschlagwinkel von 75° sind die Schädstellen fast ausschließlich oberflächliche Kratzer, an deren Ende sich die Einschlagpartikel sammeln. Somit zeigt sich, dass aufgrund der Sprödigkeit des Materials der dominierende Effekt über alle unterschiedlichen Einschlagwinkel ein Materialabtrag ist. Bei kleineren Einschlagwinkeln entsteht die Schädigung der Oberfläche vor allem durch ein muschelförmiges Abplatzen. Hin zu größeren Einschlagwinkel wird dieser Effekt kleiner, bis nur noch ein Zerkratzen der Oberfläche festzustellen ist.

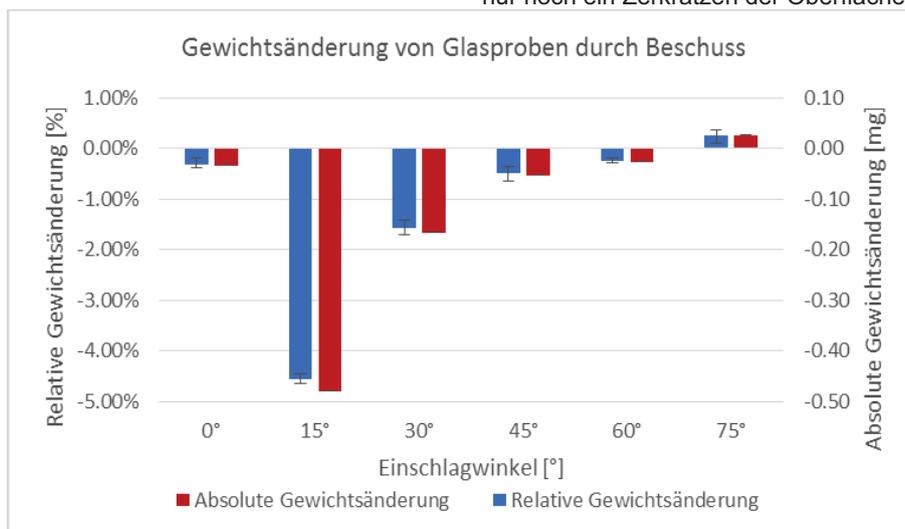


BILD 9: Gewichtsänderung von Glasproben nach Beschuss

3.2.2. Änderung der Transmission durch Einschlag auf Glasproben

RESULTATE: *BILD 10* zeigt die Transmission von Glas nach dem Beschuss mit JSC-1A für verschiedene Einschlagwinkel (0° = normal). Für die beschossenen Proben wurde die geringste Transmission ermittelt, um den Worst-Case-Fall abzudecken, da gerade bei optischen Systemen der Verlust von wenigen Pixeln zu einer signifikant schlechteren Performance des Systems führen kann. Man erkennt in *BILD 10*, dass die Transmission am stärksten für die Einschlagwinkel von 0° (normal) und 15° abnimmt. Die Transmission geht hier im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes von einem Ausgangswert der unbeschädigten Probe von durchschnittlich ungefähr 90% auf einen Wert von durchschnittlich unter 65% zurück. Für beide Einschlagwinkel ergeben sich sehr ähnliche Werte. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messungenauigkeit.

DISKUSSION: Dies deutet darauf hin, dass die in den Mikroskopaufnahmen in *BILD 8* gezeigten großflächigen Beschädigungen bei 15° ungefähr denselben Einfluss

auf die verbleibende Transmission haben wie das verstärkte Anhaften von Staubpartikeln bei 0° . Die größeren Schadstellen bei 15° Einschlagwinkel streuen das Licht zwar stärker, allerdings halten die haftenden Partikel bei 0° Einschlagwinkel einen Großteil des Lichts ab. Für steigende Einschlagwinkel sinkt der Einfluss auf die Transmission. Hier liefern die beiden Winkel von 30° und 45° bei Berücksichtigung der Messungenauigkeit gleiche Werte für die verbleibende Transmission. Sie geht hier auf ungefähr 70% im sichtbaren Wellenlängenbereich zurück. Obwohl sich, wie im vorigen Abschnitt gezeigt, der Materialabtrag für beide Winkel deutlich unterscheidet, scheint er in diesem Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Transmission zu haben. Für Einschlagwinkel von 75° wäre zu erwarten, dass die Transmission aufgrund der haftenden Partikel wieder abnimmt. Sie hat jedoch mit durchschnittlich deutlich über 80% den größten Wert der beschossenen Proben. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in den Schadstellen zwar Partikel haften, diese Stellen aber aufgrund des hohen Einschlagwinkels nicht dicht beieinander liegen. Somit kann das Licht an vielen unbeschädigten Stellen ungehindert passieren.

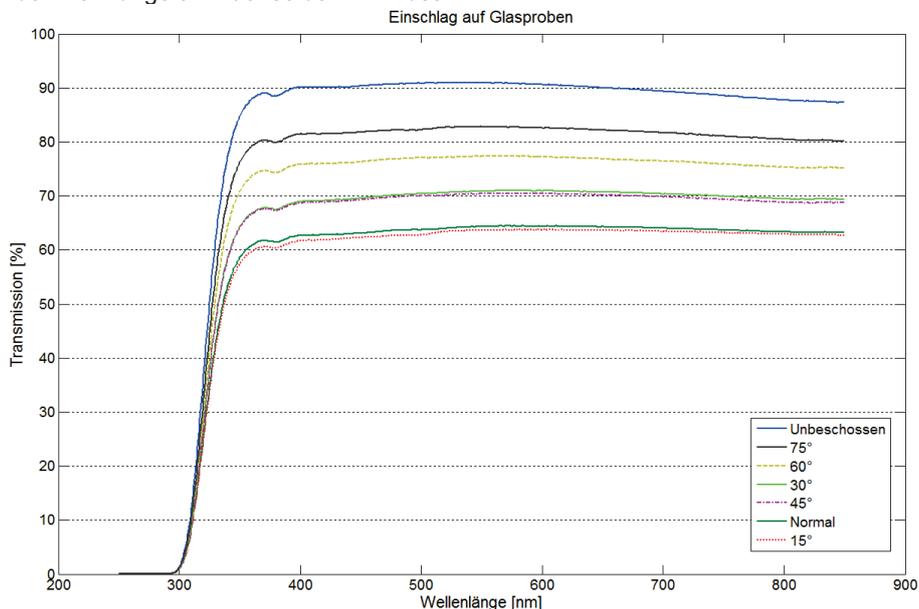


BILD 10: Wellenlängenabhängige Transmission durch Glasproben für verschiedene Beschusswinkel

3.2.3. Gewichtsänderung durch Impact bei Makrolon®-Proben

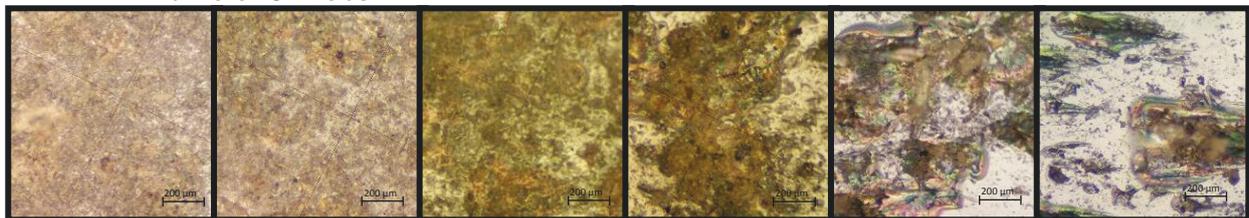


BILD 11: Mikroskopaufnahmen von Makrolon®-Proben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°) nach Beschuss mit JSC-1A bei 32-facher Vergrößerung

RESULTATE: Als zweites optisches Material wurde Makrolon® untersucht. Hier wurde ebenfalls die Gewichtsänderung nach dem Beschuss unter verschiedenen Winkeln (0° = normal) mit JSC-1A gemessen. Auch die Definition von relativer und absoluter Gewichtsänderung wurde beibehalten. In *BILD 12* sind diese Gewichtsänderungen dargestellt. Man erkennt hier,

dass der Beschuss mit JSC-1A für alle verschiedenen Winkel zu einer Gewichtssteigerung führt.

DISKUSSION: Die Gewichtszunahme deutet darauf hin, dass die Partikel nach dem Auftreffen in der Oberfläche stecken bleiben. In einer zuvor durchgeführten Studie wurde dieser Effekt bereits für den Beschuss mit einem Einschlag normal zur Oberfläche bei gleichen

Testbedingungen beobachtet [13]. Der Grund besteht vermutlich darin, dass sich die scharfkantigen Simulatpartikel in die duktile Oberfläche der Proben eingraben und in den Schadstellen haften bleiben. *BILD 12* zeigt, dass der Materialeintrag für 0° und 15° Einschlagwinkel in etwa konstant bei circa 2,5% der Masse der einschlagenden Partikel liegt. Es ist deutlich zu sehen, dass dieser Effekt mit größer werdenden Einschlagwinkeln abnimmt und bis auf einen Wert von knapp unter 0,5% der Impaktpartikelmasse abnimmt. Die in *BILD 11* dargestellten Mikroskopaufnahmen unterstützen diese Aussage. Es ist hier zu erkennen, dass

bei einem Einschlagwinkel von 0° die Oberfläche der Makrolon®-Probe von einer Vielzahl kleiner Partikel bedeckt ist. Die Mikroskopaufnahmen zeigen zudem, dass der Materialeintrag mit zunehmendem Winkel abnimmt. Erst ab einem Winkel von 75° zeigen sich deutliche Schleifspuren auf den Proben. Allerdings sind auch hier Stellen zu erkennen, in denen sich größere Mengen an JSC-1A ablagern. Anders als bei Glas kommt es bei keinem Beschusswinkel zu einem muschelförmigen Abplatzen des Materials an den Schadstellen. Der dominierende Schadeffekt, der durch den Beschuss mit JSC-1A bei Makrolon® hervorgerufen wird, ist demnach der Eintrag und das Anhaften der Staubpartikel auf und in der Oberfläche der Proben.

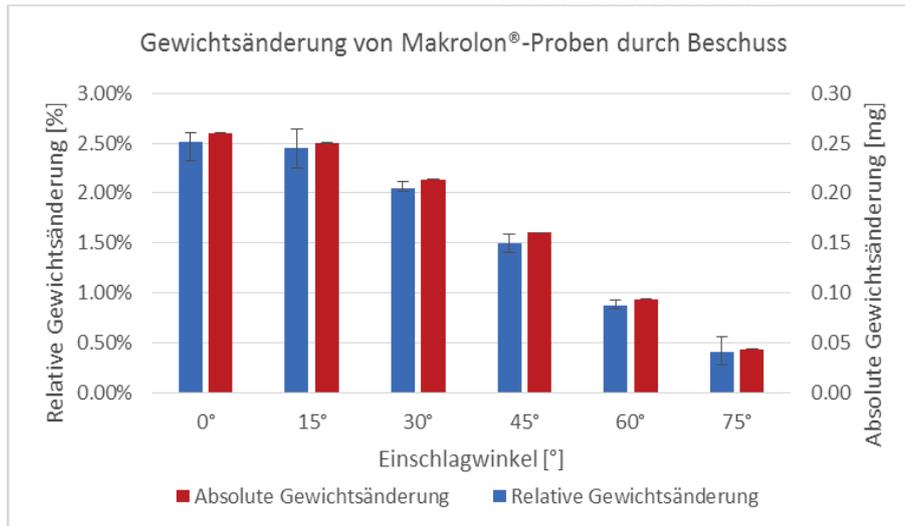


BILD 12: Gewichtsänderung von Makrolon®-Proben nach Beschuss (0° normal)

3.2.4. Änderung der Transmission durch Einschlag auf Makrolon®-Proben

RESULTATE: In *BILD 13* ist die Transmission von Makrolon®-Proben nach dem Beschuss mit Mondstaubsimulat für verschiedene Einschlagwinkel dargestellt (0° normal, 75° streifend). Es wurde hier aus denselben Gründen wie zuvor bei den Glasproben der größte Schadensfall gemessen. Man erkennt deutlich, dass der größte Effekt bei einem Einschlagwinkel von 0° (Oberflächennormal) auftritt. Die Transmission geht hier im sichtbaren Wellenlängenbereich auf einen durchschnittlichen Wert von unter 45% zurück. Für einen Einschlagwinkel von 15° ist ein ähnlich großer Effekt zu verzeichnen. Wie die Mikroskopaufnahmen in *BILD 11* zeigen, ist in beiden Fällen ein Großteil der Oberfläche mit JSC-1A-Partikeln bedeckt, durch die das einfallende Licht abgehalten wird. Für die drei Einschlagwinkel 30°, 45° und 60° ergeben sich sehr ähnliche Werte für die verbleibende Transmission. Die Transmission steigt auf durchschnittliche Werte im Bereich des sichtbaren Lichts von 60% an. Die Unterschiede zwischen den Winkeln liegen im Bereich der Messungenauigkeit.

DISKUSSION: Trotz der verhältnismäßig großen Menge an haftenden Simulatpartikeln scheint es hier bereits eine deutlich größere Zahl unbeschädigter Stellen zu geben, an denen das einfallende Licht ungehindert passieren kann. Beim Vergleich mit den Mikroskopaufnahmen in *BILD 11* ist darauf hinzuweisen, dass der für die Transmissionsmessung verwendete Bereich deutlich kleiner ist als der Bereich der Aufnahmen. Da die Schadstellen hier deutlich kleiner als die großflächigen Beschädigungen der Glasproben sind, kann von den Aufnahmen nur bedingt auf die Transmission geschlossen werden. Erst ab einem Einschlagwinkel von 75° steigt die Transmission noch einmal deutlich auf einen durchschnittlichen Wert von 70% im sichtbaren Wellenlängenbereich an. Dieser Effekt ist damit zu erklären, dass bei diesem Winkel vergleichsweise wenig Material an der Oberfläche haftet und es mehr zu riefenartigen Schädigungen kommt, die zudem große Teile des Materials fast unbeschädigt lassen. Im Vergleich zu den Glasproben ist jedoch zu bemerken, dass diese Werte nur 5-10% besser sind als deren schlechteste Werte für die Transmission nach Beschuss. Dies deutet darauf hin, dass das Haften von Regolithpartikeln einen signifikant größeren Einfluss auf die Transmissionsänderung hat als das Herausschlagen von Oberflächenmaterial. Dieser Effekt wurde auch bereits in einer vorangegangenen Studie aufgezeigt [13].

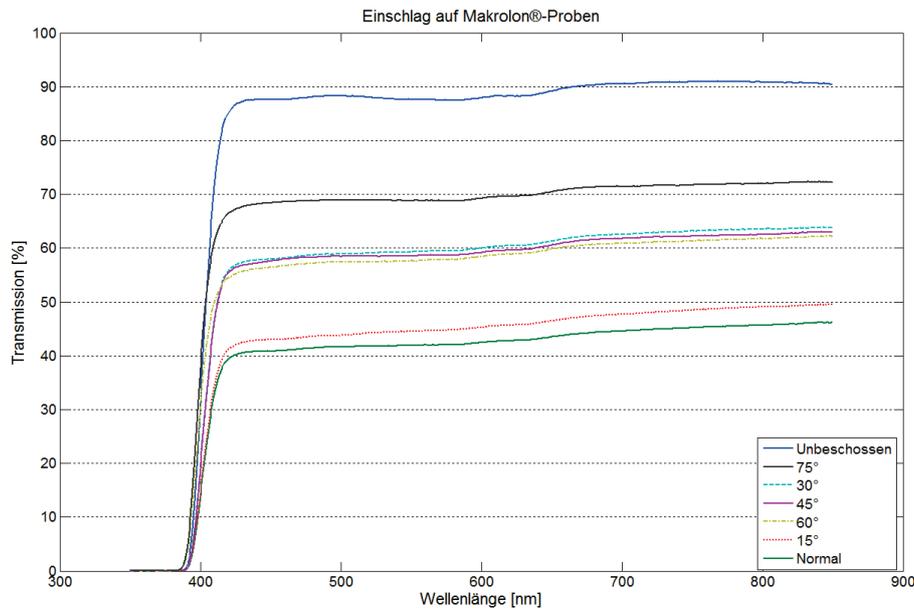


BILD 13: Wellenlängenabhängige Transmission durch Makrolon®-Proben für verschiedene Beschusswinkel

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der durchgeführten Studie wurde gezeigt, dass der Einschlag von Staubpartikeln (simulierter Mondstaub) bei einer Geschwindigkeit von circa 360 m/s, die z.B. durch die Staubaufwirbelung bei Landevorgängen auf dem Mond erreicht werden kann, technische Oberflächen nachhaltig schädigt. Die in der Studie quantifizierten Effekte treten bereits bei einer vergleichsweise geringen Menge von 10 mg an Staubpartikeln auf. Bei den verwendeten Aluminiumproben führte der Einschlag der Simulatpartikel für alle untersuchten Einschlagwinkel im Durchschnitt zu einer Steigerung der Oberflächenrauheit um den Faktor 10.

Die Untersuchung der verwendeten optischen Materialien zeigt, dass die Transmission der Proben durch den Einschlag von Regolithpartikeln signifikant verringert wird. Hierbei ist festzustellen, dass dieser optische Effekt bei Makrolon® ungefähr um den Faktor 2 größer ist als bei Glas. Die Untersuchung der Gewichtsänderung der Proben nach dem Beschuss hat gezeigt, dass der dominierende Oberflächenveränderungseffekt bei den verwendeten duktilen Materialien das Steckenbleiben und Anhaften der Partikel auf der Oberfläche ist. Bei den verwendeten spröden Glasproben zeigte die Auswertung der Gewichtsänderung, dass hier ein Herausschlagen des Probenmaterials der dominierende Prozess der Oberflächenveränderung ist. Es ist zudem festzustellen, dass die Veränderung der untersuchten Materialeigenschaften, Transmission und Oberflächenrauheit, mit größeren Einschlagwinkeln (also streifendem Einschlag) für alle untersuchten Materialien abnimmt.

Da sich in der vorliegenden Studie gezeigt hat, dass bei duktilen Materialien das Anhaften der Staubpartikel an Schadstellen der dominierende Effekt der Oberflächenveränderung ist, soll in weiterführenden Studien untersucht werden, in wie weit ein Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Geschwindigkeit für dieses Phänomen besteht. Hierzu sollen die Einschläge von Partikeln unterschiedlicher Größe bei verschiedenen Geschwindigkeiten untersucht werden. Mit Hilfe dieser Experimente sollen Schwellwerte identifiziert werden, ab denen eine signifikante

Partikelmenge auf der Oberfläche haftet. Zudem sollen weiterführende Experimente für deutlich größere Einschlagsgeschwindigkeiten bis zu 1500 m/s durchgeführt werden. Da diese Geschwindigkeiten erst bei deutlich kleineren Staubpartikeln auftreten, soll untersucht werden, in wie weit die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse auch auf diese Partikelgrößen und Geschwindigkeiten zu übertragen sind.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde durch die Helmholtz Allianz ROBEX gefördert. Der Autor dankt Herrn Daniel Hutzler (Lehrstuhl E11 für Laser- und Röntgenphysik; Technische Universität München) für die freundliche Unterstützung bei der Spektrophotometer Analyse.

LITERATUR

- [1] J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, and S. Sture: *Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics*, Rev. Geophys., vol. 45, no. 2, 2007
- [2] Gaier, James R., and Ronald A. Creel: *The Effects of Lunar Dust on Advanced EVA Systems: Lessons from Apollo*, Presentation, Jan 2005
- [3] Burton G. Cour-Palais: *News Release*, NASA, Houston, Texas, 1970
- [4] www.nasa.gov/sites/default/files/images/383417main_surveyor3_full.jpg, Page Editor: NASA Administrator NASA Official: Brian Dunbar, abgerufen am 01.07.2015
- [5] Christopher Immer, Philip Metzger, Paul E. Hintze, Andrew Nick, Ryan Horan: *Apollo 12 lunar module exhaust plume impingement on lunar surveyor III*, Icarus 211, 2011, S. 1089-1102
- [6] Norman S. Land and Hurlund F. Scholl: *Scaled lunar module jet erosion experiments*, NASA Technical Report, Langley Research Center, Hampton, 1969, Vol. 5051
- [7] Morris, Aaron Benjamin: *Simulation of rocket plume impingement and dust dispersal on the lunar surface*, Dissertation, The University of Texas at Austin, 2012
- [8] Heikki Kahila: *Engine exhaust plume interactions with a planetary surface*, Master's Thesis, Aalto University

School of Science, 2014

- [9] John E. Lane, Philip T. Metzger, Christopher D. Immer: *Lagrangian Trajectory Modeling of Lunar Dust Particles*, 11th Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Construction and Operations in Challenging Environments, Long Beach, NASA Document ID: 20130012062, 2008
- [10] Audelia C. Wittbrodt, Philip T. Metzger: *Material Damage from Impacts of Lunar Soil Particles Ejected by the Rocket Exhaust of Landing Spacecraft*, NASA Technical Report, 2008
- [11] Jeremiah N. Mpagazehe, Kenneth W. Street, Jr., Irebert R. Delgado, C. Fred Higgs III: *"Kicking Up Some Dust": An Experimental Investigation Relating Lunar Dust Erosive Wear to Solar Power Loss*, NASA/TM, 2013
- [12] Jeremiah N. Mpagazehe, Kenneth W. Street, Jr., Irebert R. Delgado, C. Fred Higgs III: *An experimental study of lunar dust erosive wear potential using the JSC-1AF lunar dust simulant*, *Wear*, 2014, 316. Jg., Nr. 1, S. 79-91.
- [13] Christian Alexander Bühler: *Experimental Investigation of Lunar Dust Impact Wear*, *Wear*, 2015, 342. Jg., S. 244-251, [doi:10.1016/j.wear.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.09.002)
- [14] Igenbergs E. et al.: *The TUM/LRT Electromagnetic Launches*, *IEEE Transactions on Magnetics*, Mag-22, Vol. 6, pp 1536-1541, 1986
- [15] Heiken, Grant, David Vaniman, and Bevan M. French, eds.: *Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*, CUP Archive, 1991
- [16] Ryan Lauren Kobrick: *Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion for Spacecraft Design and Operations*, Dissertation, University of Colorado, 2010