



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Raumfahrttechnik

Einfluss von lunarem Regolith auf den Verschleiß technischer
Oberflächen und Systeme

Dipl.-Ing. Univ. Christian Alexander Bühler

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. mont. habil. DDr. h.c. Ewald Werner
Prüfer der Dissertation: Prof. Prof. h.c. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Ulrich Walter
Prof. Dr.-Ing. Enrico Stoll (Technische Universität
Braunschweig)

Die Dissertation wurde am 29.10.2019 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 06.04.2020
angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen

Einfluss von lunarem Regolith auf den Verschleiß technischer Oberflächen und Systeme

Dipl.-Ing. Univ. Christian Alexander Bühler
Lehrstuhl für Raumfahrttechnik

Abstract

After almost half a century ago the last man left the moon and the manned missions to the moon were finished for the time being, an increased interest in various missions to our nearest neighbor in the solar system shows up again in the recent past. The moon is a highly interesting field of research not only from a purely scientific point of view. It also offers an ideal test environment for future manned missions to distant celestial bodies to test mission-relevant systems and technologies. As past missions have shown, the ground material covering the lunar surface is critical for such missions, regardless of whether they might be robotic or manned. The lunar regolith can be characterized as a fine-grained, highly abrasive medium. These properties represent a considerable challenge for technical systems and surfaces as well as for humans. The aim of this work is therefore to investigate and characterize experimentally the influence of lunar regolith on the wear of technical surfaces and systems. This work covers wear caused by the impact of regolith particles as well as abrasive wear of technical surfaces and wear of polymer gears by regolith particles.

For the experimental investigations of the impact of regolith particles, which can occur e.g. during lunar landing processes, different technical surfaces were impacted with the lunar analog material JSC-1A. For these investigations the aluminum alloys AlMg3 and Al6061-T6, glass and the two engineering plastics acrylic glass and Makrolon® were used as sample material. The impact experiments were carried out with an eddy current accelerator at the two impact speeds, 200 m/s and 360 m/s at different impact angles with different grain size ranges of the lunar analog material JSC-1A. For the characterization of the occurring wear the change of macroscopic surface properties was used. For all optical materials the change of transmission was measured and for the aluminum samples the change in surface roughness due to the impact. In addition, the impact phenomena on the sample surface were examined for all materials using microscope images. In addition, in some experiments the mass change of the samples was determined by the dust particle impact in order to obtain information on whether erosion processes or deposition processes dominate. The evaluation of the experiments shows a significant degradation of the measured macroscopic surface properties of the samples used, as well as a significant angle dependence of the occurring damage. A further result of the investigations is that with ductile materials, adhesion of the dust

particles is the dominant damaging effect, whereas with the brittle optical material used, material removal dominates.

For the experimental investigations of the abrasive wear of technical surfaces by the lunar analog material JSC-1A, a friction wheel test rig was developed at the Institute of Astronautics. This enables the simultaneous examination of two samples under the same environmental conditions and the use of the test rig under thermal vacuum conditions. For the experiments the sample materials Al6061-T6 and the engineering plastics Makrolon®, POM and PEEK were used. The abrasive wear caused by contact with JSC-1A under various environmental conditions was determined by the mass change of the samples and the calculated wear coefficient. The results of the experimental test series show that a significant wear-induced degradation of the technical surfaces occurs due to the lunar analog material JSC-1A. The calculated wear coefficient for all investigated engineering plastics indicates severe wear. Furthermore, a clear dependence of the occurring abrasive wear on the environmental conditions could be proven for all investigated materials.

For the experimental investigations of the abrasive wear of polymer gear wheels, an already existing gear wheel test rig at the Institute of Astronautics was further developed in order to enable the use of the test rig with JSC 1A. For this purpose, the test rig was equipped with a housing that prevents undesired leakage of the lunar analog material but does not change the other characteristics of the test rig. The experimental investigations were carried out with PEEK and POM spur gears under different environmental conditions. The determination of the occurring wear of the gears was carried out based on the wear coefficient. Under almost all test conditions, there is an increase in the mass of the gears, which is probably due to the embedding of JSC-1A particles in the tooth flanks. Furthermore, a significant dependence of the wear coefficient on the ambient conditions could be found. For the calculation of the wear coefficient, in addition to the mass change, a further calculation method using the tactile measurement of the gears was used. However, it could be shown that the tactile measurement of the gear contour is rather unsuitable for the investigations with JSC-1A and the direct measurement of the mass change should be preferred.

Zusammenfassung

Nachdem vor fast einem halben Jahrhundert der letzte Mensch den Mond betreten hat und damit die bemannten Missionen zum Mond vorerst beendet wurden, zeigt sich in der jüngeren Vergangenheit wieder ein verstärktes Interesse an verschiedensten Missionen zu unserem nächsten Nachbarn im Sonnensystem. Der Mond stellt nicht nur aus rein wissenschaftlicher Sicht ein hoch interessantes Forschungsgebiet dar. Er bietet auch für zukünftige bemannte Missionen zu weiter entfernten Himmelskörpern ein ideales Testumfeld zur Erprobung missionsrelevanter Systeme und Technologien. Wie die Vergangenheit gezeigt hat, dürfte sich als kritisch für solche Missionen, unabhängig davon ob es sich um robotische oder bemannte Missionen handelt, das die Mondoberfläche bedeckende Bodenmaterial erweisen. Das lunare Regolith kann hierbei als ein feinkörniges, hochgradig abrasives Medium charakterisiert werden. Diese Eigenschaften stellen sowohl für technische Systeme und Oberflächen wie für den Menschen eine erhebliche Herausforderung dar. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb den Einfluss von lunarem Regolith auf den Verschleiß technischer Oberflächen und Systeme experimentell zu untersuchen und zu charakterisieren. Hierbei werden der Verschleiß durch den Einschlag von Regolithpartikeln sowie der abrasive Verschleiß von technischen Oberflächen und von Polymerzahnradern durch Regolithpartikel behandelt.

Für die experimentellen Untersuchungen des Einschlags von Regolithpartikeln, der zum Beispiel bei lunaren Landevorgängen auftreten kann, wurden verschiedene technische Oberflächen mit dem Mondanalogmaterial JSC-1A beschossen. Für diese Untersuchungen wurden als Probenmaterial die Aluminiumlegierungen AlMg3 und Al6061-T6, Glas sowie die beiden technischen Kunststoffe Acrylglas und Makrolon® verwendet. Der Beschuss der Proben wurde hierbei mit einem Wirbelstrombeschleuniger bei den beiden Einschlaggeschwindigkeiten 200 m/s und 360 m/s unter unterschiedlichen Einschlagwinkeln mit verschiedenen Korngrößenbereichen des Mondanalogmaterials JSC-1A durchgeführt. Für die Charakterisierung des auftretenden Verschleißes wurde die Änderung makroskopischer Oberflächeneigenschaften verwendet. Bei allen optischen Materialien wurde hierzu die Transmissionsänderung und bei den Aluminiumproben die Rauheitsänderung infolge des Einschlags gemessen. Des Weiteren wurden für alle Materialien die Einschlagserscheinungen auf der Probenoberfläche anhand von Mikroskopaufnahmen untersucht. Zusätzlich dazu wurde in einigen Versuchen die Massenänderung der

Proben durch den Staubpartikeleinschlag bestimmt, um Aufschluss darüber zu erhalten, ob Erosionsprozesse oder Anlagerungsprozesse dominieren. Die Auswertung der Versuche zeigt eine signifikante Degradation der gemessenen makroskopischen Oberflächeneigenschaften der verwendeten Proben sowie eine deutliche Winkelabhängigkeit der auftretenden Schädigungen. 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.

Für die experimentellen Untersuchungen des Abrasivverschleißes von technischen Oberflächen durch das Mondanalogmaterial JSC-1A wurde ein Reibradteststand am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik entwickelt. Dieser ermöglicht die gleichzeitige Untersuchung zweier Proben bei gleichen Umgebungsbedingungen und den Einsatz des Teststandes unter Thermalvakuumbedingungen. Für die durchgeführten Experimente wurden die Probenmaterialien Al6061-T6 sowie die technischen Kunststoffe Makrolon®, POM und PEEK verwendet. Der auftretende abrasive Verschleiß durch den Kontakt mit JSC-1A bei verschiedenen Umgebungsbedingungen wurde anhand der Massenänderung der Proben und dem daraus berechneten Verschleißkoeffizienten bestimmt. Die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen zeigen, dass durch das Mondanalogmaterial JSC-1A eine signifikante verschleißbedingte Degradation der technischen Oberflächen auftritt. Der berechnete Verschleißkoeffizient deutet bei allen untersuchten technischen Kunststoffen auf schweren Verschleiß hin. Des Weiteren konnte bei allen untersuchten Materialien eine deutliche Abhängigkeit des auftretenden Abrasivverschleißes von den Umgebungsbedingungen nachgewiesen werden.

Für die experimentellen Untersuchungen des Abrasivverschleißes von Polymerzahnradern wurde ein am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik existierender Zahnradteststand weiterentwickelt, um den Einsatz des Teststandes mit JSC-1A zu ermöglichen. Der Teststand wurde hierzu mit einem Gehäuse ausgestattet, das ein unerwünschtes Austreten des Mondanalogmaterials verhindert, die sonstigen Charakteristiken des Teststandes wurden aber nicht verändert. Die experimentellen Untersuchungen wurden jeweils mit PEEK- und POM-Stirnrädern bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die Bestimmung des auftretenden Verschleißes der Zahnradern wurde anhand des Verschleißkoeffizienten durchgeführt. Bei nahezu

allen Versuchsbedingungen kommt es zu einer Massenzunahme der Zahnräder, die auf die Einlagerung von JSC-1A-Partikeln in die Zahnflanken zurückzuführen sein dürfte sowie einer signifikanten Abhängigkeit des Verschleißkoeffizienten von den Umgebungsbedingungen. Für die Berechnung des Verschleißkoeffizienten wurde neben der Massenänderung eine weitere Berechnungsmethode über die taktile Messung der Zahnräder verwendet. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die taktile Messung der Zahnradkontur eher ungeeignet für die Untersuchungen mit JSC-1A und die direkte Messung der Massenänderung vorzuziehen ist.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei Herrn Professor Walter dafür bedanken, dass er mir ermöglicht hat meine Dissertation an seinem Lehrstuhl durchzuführen und er mir dabei neben Projektalltag und Lehre immer den nötigen Freiraum eingeräumt hat meine eigenen Ideen und Ziele zu verwirklichen.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Martin Rott für die Möglichkeit seine Versuchsanlagen zu nutzen sowie die Diskussionen und daraus resultierenden Ideen diese für meine Arbeit zu erweitern und der mich auch bei Rückschlägen stets ermutigt hat nicht aufzugeben. Darüber hinaus möchte ich mich dafür bedanken, dass er mir den Anstoß gab meine Ergebnisse auf verschiedensten ARA-Konferenzen zu veröffentlichen. Die damit verbundenen Reisen werden mir immer eine schöne Erinnerung sein.

Dr. Alexander Höhn sage ich Dank, dass er immer ein offenes Ohr für mich hatte und durch seine kritischen Rückfragen es stets verstanden hat, mir zu neuen Denkanstößen zu verhelfen. Tobias Abstreiter und Leonhard Röpfl, unseren beiden Werkstattmeistern, möchte ich für die Unterstützung und die Ratschläge beim Auf- und Umbau der Teststände danken. Zudem bedanke ich mich bei all meinen ehemaligen Kollegen für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei Projekten, Vorlesungsbetrieb sowie insbesondere beim Korrekturmarathon der Prüfungen.

Bei Dr. Markus Brandstätter möchte ich mich für die vielen wertvollen Diskussionen bedanken und dafür, dass er mich in den beiden Jahren in denen ich nicht mehr am Lehrstuhl war, stets ermuntert hat „endlich fertig“ zu werden.

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei Frau Inola Kopic und Frau Kerstin Roder, stellvertretend für all meinen Studenten, für ihre Arbeit, Zeit sowie die unzähligen fachlichen Diskussionen ohne die diese Arbeit so nicht zustande gekommen wäre.

Ein großer Dank gilt meiner Familie und meinen Eltern, die mich nicht nur während meiner Zeit am Lehrstuhl und meiner Promotion stets unterstützt haben, sondern von denen ich auch während meines Studiums immer wusste, dass sie in allen meinen Entscheidungen hinter mir stehen.

Vielen Dank, dass du mich schon so lange begleitest, in allen Höhen und Tiefen bei mir warst und trotz aller Zweifel und Rückschläge immer zu mir gestanden hast. Danke Jasmin.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Umgebungsbedingungen auf dem Mond.....	3
1.2	Aufbau der Arbeit	5
2	Untersuchungen zum Verschleiß durch Einschläge	8
2.1	Der elektromagnetische Beschleuniger	13
2.2	Projekte für die Untersuchungen mit dem elektromagnetischen Wirbelstrombeschleuniger.....	18
2.2.1	Unversehrtheit der Projektile.....	21
2.2.2	Übersicht über die eingesetzten Projektile	28
2.3	Einschläge von sphärischen Vollkörpern	30
2.3.1	Zusammenhänge zwischen Einschlaggrößen und Einschlaggeschwindigkeit.....	30
2.3.2	Vergleich der theoretischen Zusammenhänge mit Experimentaldaten	32
2.3.3	Vergleich der Experimentaldaten mit Literaturwerten.....	40
2.4	Grundlagen für die Verschleißuntersuchungen durch Einschlag von Mondanalogmaterial	57
2.4.1	Grundlagen des Verschleißes durch Projektileinschlag	57
2.4.2	Bestimmung der untersuchten Korngrößen und Geschwindigkeiten	62
2.5	Senkrechte Einschläge bei einer Geschwindigkeit von 200 m/s	64
2.5.1	Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen	65
2.5.2	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	66
2.5.3	Fazit der senkrechten Einschläge bei 200 m/s.....	76
2.6	Einschläge bei 200 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln.....	76
2.6.1	Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen	77
2.6.2	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	78
2.6.3	Fazit der Einschläge bei 200 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln	89
2.7	Senkrechte Einschläge bei einer Geschwindigkeit von 360 m/s	90
2.7.1	Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen	90
2.7.2	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	91
2.7.3	Fazit der Einschlaguntersuchungen bei 360 m/s.....	100
2.8	Einschläge bei 360 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln.....	101
2.8.1	Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen	101
2.8.2	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	103
2.8.3	Fazit der Einschläge bei 360 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln	115

2.9	Vergleich der Einschlaguntersuchungen.....	116
2.9.1	Vergleich von Aluminiumproben	117
2.9.2	Vergleich von Glasproben.....	118
2.9.3	Vergleich von Makrolon®-Proben.....	119
2.10	Zusammenfassung und Ausblick	120
2.10.1	Zusammenfassung	120
2.10.2	Ausblick.....	122
3	Abrasiver Verschleiß von technischen Oberflächen	126
3.1	Grundlagen zum Abrasivverschleiß	127
3.2	Der Reibradtteststand.....	133
3.3	Abrasivverschleiß verschiedener technischer Oberflächen.....	137
3.3.1	Verwendete Materialien und gemessene Verschleißgrößen	137
3.3.2	Vorversuche mit POM-Reibrädern.....	138
3.3.3	Verwendung von Glasperlen als Abrasivmaterial	139
3.3.4	Ergebnisse der Hauptuntersuchungen und Diskussion.....	143
3.4	Zusammenfassung und Ausblick	150
4	Verschleißverhalten von Polymerzahnradern	153
4.1	Grundlagen zum abrasiven Verschleiß von Zahnradern.....	153
4.2	Der Zahnradteststand.....	159
4.3	Abrasivverschleiß von Polymerzahnradern durch Mondanalogmaterial....	161
4.3.1	Verwendete Materialien und gemessene Verschleißgrößen	161
4.3.2	Ergebnisse der Untersuchungen und Diskussion.....	162
4.4	Zusammenfassung und Ausblick	170
5	Abschließende Zusammenfassung	172
6	Literaturverzeichnis	175

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau der Arbeit.....	7
Abb. 2: Der elektromagnetische Beschleuniger des Lehrstuhls für Raumfahrttechnik	13
Abb. 3: Vereinfachte schematische Darstellung des elektromagnetischen Wirbelstrombeschleunigers mit Änderungen nach [22]	14
Abb. 4: Leistungsspektrum des elektromagnetischen Beschleunigers (Vergleich alte und neue Konfiguration bei der Verwendung des 10 μ F Kondensators)	17
Abb. 5: Beispielhafte Darstellung der Messung der beiden Einschlagereignisse mit dem Oszilloskop (links: Kollision des Sabots mit der Stopperplatte, rechts: Einschlag des Projektils auf dem Target)	18
Abb. 6: Mikroskopaufnahmen des Mondstaubsimulats JSC-1A	19
Abb. 7: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einer 500 μ m Glaskugel bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 150 m/s	21
Abb. 8: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Quarzsandpartikels mit einer Korngröße zwischen 450 μ m und 500 μ m bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 170 m/s.21	
Abb. 9: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße zwischen 450 μ m und 560 μ m bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 170 m/s.22	
Abb. 10: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße zwischen 450 μ m und 560 μ m bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 200 m/s.23	
Abb. 11: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße zwischen 1,0 mm und 1,5 mm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 170 m/s.24	
Abb. 12: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines JSC-1A-Partikels mit einer Korngröße von ungefähr 1,6 mm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 195 m/s	25
Abb. 13: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Tongranulatpartikeln (Catsan®) mit einer Korngröße zwischen 450 μ m und 560 μ m bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 165 m/s	26
Abb. 14: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Tongranulatpartikels (Catsan®) mit einer Korngröße zwischen 450 μ m und 560 μ m bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 200 m/s	26
Abb. 15: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Zeolithpartikels mit einem Durchmesser von ungefähr 2 mm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 150 m/s	27
Abb. 16: Definition der geometrischen Größen des Projektils	31
Abb. 17: Erläuterungen zur Messung der Eindringtiefe und des Einschlagdurchmessers 34	
Abb. 18: Eindringtiefe und Einschlagdurchmesser für sphärische Stahl- und Glasprojekte unterschiedlicher Größe und Geschwindigkeit (Al6061-T6-Proben).....	36
Abb. 19: Eindringtiefe und Einschlagdurchmesser für sphärische Stahl- und Glasprojekte unterschiedlicher Größe und Geschwindigkeit (Al7075-T6-Proben).....	37
Abb. 20: Unterschied zwischen gemessenem Einschlagdurchmesser $D_{\text{Einschlag}}$ und basierend auf der gemessenen Eindringtiefe T theoretisch berechnetem Einschlagdurchmesser $D_{\text{berechnet}}$	39
Abb. 21: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Hutchings [27] berechneten Werten	42
Abb. 22: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Sheldon et al. [31] berechneten Werten	46

Abb. 23: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Sundararajan [30] berechneten Werten	47
Abb. 24: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Goldsmith [32] berechneten Werten	49
Abb. 25: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Goldsmith [32] berechneten Werten (nicht vereinfachter geometrischer Zusammenhang)	50
Abb. 26: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Ben-Ami et al. [33] berechneten Werten	52
Abb. 27: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Ben-Ami et al. [33] berechneten Werten (nicht vereinfachter geometrischer Zusammenhang)	53
Abb. 28: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Huang et al. [34] berechneten Werten	55
Abb. 29: Kinetische Energie lunarer Regolithpartikel, basierend auf den Simulationen von Lane et al. [17].....	63
Abb. 30: Mikroskopaufnahmen der Proben nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln (von links nach rechts: Al6061-T6, Makrolon®, Glas)	67
Abb. 31: Änderung der Oberflächenrauheit von Al6061-T6-Proben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s	70
Abb. 32: Änderung der Transmission von Glasproben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s	72
Abb. 33: Änderung der Transmission von Makrolon®-Proben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s	75
Abb. 34: Definition des Einschlagwinkels	79
Abb. 35: Mikroskopaufnahmen der Al6061-T6 Proben für unterschiedliche Einschlagwinkel (0°, 15°, 45°, 75°; von links nach rechts) nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln	79
Abb. 36: Vergleich der Änderung der Oberflächenrauheit der Al6061-T6-Proben aufgrund des Beschusses mit JSC-1A-Partikel für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge).....	82
Abb. 37: Mikroskopaufnahmen der Glasproben für unterschiedliche Einschlagwinkel (0°, 15°, 45°, 75°; von links nach rechts) nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln.	83
Abb. 38: Verbleibende Transmission der Glasproben nach dem Einschlag von JSC-1A- Partikeln für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge).....	85
Abb. 39: Mikroskopaufnahmen der Makrolon®-Proben für unterschiedliche Einschlagwinkel (0°, 15°, 45°, 75°; von links nach rechts) nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln	86
Abb. 40: Verbleibende Transmission der Makrolon®-Proben nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge)	88
Abb. 41: Änderung der Oberflächenrauheit von Aluminiumproben.....	92
Abb. 42: Änderung der Oberflächenrauheit durch wiederholten Beschuss.....	93
Abb. 43: Transmission (links) und relativer Verlust von Transmission (rechts) für Glasproben.....	94
Abb. 44: Transmission (links) und relativer Verlust von Transmission (rechts) für Acrylglasproben.....	97

Abb. 45: Transmission (links) und relativer Verlust von Transmission (rechts) für Makrolon®-Proben	98
Abb. 46: Mikroskopaufnahmen von Einschlägen auf Glas- (links), Acrylglas- (Mitte) und Makrolon®-Proben (rechts)	99
Abb. 47: Vergleich der absoluten mittleren Abnahme der Transmission zwischen 400 nm und 800 nm	100
Abb. 48: Mikroskopaufnahmen von Aluminiumproben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal, 15°, 30°, 45° 60°, 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A.....	103
Abb. 49: Massenänderung von Aluminiumproben nach Beschuss (0° = normal, 75° = streifend).....	104
Abb. 50: Veränderung der Oberflächenrauheit von Aluminium nach dem Beschuss mit JSC-1A (0° = normal, 75° = streifend).....	106
Abb. 51: Mikroskopaufnahmen von Glasproben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal, 15°, 30°, 45° 60°, 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A.....	107
Abb. 52: Massenänderung von Glasproben nach Beschuss mit JSC-1A (0° = normal, 75° = streifend).....	108
Abb. 53: Wellenlängenabhängige Transmission der Glasproben für verschiedene Beschusswinkel.....	110
Abb. 54: Mikroskopaufnahmen von Makrolon®-Proben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A.....	111
Abb. 55: Massenänderung von Makrolon®-Proben nach Beschuss (0° = normal, 75° = streifend).....	112
Abb. 56: Wellenlängenabhängige Transmission der Makrolon®-Proben für verschiedene Beschusswinkel.....	114
Abb. 57: Vergleich der Aluminiumproben für unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel	117
Abb. 58: Vergleich der Glasproben für unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel.....	118
Abb. 59: Vergleich der Makrolon®-Proben für unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel	120
Abb. 60: CAD-Modell des Reibradteststandes	133
Abb. 61: Der Reibradteststand mit Aluminium-Reibrädern	134
Abb. 62: Seitenansicht einer Probenkammer mit Abrasivmaterial gefüllt (ohne Deckel). 135	
Abb. 63: Massenänderung verschiedener Probenmaterialien bei der Verwendung von POM-Reibrädern (Abrasivmaterial: JSC-1A).....	139
Abb. 64: Massenänderung verschiedener Materialien durch Glasperlen unterschiedlicher Größe	140
Abb. 65: Mikroskopaufnahmen (oben) und EDX Auswertung (unten) von AlMg3-Proben (Abrasivmaterial: Glasperlen)	142
Abb. 66: Mikroskopaufnahmen des Probenquerschnitts von AlMg3-Proben (Abrasivmaterial: Glasperlen)	143

Abb. 67: Massenänderung verschiedener Materialien durch Quarzsand unterschiedlicher Korngröße	144
Abb. 68: Massenänderung verschiedener Kunststoffe durch Quarzsand und JSC-1A ...	145
Abb. 69: Massenänderung verschiedener Materialien durch Quarzsand und JSC-1A....	146
Abb. 70: Massenänderung verschiedener Materialien durch JSC-1A bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen.....	148
Abb. 71: Verschleißkoeffizient verschiedener Materialien für JSC-1A bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen.....	150
Abb. 72: Der Zahnradteststand mit Gehäuse	159
Abb. 73: CAD-Darstellung des Zahnradteststandes (neue Gehäuseteile farbig dargestellt) mit Änderungen nach [85].....	160
Abb. 74: Verschleißkoeffizient von POM-Zahnradern nach 100.000 Umdrehungen bei Laborbedingungen.....	163
Abb. 75: Verschleißkoeffizient von POM-Zahnradern nach 250.000 Umdrehungen bei Laborbedingungen.....	165
Abb. 76: Verschleißkoeffizient von POM-Zahnradern nach 300.000 Umdrehungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen.....	166
Abb. 77: POM-Zahnradern nach 300.000 Umdrehungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (von links nach rechts: Laborbedingungen, +50°C Vakuum, -55°C Vakuum), entnommen aus Roder [85]	167
Abb. 78: Verschleißkoeffizient von PEEK-Zahnradern nach 300.000 Umdrehungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen.....	168
Abb. 79: PEEK-Zahnradern nach 300.000 Umdrehungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (von links nach rechts: Laborbedingungen, +50°C Vakuum, -55°C Vakuum), entnommen aus Roder [85]	169

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über bereits durchgeführte experimentelle Arbeiten anderer Autoren...	12
Tab. 2: Verwendete Projektilmaterialien, Einsatzgebiet und Limitierungen.....	29
Tab. 3: Für die Einzeleinschläge verwendete Materialien [28], [29].....	33
Tab. 4: Vergleich der verwendeten Variablen in den vorgestellten Gleichungen für die Einschlaggrößen T und D_{imp}	57
Tab. 5: Untersuchte Oberflächenmaterialien und gemessene Verschleißgrößen	66
Tab. 6: Untersuchte Materialien und gemessene Größen	78
Tab. 7: Untersuchte Materialien und gemessene Verschleißgrößen	91
Tab. 8: Probenmaterialien und gemessene Verschleißgrößen	103
Tab. 9: Versuchsparameter des Reibradteststandes	136
Tab. 10: Verwendete Abrasivmedien und Größenbereich	138
Tab. 11: Übersicht der verwendeten Variablen	156
Tab. 12: Parameter der verwendeten Stirnräder	161

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Symbol	Einheit [SI]	Erklärung
R	m	Radius
T	m	Eindringtiefe
R_{Kal}	m	Radius der Kugelkalotte
D	m	Durchmesser
D_{Imp}	m	Einschlagdurchmesser
v	m/s	Geschwindigkeit
$V_{Kalotte}$	m^3	Volumen
E_{kin}	J	Kinetische Energie
ρ	kg/m^3	Dichte
P	N/m^2	dynamische Härte des Targetmaterials (Hutchings [27])
a	m	Radius des Einschlagkraters (Hutchings [27])
r	m	Projektilradius (Hutchings [27])
ρ	kg/m^3	Dichte des Targetmaterials (Hutchings [27])
q	m	Eindringtiefe (Sheldon et al. [31])
D	m	Projektildurchmesser (Sheldon et al. [31])
ρ_P	kg/m^3	Dichte des Projektils (Sheldon et al. [31])
H_v	N/m^2	Vickershärte des Targetmaterials Sheldon et al. [31])
H	N/m^2	Härte des Targetmaterials (Sundararajan [30])
U	m^3	Volumen des Einschlagkraters (Sundararajan [30])
r	m	Projektilradius (Sundararajan [30])
ρ_P	kg/m^3	Dichte des Projektils (Sundararajan [30])
W	m	Einschlagdurchmesser (Sundararajan [30])
X_{max}	m	Maximale Eindringtiefe (Goldsmith [32])
v_0	m/s	Einschlaggeschwindigkeit (Goldsmith [32])
m	kg	Projektilmasse (Goldsmith [32])
R	m	Projektilradius (Goldsmith [32])
p_m	N/m^2	mittlerer Druck infolge des Einschlags (Goldsmith [32])
y_{max}	m	maximale Eindringtiefe (Ben-Ami et al. [33])

m_p	kg	Projektilmasse (Ben-Ami et al. [33])
d_{eff}	m	effektiver Projektildurchmesser (Ben-Ami et al. [33])
H	N/m ²	Vickershärte des Targetmaterials (Ben-Ami et al. [33])
U_{y0}	m/s	Einschlaggeschwindigkeit (Ben-Ami et al. [33])
y_{max}	m	maximale Eindringtiefe (Huang et al. [34])
m	kg	Projektilmasse (Huang et al. [34])
V_{y0}	m/s	Einschlaggeschwindigkeit (Huang et al. [34])
d_p	m	Projektildurchmesser (Huang et al. [34])
P_n	N/m ²	konstanter Gegendruck infolge des Eindringens (Huang et al. [34])
D_{max}	m	maximaler Kraterdurchmesser (Huang et al. [34])
R_a	m	Rauheitswert
k_w	m ² /N	Verschleißkoeffizient
m_w	kg	Massenabnahme
M_T	Nm	Drehmoment
N_L	-	Anzahl der Umdrehungen
H_v	-	Zahnverlustfaktor
$Z_{1/2}$	-	Zähnezahl Ritzel bzw. Rad
β	rad	Schrägungswinkel
ε_α	-	Profilüberdeckung
$\varepsilon_{\alpha 1}$	-	Profilüberdeckung Ritzel
$\varepsilon_{\alpha 2}$	-	Profilüberdeckung Rad
d_{a1}	m	Kopfkreisdurchmesser Ritzel
d_{b1}	m	Grundkreisdurchmesser Ritzel
d_{a2}	m	Kopfkreisdurchmesser Rad
d_{b2}	m	Grundkreisdurchmesser Rad
a	m	Achsabstand
α_w	rad	Betriebseingriffswinkel
p_e	m	Eingriffsteilung
m	m	Modul
α	rad	Eingriffswinkel
a_d	m	Nullachsabstand
d_{w1}	m	Wälzkreisdurchmesser Ritzel

d_{w2}	m	Wälzkreisdurchmesser Rad
A_{t1}	m^2	Zahnfläche vor dem Versuch
A_{t2}	m^2	Zahnfläche nach dem Versuch
b	m	Zahnbreite

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSADM	Bi-Axial Solar Array Drive Mechanism
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DEER	Dust Erosion Experimental Rig
DSMC	Direct Simulation Monte Carlo
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ISO	Internationale Organisation für Normung
JSC-1A	Johnson Space Center Number One (Mondanalogmaterial)
JSC-1AF	Johnson Space Center Number One (Mondanalogmaterial fein)
K.A.	Keine Angabe
MER	Mars Exploration Rover
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NU-LHT-2M	NASA/USGS-Lunar Highlands Type (Mondanalogmaterial)
PEEK	Polyetheretherketon
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
SSTL	Surrey Satellite Technology Ltd's
Tab.	Tabelle
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WAE	Wheel Abrasion Experiment
XAA	X-BAND ANTENNA ASSEMBLY
3D	Dreidimensional

1 Einleitung

Nicht nur für eine Vielzahl wissenschaftlicher Fragestellungen, welche die Entstehung des Sonnensystems oder unseres Heimatplaneten betreffen, ist der Mond ein ideales Forschungsgebiet, er bietet durch seine in astronomischen Größenordnungen sehr geringe Entfernung zur Erde eine ideale Testplattform für die Erprobung zukünftiger missionskritischer Technologien und Systeme. Nicht nur im Hinblick auf rein robotische Missionen, sondern insbesondere auch für bemannte Missionen stellt die im Vergleich kurze Reisezeit zum Mond und seine gebundene Rotation einen unter sicherheitstechnischen Aspekten nicht zu unterschätzenden Vorteil gegenüber anderen Planeten oder Himmelskörpern dar. Bei einem möglicherweise auftretenden Störfall oder gesundheitlichen Problemen besteht die Möglichkeit die davon betroffenen Astronauten innerhalb weniger Tage sicher zur Erde zurückzubringen. Dies gilt ebenso für Missionen auf der Mondoberfläche wie auch bereits für den Flug zum Mond. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die sichere Heimkehr der Apollo 13 Astronauten nach einem Störfall während des Hinfluges zum Mond. Die bereits eingangs erwähnte Nähe des Mondes begünstigt zudem die Kommunikation während einer laufenden Mission, da keine großen Latenzzeiten wie zum Beispiel bei Missionen auf dem Mars oder noch weiter entfernten Himmelskörpern auftreten. Trotz dieser vergleichsweise günstigen Bedingungen liegt die letzte bemannte Mission zum Mond mehr als 45 Jahre zurück. In der näheren Vergangenheit fand mit der chinesischen Change'e 3 Mission und dem dabei eingesetzten Mondrover Yutu [1] lediglich eine einzige erfolgreiche robotische Rovermission zur Mondoberfläche statt (Stand: Juli 2019). Allerdings ist in den letzten Jahren ein zunehmendes internationales Interesse an weiteren Missionen zur Oberfläche des Mondes zu verzeichnen [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Für eine zukünftige Rückkehr zur Mondoberfläche bedürfen insbesondere die durch das den Mond bedeckende Regolith hervorgerufenen Umgebungsbedingungen eines speziellen Augenmerks. Ein Zitat des Apollo 17 Astronauten Gene Cernan bekräftigt diese Aussage und stellt die durch den Mondstaub hervorgerufene Problematik als entscheidend für zukünftige Missionen dar:

"I think dust is probably one of our greatest inhibitors to a nominal operation on the Moon. I think we can overcome other physiological or physical or mechanical problems except dust." [Apollo 17 Astronaut, Gene Cernan]

Unser Mond ist mit einer Schicht aus feinkörnigem Staub, oder genereller gefasst, Regolith bedeckt. Dieses Oberflächenmaterial unterscheidet sich deutlich von terrestrischem Bodenmaterial. Da der Mond keine nennenswerte Atmosphäre besitzt, finden keine erosiven Verwitterungsprozesse durch Wind oder Wasser statt. Die Mondoberfläche ist einem kontinuierlichen Bombardement zum Beispiel durch Mikrometeoriten ausgesetzt. Durch das Fehlen der erosiven Prozesse bleiben die so entstandenen scharfen Bruchkanten der Partikel erhalten, wodurch ein stark abrasives Medium entsteht. Dadurch bedingt zeichnet sich lunares Regolith durch einen größeren Schüttwinkel sowie eine höhere Kohäsion im Vergleich zu irdischem Sand aus [7]. Die auf den Mond auftreffende Strahlung und die damit verbundene elektrische Aufladung der Mondstaubpartikel führt zu einer verstärkten Adhäsion [8]. Diese Eigenschaften des Mondstaubes stellen insbesondere für den Betrieb von technischen Systemen auf der Mondoberfläche und für Astronauten eine nicht unerhebliche Herausforderung dar. Diese Aussage lässt sich anhand der Erfahrungen aus den Apollo-Missionen bestätigen. Gaier et al. [9] fassen die durch lunaren Staub entstandenen Probleme während der Apollo-Missionen in insgesamt 9 Kategorien zusammen: thermale Probleme, Ablagerung von Staub und Kontamination, Dichtungsprobleme, medizinische Probleme zum Beispiel durch Inhalation von Staub, Verlust der Traktion, Verstopfen von Mechanismen, Instrumentenfehler und Probleme beim Ablesen von Instrumenten, Sichtbeeinträchtigungen zum Beispiel während Landevorgängen durch den aufgewirbelten Staub und Abrasivverschleiß. Wobei nach Gaier et al. [9] einige der gravierendsten Probleme im Zusammenhang mit abrasivem Verschleiß zu verzeichnen waren. Eine von Gaier et al. [9] nicht explizit beschriebene Problematik, die allerdings den gleichen Ursprung wie die beschriebenen Sichtbeeinträchtigungen während verschiedener Landevorgänge hat, entsteht durch den Einschlag von während der Landung aufgewirbeltem Bodenmaterial auf anderen Objekten. Ein Entstehen dieser Problematik ist prinzipiell auch für Landungen auf anderen Himmelskörpern mit nennenswerter Gravitation, vernachlässigbarer Atmosphäre und lockerem Bodenmaterial denkbar, da auch hier aller Wahrscheinlichkeit nach retrograde Raketentriebwerke zur Abbremsung eines Landers eingesetzt werden. Die Gefährdung, die aufgrund der durch den Abgasstrahl aufgewirbelten Staubpartikel für andere zuvor gelandete Systeme entsteht, kann am Beispiel der Apollo 12 Landung gezeigt werden. Teile der zuvor gelandeten Surveyor 3 Sonde wurden eines NASA-Berichts [10] zufolge durch den in der näheren Umgebung aufsetzenden Apollo 12 Lander regelrecht sandgestrahlt.

Basierend auf der Erkenntnis, dass abrasiver Verschleiß in der Vergangenheit mit die größten Probleme während Oberflächenmissionen auf dem Mond hervorgerufen hat [9], und den beschriebenen Problemen, die im Zusammenhang mit Landevorgängen auftreten können, soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zum besseren Verständnis der Auswirkungen von Verschleiß, sowohl abrasiver Natur wie auch aufgrund von Staubpartikeleinschlägen, hervorgerufen durch lunares Oberflächenmaterial beziehungsweise lunaren Staub, leisten. In dieser Arbeit sollen daher die folgenden Fragestellungen behandelt werden:

- Welche Auswirkung haben durch Landevorgänge hervorgerufene Partikeleinschläge auf ausgewählte technische Oberflächen?
- Welche Auswirkung hat abrasiver Verschleiß durch lunares Bodenmaterial auf ausgewählte technische Oberflächen?
- Welche Auswirkung hat Verschleiß durch lunares Bodenmaterial auf ausgewählte technische Systeme, wie Polymerzahnräder?

Eine genauere Betrachtung der einzelnen Fragestellungen, insbesondere die Behandlung von bereits durchgeführten Untersuchungen anderer Autoren zu diesen Themen, findet in den jeweiligen Kapiteln gesondert statt.

1.1 Umgebungsbedingungen auf dem Mond

In diesem Abschnitt sollen einige spezielle für die Durchführung der Untersuchungen relevante Umgebungsbedingungen, wie sie auf dem Mond vorherrschen, kurz beleuchtet werden. Dabei soll einerseits die Motivation dargelegt werden diese in Experimenten darzustellen, andererseits soll insbesondere herausgestellt werden, inwieweit es möglich war diese in den im Folgenden beschriebenen Experimenten tatsächlich abzubilden und wo mögliche Limitierungen bestehen.

Die Atmosphäre des Mondes kann als Ultrahochvakuum beschrieben werden. Im Vergleich zur Erde liegt die Konzentration der Moleküle pro Kubikzentimeter, welche hauptsächlich aus Wasserstoff und Edelgasen bestehen, mit $10^4 - 2 \cdot 10^5$ Molekülen/cm³ teilweise bis zu 15 Größenordnungen unter der Konzentration, die auf der Erde vorherrscht [11]. Zum Vergleich: nach [11] wurde durch die bemannten Apollo-Landungen ungefähr die 6-fache

Menge der auf dem Mond vorhandenen Atmosphäre freigesetzt. Um die Auswirkungen der Vakuumumgebung und deren Effekte zu charakterisieren, wurden verschiedene Experimente in einer Thermalvakuumkammer durchgeführt (siehe Kapitel 3 und Kapitel 4). Hierbei ist allerdings zu vermerken, dass diese Versuche nur unter Vakuum stattfanden. Dabei konnte der speziellen Zusammensetzung der Restatmosphäre des Mondes im Hinblick auf vorhandene Moleküle nicht Rechnung getragen werden. Über das Fehlen einer nennenswerten Atmosphäre hinaus verfügt der Mond zum heutigen Zeitpunkt über kein eigenes Magnetfeld [11]. Somit treffen die drei hauptsächlich in der Mondumgebung vorkommenden ionisierenden Strahlungsarten Sonnenwind, durch Solar Flares entstehende Strahlung und galaktische kosmische Strahlung ungehindert auf die Mondoberfläche [11]. Die Energiemenge der einfallenden Teilchen reicht hierbei von wenigen Elektronenvolt bis in den Gigaelektronenvoltbereich [11].

In der vorliegenden Arbeit wurden im Zusammenhang mit Strahlung auftretende Effekte nicht behandelt. Zum einen stand dem Autor kein dafür geeigneter Aufbau zur Verfügung zum anderen wurden einige der Experimente im Rahmen von Studienarbeiten durchgeführt, weshalb aus Sicherheitsgründen explizit auf Strahlungsquellen verzichtet wurde. Zusätzlich stellt die Mondoberfläche auch aus thermaler Sicht eine technisch anspruchsvolle Umgebung dar. Beispielsweise reichen die sich durch Tag und Nacht ergebenden Unterschiede der mittleren Oberflächentemperatur des Mondes von -153°C bis 107°C . Dies liegt bereits außerhalb der Extremwerte irdischer Temperaturen [11]. Um die Effekte stark variierender Temperaturen zumindest teilweise abzudecken, wurden verschiedene Experimente ebenfalls in der am Lehrstuhl vorhandenen Thermalvakuumkammer durchgeführt. Hierbei ist zu erwähnen, dass der untersuchte Temperaturbereich aufgrund der Randbedingungen hinsichtlich Thermalvakuumkammer und verwendeter Teststände nicht den gesamten auf dem Mond vorherrschenden Temperaturbereich abdecken konnte (siehe Kapitel 3 und Kapitel 4). Des Weiteren wurden große Temperaturgradienten, wie sie zum Beispiel durch Schlagschatten auf dem Mond entstehen können, nicht behandelt, da die Thermalvakuumkammer die Temperatur einheitlich für den gesamten Versuchsraum reguliert.

Im Vergleich zur Erde besitzt der Mond mit $1,62 \text{ m/s}^2$ am Äquator nur ungefähr ein Sechstel der Erdgravitation [11]. Die Einflüsse reduzierter Schwerkraft auf die Experimente wurden in dieser Arbeit explizit nicht behandelt. Nach Wissen des Autors besteht nur bei der Durchführung von Parabelflügen eine „einfach“ zugängliche Möglichkeit die Bedingungen

reduzierter Schwerkraft gezielt über einen längeren Zeitraum auf der Erde darzustellen. Während der Entstehung der Arbeit war es dem Autor nicht möglich Zugang zu einer solchen Testumgebung zu bekommen. Ferner ist davon auszugehen, dass die für die Experimente notwendige Peripherie (z.B. Thermalvakuumkammer oder Beschleuniger) eine erhebliche Einschränkung für die Verwendung auf Parabelflügen darstellt.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Mondoberfläche mit einer Schicht aus Regolith bedeckt. Von diesem Oberflächenmaterial wurden insgesamt nur einige hundert Kilogramm an Probenmaterial durch amerikanische und sowjetische Missionen zur Erde zurückgebracht [11]. Aus diesem Grund war es dem Autor nicht möglich Originalproben für die durchgeführten Versuche zu verwenden. Da das Kernthema der Arbeit die Auswirkung gerade dieses Oberflächenmaterials auf technische Oberflächen und Systeme ist, wurde deshalb das gängige Mondanalogmaterial JSC-1A für die jeweiligen Experimente verwendet. Eine Beschreibung des eingesetzten Analogmaterials findet in Kapitel 2 statt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit gliedert sich in zwei Hauptthemengebiete Verschleiß durch Einschläge von Mondanalogmaterial und abrasiver Verschleiß durch Mondanalogmaterial. An dieses Kapitel schließen sich die Untersuchungen zum Verschleiß durch Einschläge an. Darin wird zuerst eine kurze Begründung für die Durchführung der Versuche gegeben. Alsdann wird der für die gesamten Einschlagversuche verwendete Testaufbau beschrieben. Daran schließt sich die Auswahl der verwendeten Projektile hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit zusammen mit dem Teststand und den jeweiligen Anwendungsgebieten an. Hierbei wird auch auf die Besonderheiten des für die Einschlagversuche verwendeten Mondanalogmaterials näher eingegangen. Danach wird eine theoretische Herleitung der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einschlaggrößen für den Einschlag von Einzelprojektilen präsentiert. Diese Zusammenhänge werden durch experimentell gesammelte Daten abgesichert und die Ergebnisse mit Literaturdaten verglichen. Daran schließt sich eine allgemeine Betrachtung der Auswirkungen erosiver Vorgänge auf duktile und spröde Oberflächen an. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Einschlaguntersuchungen von Mondanalogmaterial auf ausgewählte duktile und spröde technische Oberflächen präsentiert. Bei den Versuchsreihen wurden die Ergebnisse jeweils für verschiedene Einschlaggeschwindigkeiten sowie senkrechte Einschläge und Einschläge unter weiteren

davon abweichenden Einschlagwinkeln getrennt betrachtet. Im Anschluss werden die vorgestellten Ergebnisse, nach Probenmaterial getrennt, miteinander verglichen. Der Themenblock schließt mit einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere mögliche Forschungsthemen in diesem Bereich.

Der Themenblock abrasiver Verschleiß gliedert sich in die zwei Themengebiete abrasiver Verschleiß von technischen Oberflächen und Verschleiß von Kunststoffzahnradern. In beiden Themengebieten wird derselbe inhaltliche Aufbau verwendet. Die Themengebiete beginnen jeweils mit einer kurzen Begründung für die Durchführung der Untersuchungen sowie mit einer Einführung in die theoretischen Grundlagen. Daran schließt sich die Beschreibung des jeweils verwendeten Versuchsaufbaus an. Im Hauptteil der jeweiligen Kapitel werden die Durchführung und die daraus resultierenden Ergebnisse der Untersuchungen behandelt. Die gesamte Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse und einem Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen. In Abb. 1 ist ein Überblick über den Aufbau der Arbeit dargestellt.

Kapitel 1: Einleitung <ul style="list-style-type: none">• Motivation• Grundlagen zu Umgebungsbedingungen auf dem Mond• Aufbau der Arbeit
Kapitel 2: Verschleiß durch Einschläge <ul style="list-style-type: none">• Begründung der Untersuchungen• Beschreibung des Testaufbaus• Auswahl der verwendeten Projektile• Untersuchungen zu Einzeleinschlägen• Untersuchungen zum Verschleiß durch einschlagendes Mondanalogmaterial<ul style="list-style-type: none">– Untersuchung verschiedener Einschlaggeschwindigkeiten– Untersuchung verschiedener Einschlagwinkel
Kapitel 3: Abrasiver Verschleiß von technischen Oberflächen <ul style="list-style-type: none">• Begründung der Untersuchungen• Theoretische Grundlagen• Beschreibung des Testaufbaus• Experimentelle Untersuchungen des abrasiven Verschleißes technischer Oberflächen durch Mondanalogmaterial
Kapitel 4: Verschleiß von Kunststoffzahnradern <ul style="list-style-type: none">• Begründung der Untersuchungen• Theoretische Grundlagen• Beschreibung des Testaufbaus• Experimentelle Untersuchungen des Verschleißes von Kunststoffzahnradern durch Mondanalogmaterial
Kapitel 5: Zusammenfassung und Ausblick

Abb. 1: Aufbau der Arbeit

2 Untersuchungen zum Verschleiß durch Einschläge¹

In diesem Abschnitt sollen die Auswirkungen der Einschläge von Mondstaubanalogmaterial auf technische Oberflächen behandelt werden. Hierzu erfolgt zuerst eine Begründung für die Relevanz dieser Untersuchungen. Daran schließt sich ein Überblick über bereits zu diesem Themengebiet durchgeführte Untersuchungen anderer Autoren an. Im Folgenden werden, der für die experimentellen Untersuchungen verwendete Testaufbau beschrieben, das verwendete Analogmaterial charakterisiert und die sich bei der Verwendung des Testaufbaus ergebenden Limitierungen beleuchtet. Anschließend werden theoretische Abhängigkeiten aus der Energieerhaltung für Einzeleinschläge hergeleitet und die dabei vorgestellten Abhängigkeiten der Einschlaggrößen mit Experimentaldaten abgesichert sowie mit Daten aus der Literatur verglichen. Darauf aufbauend werden die Grundlagen erosiven Verschleißes behandelt. Der zentrale Teil behandelt die aus dem Beschuss mit Mondanalogmaterial resultierenden Auswirkungen auf technische Oberflächen für unterschiedliche Projektilgrößen, Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel.

Bei zukünftigen Missionen zum Mond, welche einen längeren Aufenthalt auf der Mondoberfläche beinhalten, kann, unabhängig davon ob es sich dabei um rein robotische oder bemannte Missionen handelt, davon ausgegangen werden, dass diese Missionen mehrfache Start- und Landeoperationen benötigen, zum Beispiel für Versorgungsflüge oder Probenrückführung. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass diese Start- und Landeoperationen aus logistischen Gründen in der Nähe bereits zuvor gelandeter Systeme stattfinden werden. Insbesondere bei längeren bemannten Missionen dürften regelmäßige Versorgungsflüge mit Landungen in der Nähe einer existierenden Forschungsstation stattfinden, um die Wege zum Be- und Entladen der Versorgungslander für die Astronauten zu minimieren und somit wertvolle Crewzeit zu sparen. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden die eingesetzten Lander Raketentriebwerke verwenden, um ein vergleichsweise sanftes Aufsetzen auf der Mondoberfläche zu gewährleisten. Alternativkonzepte, wie der auf dem Mars eingesetzte SkyCrane [12], dürften insbesondere bei Versorgungsflügen für bemannte Missionen und beim Crewtransport aufgrund des hohen Gewichtes der dazu verwendeten Lander nach heutigem Stand technisch nur sehr schwer umzusetzen sein. Bei

¹ Dieses Kapitel ist eine erweiterte und aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikationen [86], [87], [88] und [89]. In den jeweiligen Unterkapiteln werden die zugehörigen Veröffentlichungen noch einmal genauer spezifiziert. Signifikante inhaltliche Ergänzungen, die über die bereits veröffentlichten Texte hinausgehen, sind in der Arbeit als solche kenntlich gemacht.

der Annäherung an die Mondoberfläche wird es ab einem bestimmten Abstand zur Oberfläche zu einer Interaktion zwischen den verwendeten retrograden Raketentriebwerken mit der Oberfläche kommen. Hierdurch kann es zu einer Aufwirbelung von Mondstaub und gegebenenfalls auch von größeren Gesteinsfragmenten des Bodenmaterials kommen. Die so beschleunigten Partikel sind in der Lage in der Nähe der Landestelle befindliche Systeme zu beschädigen. Diese Problematik der Jet-Erosion während Landevorgängen wurde bereits vor den ersten Apollo-Landungen untersucht [13]. Auch die Verwendung von schützenden Bodenstrukturen wie Wälle oder Dämme dürfte nach [14] keine Abhilfe schaffen, da sie ebenfalls durch den Partikeleinschlag degradieren. Ein historisches Beispiel für die Gefahr, die von während der Landung aufgewirbelten Mondstaubpartikeln ausgehen kann, zeigt die 1969 durchgeführte Apollo 12 Mission. Der Apollo 12 Lander setzte ungefähr 155 Meter [15] entfernt von der zuvor gelandeten Surveyor 3 Sonde auf. Die geringe Entfernung zwischen Sonde und Lander ermöglichte es den Apollo-Astronauten die Sonde sowohl direkt vor Ort zu untersuchen wie auch Teile der Sonde zu weiteren Untersuchungen mit zur Erde zurück zu bringen. Ein NASA-Bericht aus dieser Zeit beschreibt die durch den Partikeleinschlag hervorgerufenen Schäden dahingehend, dass die Sonde regelrecht sandgestrahlt wurde [10]. Die in der jüngeren Zeit durchgeführten elektronenmikroskopischen Untersuchungen von Immer et al. [16] an einigen der zurückgebrachten Teile unterstützen die Aussage, dass ein Großteil der Schäden auf den Einschlag von Mondstaubpartikeln während der Apollo 12 Mission zurückzuführen ist.

Die Relevanz der Betrachtung dieses Teilaspektes einer Mondmission wird auch dadurch bestätigt, dass in der jüngeren Vergangenheit mehrere wissenschaftliche Arbeiten zur Simulation der Partikelausbreitung während verschiedener Landeszenarien auf der Mondoberfläche sowie experimentelle Untersuchungen zur direkten Schadwirkung von Partikeleinschlägen während einer Mondlandung, durchgeführt wurden.

So führten unter anderem Lane et al. [17] Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen durch, um die Aufwirbelung von Bodenmaterial während einer Mondlandung durch einen mit dem Apollo-Lander vergleichbaren Lander für verschiedene Landerhöhen über Grund zu untersuchen. Das dazu implementierte Trajektorienmodell für Partikel zwischen 10 μm und 500 μm ermöglicht es die Geschwindigkeit der aufgewirbelten Partikel in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers zu bestimmen. Die Ergebnisse von Lane et al. [17] für die Geschwindigkeit der beschleunigten Partikel zeigen dabei eine gute Übereinstimmung der verschiedenen Simulationen für Partikeldurchmesser zwischen

250 μm und 500 μm . Mit sinkendem Partikeldurchmesser ergeben sich in der Arbeit von Lane et al. [17] deutliche Abweichungen zwischen den jeweiligen Simulationen, wobei der allgemeine Trend des Verlaufes der Geschwindigkeit über dem Partikeldurchmesser im Allgemeinen gleich bleibt. Morris [18] analysierte ebenfalls mit Hilfe von Simulationen die Ausbreitung von Mondstaubpartikeln während lunaren Landevorgängen. Im Vergleich zu Lane et al. [17] untersuchte Morris [18] jedoch deutlich kleinere Partikeldurchmesser. In seiner Arbeit verwendete Morris [18] dafür eine Kombination aus Computational Fluid Dynamics (CFD) und Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) Analysen. Die untersuchten Partikel erreichen hierbei in der Nähe des Landers, der ähnlich dem Apollo-Lander ausgelegt wurde, deutlich über 1000 m/s, wobei die erreichten Geschwindigkeiten hin zu größeren Partikeln abnehmen. Morris [18] untersuchte ebenfalls verschiedene Flughöhen über Grund. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass die Geschwindigkeit der beschleunigten Bodenpartikel mit sinkender Flughöhe nur für größere der untersuchten Partikel grundsätzlich zunimmt. Aufgrund von nahe dem Boden auftretenden Partikelkollisionen gilt dies bei kleineren Partikeln unter 8 μm erst ab einer bestimmten Flughöhe der Partikel. Des Weiteren untersuchte Morris [18] ebenfalls die Fernwirkung einer Mondlandung. Nach seiner Aussage erreichen die analysierten Partikel Entfernungen bis in den mittleren zweistelligen Kilometerbereich. Allerdings ist nach Morris [18] die größte Dichte an Partikeln in der näheren Umgebung des Landers zu erwarten. Eine ähnliche Herangehensweise, die Kombination von CFD und DSMC, wurde ebenfalls von Kahila [19] für die Untersuchung der Aufwirbelung von Bodenmaterial während einer Mondlandung verwendet. Anders als bei Morris [18] wurde dabei allerdings ein Astrium S400-15 Triebwerk [19] sowie deutlich größere Partikeldurchmesser simuliert.

In den vergangenen Jahren wurden ebenfalls mehrere experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die das Ziel hatten, das Gefährdungspotential von während einer Mondlandung aufgewirbeltem Mondstaub zu charakterisieren. Wittbrodt et al. [20] untersuchten die Einschlagkrater, die auf Glasoberflächen durch Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A (genaue Beschreibung des Mondanalogmaterials erfolgt in Kapitel 2.2) entstehen. Die Versuche wurden hierzu im Vergleich zu lunarem Regolith, dessen mittlere Korngröße zwischen 45 μm und 100 μm liegt [11], mit verhältnismäßig großen Projektilen durchgeführt. Die verwendeten Partikel des Mondanalogmaterials lagen im Bereich zwischen 450 μm und 1000 μm . Die Projektilen wurden hierzu mit einem Sandstrahler auf Geschwindigkeiten bis zu 90 m/s beschleunigt. Die Ergebnisse zeigen, trotz der moderaten Einschlaggeschwindigkeiten, deutliche

Schäden auf den Glasoberflächen durch den Einschlag der Mondanalogpartikel. Für Partikel zwischen 450 µm und 500 µm wurden die resultierenden Einschlagkrater mit einem Weißlichtinterferometer, dem Portable Handheld Optical Window Inspection Device (PHOWID) [20], näher untersucht. Nach Aussage der Autoren [20] wurde dabei allerdings kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Einschlaggeschwindigkeit und Größe der Einschlagkrater gefunden. Mpagazehe et al. [14] untersuchten in einer experimentellen Studie ebenfalls die Schädigung technischer Oberflächen durch den Einschlag von Mondanalogmaterial. Auch für diese Untersuchungen wurde das Mondanalogmaterial JSC-1A genutzt. Allerdings wurde in der Arbeit von Mpagazehe et al. [14] die feine Fraktion JSC-1AF des Analogmaterials verwendet. Für die Experimente wurden die JSC-1AF-Partikel mit dem Dust Erosion Experimental Rig (DEER) [14] auf Geschwindigkeiten von ungefähr 105 m/s beschleunigt und die Auswirkungen der resultierenden Einschläge auf 0,25 Inch dicke Stahl-, Aluminium- und Acrylglasoberflächen untersucht. Der durch Erosion hervorgerufene Volumenverlust liegt für alle Proben bei weniger als 1%, allerdings wurden durch EDX-Messungen (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) der Metallproben nachgewiesen, dass sich trotz der Erosionsvorgänge Spuren des verwendeten Mondanalogmaterials in der Oberfläche der Metallproben ablagern. Weiterhin wurden bei den metallischen Proben die Änderung der Oberflächenrauheit und die Reflexionsänderung der Oberflächen untersucht. Bei den ebenfalls von Mpagazehe et al. [14] untersuchten Acrylglasproben wurde neben der zuvor beschriebenen Volumenänderung aufgrund von Erosion auch die Änderung der Transmission ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchung der optischen Eigenschaften der Proben zeigen, dass der Einschlag von JSC-1AF-Partikeln zum Teil zu einer mehr als 70%igen Reduzierung der Transmission und des Gesamtreflexionsgrades der Proben führt. In einer weiteren experimentellen Studie [21], die das Ziel hatte den erosiven Verschleiß eines Solarkonzentrators durch aufgewirbelten Mondstaub zu untersuchen, wurde ebenfalls das Mondanalogmaterial JSC-1AF verwendet. Für die Beschleunigung der Partikel setzten Mpagazehe et al. [21] den TOPAS Solid Aerosol Generator ein. Mit Hilfe dieses „Sandstrahlers“ konnten die Partikel auf ungefähr 105 m/s beschleunigt werden. Die so beschleunigten Partikel wurden auf einen zur Hälfte abgedeckten Solarkonzentrator geschossen. Optische Analysen des Solarkonzentrators zeigen deutliche Verschleißerscheinungen auf der unbedeckten und damit ungeschützten Fläche des Solarkonzentrators. Zur weiteren Charakterisierung der Auswirkungen des Verschleißes durch den Einschlag der JSC-1AF-Partikel wurde der Ausgangsstrom der kompletten

Anlage vor und nach dem Beschuss gemessen. Der Ausgangsstrom fällt durch den Beschuss auf ungefähr 60% des ursprünglich für die unbeschädigte Anlage gemessenen Stroms ab.

Tab. 1: Übersicht über bereits durchgeführte experimentelle Arbeiten anderer Autoren

Übersicht über die zuvor von anderen Autoren durchgeführten experimentellen Arbeiten zum Thema Impaktverschleiß durch Mondanalogmaterial			
Autor	Mpagazehe et al. [14]	Wittbrodt et al. [20]	Mpagazehe et al. [21]
Verwendetes Analogmaterial/ Partikelgröße	JSC-1AF	JSC-1A / 450-1000 µm	JSC-1AF
Methode zur Beschleunigung der Partikel	Sandstrahler (DEER)	Sandstrahler	Sandstrahler (TOPAS)
Erreichte Geschwindigkeit	105 m/s	bis zu 90 m/s	105 m/s
Untersuchte Proben/ Materialien	Aluminium, Stahl, PMMA	Glas	Solkonzentrator
Messmethode/ gemessene Größen	Erodiertes Volumen, Änderung der Oberflächenrauheit, Änderung von Transmission und Reflexion	Portable Handheld Optical Window Inspection Device (PHOWID)	Abnahme des Ausgangsstroms des Solarkonzentrators
Ergebnisse	Materialabtrag weniger als 1%; Einlagerung von Mondanalogmaterial nachgewiesen; Änderung der Oberflächentopologie; in einigen Fällen Absinken der Transmission und Reflexion um mehr als 70%	Deutliche Schädigung der Glasoberflächen aber kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Einschlaggeschwindigkeit und Einschlagkrater für Partikel zwischen 450 und 500 µm	Ausgangsstrom sinkt auf bis zu 60% ab

Die Ergebnisse der experimentellen Studien [14], [20], [21] zeigen, dass der Einschlag und der damit verbundene Verschleiß durch Mondstaubpartikel, die während Start- und Landevorgängen auf dem Mond durch Triebwerke aufgewirbelt werden, ein signifikantes Problem für zukünftige Missionen darstellt. Diese Problematik verstärkt sich insbesondere unter der Annahme, dass bei zukünftigen Missionen regelmäßige Starts und Landungen in der Nähe einer existierenden Infrastruktur stattfinden. Die Studien [14], [20], [21] zeigen weiterhin, dass bereits durch relativ langsame Partikel eine deutliche Schädigung von technischen Oberflächen und Systemen auftritt.

Tab. 1 fasst die zuvor behandelten Studien und deren Ergebnisse noch einmal zusammen. Die experimentellen Studien [14], [20], [21] zeigen zudem, dass der Einschlag von Mondstaubpartikeln eine Vielzahl von Effekten bewirkt, die zu einer Veränderung und Degradation von technischen Oberflächen und Systemen führt. Um die Grundlage für die späteren experimentellen Untersuchungen zu Einschlägen von Mondstaub zu schaffen, sollen deshalb zuerst Einzeleinschläge betrachtet werden. Durch theoretische Zusammenhänge sowie experimentelle Ergebnisse für wohldefinierte Projektile soll dadurch ein generelles Verständnis der Effekte von Partikeleinschlägen erzielt werden.

2.1 Der elektromagnetische Beschleuniger²

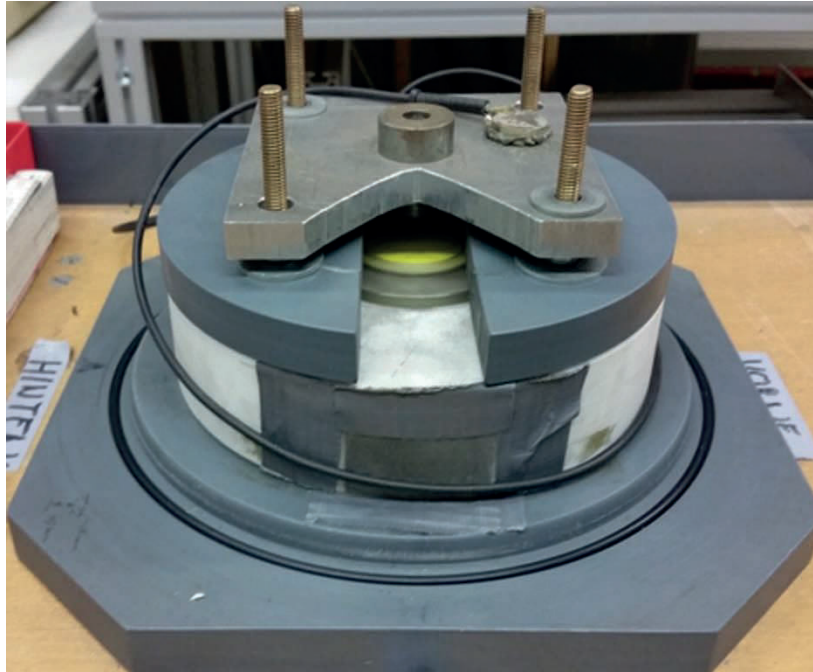


Abb. 2: Der elektromagnetische Beschleuniger des Lehrstuhls für Raumfahrttechnik

Abb. 2 zeigt den am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der technischen Universität München entwickelten elektromagnetischen Wirbelstrombeschleuniger [22] in der aktuell verwendeten Konfiguration. Der Beschleuniger wurde in der vorliegenden Arbeit sowohl für die Experimentaldaten, die für die theoretische Betrachtung der Auswirkung von Einzeleinschlägen verwendet wurden, als auch für die Untersuchungen zur Auswirkung von Verschleiß durch den Einschlag von Mondanalogmaterial auf technische Oberflächen eingesetzt.

Eine schematische Darstellung der aktuell verwendeten Konfiguration des elektromagnetischen Beschleunigers [22] ist in Abb. 3 dargestellt. Das Gehäuse ist hierbei zweigeteilt aufgebaut. Eingebettet im unteren Teil des Gehäuses befindet sich die Primärspule. Die Primärspule ist eine Flachspule aus Kupfer mit insgesamt 11 isolierten Wicklungen. In der aktuellen Konfiguration ist die Primärspule durch einen zweiteiligen Isolator vom Sabot getrennt. In der vorliegenden Arbeit wurde als Sabot ein dünnes kreisförmiges Aluminiumplättchen mit einer Masse von ungefähr einem Gramm verwendet. Das Sabot erfüllt hierbei zwei unterschiedliche Aufgaben. Zum einen wird das zu

² Dieses Kapitel basiert auf den vom Autor bereits veröffentlichten Publikationen [86], [87], [88] und [89] und ist dem Methodenteil der Veröffentlichungen entnommen.

beschleunigende Projektil beziehungsweise werden die zu beschleunigenden Partikel in der Mitte des Sabots platziert, zum anderen dient das Sabot als „sekundäre Spule“. Durch die Entladung des angeschlossenen Kondensators über die primäre Spule wird ein Wirbelstrom im Sabot beziehungsweise in der „sekundären Spule“ induziert. Dieser Vorgang resultiert in einer abstoßenden Kraft, die das Sabot und die darauf befindlichen Projektile in Richtung der Stopperplatte beschleunigt. Die Stopperplatte ist durch vier Gewindestangen (siehe Abb. 2) mit dem Gehäuse des Beschleunigers fest verbunden. Bei der Kollision des Sabots mit der Stopperplatte wird das Aluminiumplättchen abgebremst, während die sich darauf befindenden Projektile durch einen Kanal in der Stopperplatte ungehindert weiterfliegen und auf die zu untersuchende Probe auftreffen.

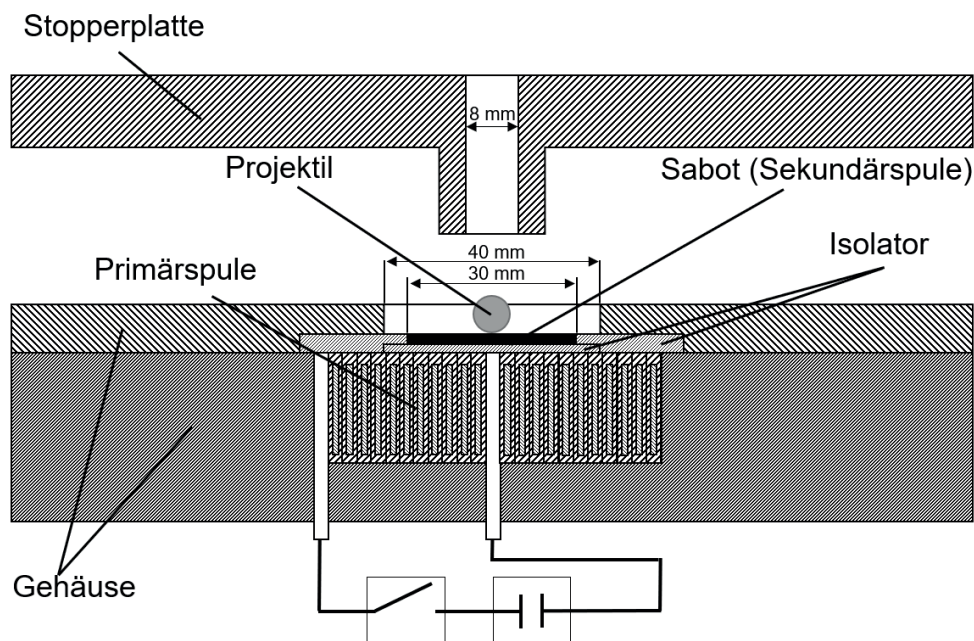


Abb. 3: Vereinfachte schematische Darstellung des elektromagnetischen Wirbelstrombeschleunigers mit Änderungen nach [22]

Im Laufe der vorliegenden Arbeit wurde eine wesentliche konstruktive Änderung zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Beschleunigers gegenüber früheren Konfigurationen vorgenommen. Diese besteht in der zweiteiligen Ausführung des in Abb. 3 dargestellten Isolators, der in früheren Konfigurationen des Beschleunigers als ein Bauteil ausgeführt wurde. Die Primärspule drückt bei jedem Beschleunigungsvorgang gegen die Unterseite des Isolators. Dadurch kommt es im Laufe mehrerer Zyklen zu einer Wölbung des Isolators, die den Abstand zwischen Primärspule und Sabot erhöht und damit zu einer deutlichen Leistungsminderung in Bezug auf die erreichbare Geschwindigkeit führt. Des Weiteren trifft das Sabot in Folge des Abbremsvorganges nach der Kollision mit der

Stopperplatte wieder auf den Isolator. Dadurch kann es insbesondere bei der Erzielung von hohen Geschwindigkeiten bei mehrmaligem Betrieb zu einer Beschädigung in Form von Rissen im inneren Bereich des Isolators kommen, wodurch er für einen weiteren Beschleunigungsvorgang unbrauchbar wird. Durch die zweiteilige Ausführung des Isolators kann der Beschädigungsvorgang zwar nicht unterbunden werden, der zweiteilige Aufbau erhöht allerdings signifikant die Wartungsfreundlichkeit. Der innere Teil des Isolators kann in großer Stückzahl direkt aus Halbzeugen gelasert werden, wohingegen beim einteiligen Aufbau der gesamte Isolator getauscht werden muss und ein komplett neuer Isolator gefertigt werden muss. Durch die bewusste Ausführung des inneren Teils des Isolators als Verschleißteil konnte dieser auch deutlich dünner ausgeführt werden. Der daraus resultierende geringere Abstand zwischen primärer und „sekundärer“ Spule sorgt zusätzlich für eine deutliche Leistungssteigerung. Durch die beschriebene Verbesserung ändert sich die Wirkweise des elektromagnetischen Beschleunigers nicht, lediglich die maximal erzielbare Geschwindigkeit wird erhöht. Somit wird der Vergleich von Versuchsergebnissen, die noch mit der alten Konfiguration während der Anfangszeit der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, in keiner Weise eingeschränkt.

Mit dem elektromagnetischen Wirbelstrombeschleuniger ist es möglich Einzelprojekteile und Ansammlungen von Partikeln mit einer Gesamtmasse von etwas mehr als 10 mg auf Geschwindigkeiten bis zu 400 m/s zu beschleunigen. Über schwerere Projekteile kann an dieser Stelle keine Aussage gemacht werden, da sie in der vorliegenden Studie nicht verwendet wurden. Der Beschleuniger kann hierzu in zwei unterschiedlichen Konfigurationen betrieben werden, die sich lediglich hinsichtlich des als Energiequelle verwendeten Kondensators unterscheiden. Der untere Geschwindigkeitsbereich des Beschleunigers kann durch die Verwendung eines 10 μF Kondensators mit einer maximalen Ladespannung von 12.000 V abgedeckt werden. Bei der Verwendung dieses Kondensators können Geschwindigkeiten bis zu 200 m/s erreicht werden. In der vorliegenden Studie wurde der Beschleuniger nur für minimale Geschwindigkeiten von ungefähr 50 m/s eingesetzt. Prinzipiell sind auch deutlich kleinere Geschwindigkeiten durch die Anpassung des Sabotgewichtes an den gewünschten Geschwindigkeitsbereich möglich [23]. Diese wurden aber in der vorliegenden Studie nicht weiter betrachtet. Für Geschwindigkeiten oberhalb von 200 m/s wird ein 60 μF Kondensator mit einer maximalen Ladespannung von 10.000 V eingesetzt. Für diese Konfiguration ergeben sich sowohl ein unteres wie auch ein oberes Limit der erzielbaren Geschwindigkeit. Das obere Limit liegt, wie anfangs erwähnt, bei ungefähr 400 m/s. Diese obere Grenze begründet sich durch ein konstruktives Limit des

Beschleunigers. Höhere Geschwindigkeiten und die damit einhergehenden höheren Ströme und Spannungen beanspruchen die primäre Spule mechanisch zu stark. Es kommt bereits nach wenigen Schüssen zu einem Abscheren der Verschraubung im Zentrum der Spule, wodurch der komplette Spulenaufbau unbrauchbar wird, da der korrekte Stromfluss nur entlang der Spule nicht mehr gewährleistet ist. Letztlich kann ein Versagen der primären Spule die gesamte Anlage schädigen. Das untere Limit für die erreichbaren Geschwindigkeiten resultiert daraus, dass sich für Ladespannungen kleiner 1.000 V die Ansteuerung der Anlage schwierig gestaltet, wodurch sich aber durch die Möglichkeit der Verwendung des 10 μF Kondensators eine Lücke innerhalb der realisierbaren Geschwindigkeiten vermeiden lässt. Kalibrierungsschüsse mit dem elektromagnetischen Beschleuniger haben gezeigt, dass die erreichte Geschwindigkeit direkt proportional zur Ladespannung des jeweiligen Kondensators ist. Zusätzlich zur Kapazität des Kondensators hängt die erzielte Geschwindigkeit primär nur noch von der beschleunigten Masse ab, was eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche ermöglicht. Es sei jedoch erwähnt, dass der Zusammenhang zwischen Ladespannung und Geschwindigkeit nur für eine einzelne Spule gilt. Da die Spulen von Hand gefertigt werden, sind kleinere Abweichungen unvermeidbar. Dieser Umstand sorgt dafür, dass für jede neue Spule eigene Kalibrierungsschüsse durchgeführt werden müssen. In Abb. 4 ist exemplarisch das Leistungsspektrum des elektromagnetischen Wirbelstrombeschleunigers anhand von Kalibrierungsschüssen bei der Verwendung eines ungefähr 1 Gramm schweren Sabots dargestellt.

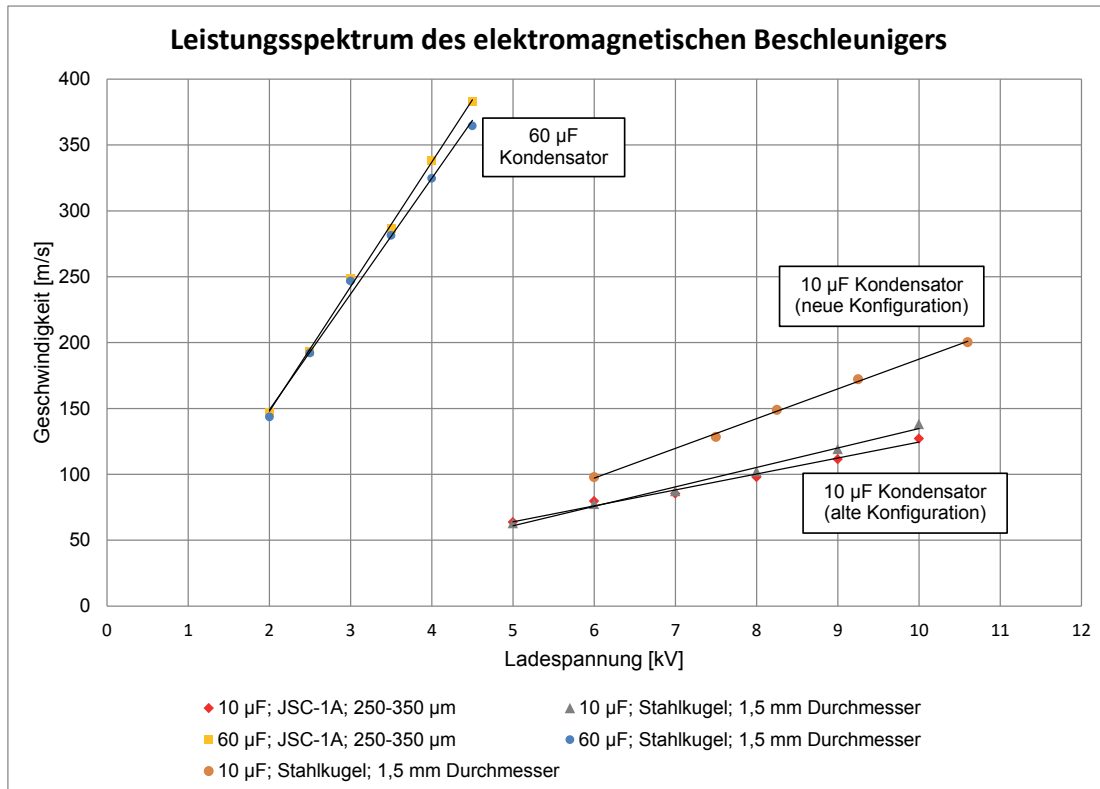


Abb. 4: Leistungsspektrum des elektromagnetischen Beschleunigers (Vergleich alte und neue Konfiguration bei der Verwendung des 10 µF Kondensators)

Die Messung der Geschwindigkeit wird mit Hilfe von zwei Piezoelementen und einem Oszilloskop durchgeführt. Hierzu wird, wie in Abb. 2 rechts zu sehen, ein Piezoelement direkt auf der Stopperplatte befestigt. Ein weiteres Piezoelement wird direkt auf der zu untersuchenden Probe angebracht. Beide Piezoelemente sind hierzu mit dem Oszilloskop verbunden. Somit ist es möglich die Zeitdifferenz zwischen den beiden Ereignissen Kollision des Sabots mit der Stopperplatte und Einschlag des Projektils auf dem Target zu erfassen und dadurch die Geschwindigkeit des Projektils zu errechnen. Abb. 5 zeigt beispielhaft die mit dem Oszilloskop aufgezeichneten Signale der beiden für die Geschwindigkeitsmessung verwendeten Ereignisse. Diese Methode der Geschwindigkeitsmessung hat sich über Jahre am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der Technischen Universität München etabliert und bewährt. Zusätzlich wurde diese Messmethode mit Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera (SIMD16) überprüft.³

³ Die Erläuterungen zur Messmethode sowie deren bildhafte Darstellung gehen über den Inhalt der oben genannten Veröffentlichungen hinaus.

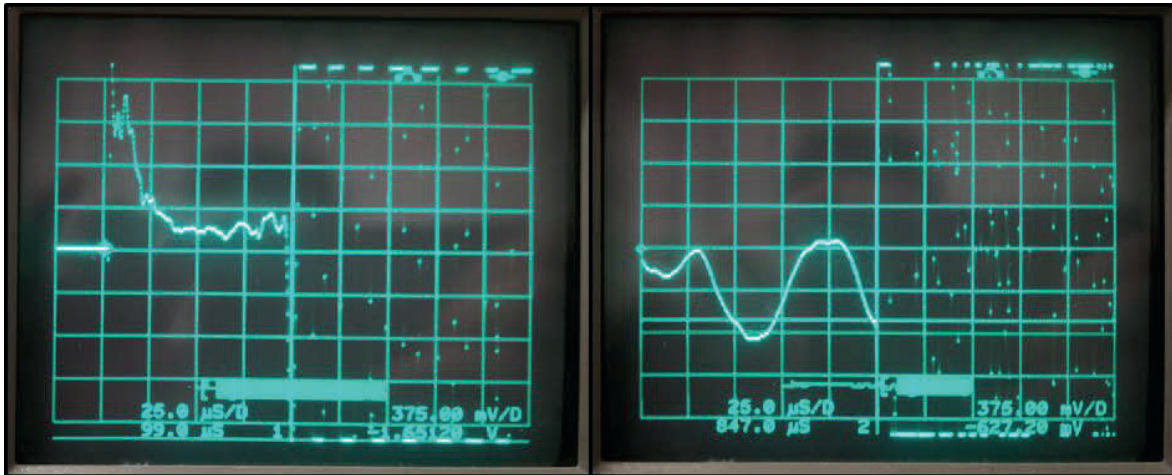


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung der Messung der beiden Einschlagereignisse mit dem Oszilloskop (links: Kollision des Sabots mit der Stopperplatte, rechts: Einschlag des Projektils auf dem Target)

2.2 Projektil für die Untersuchungen mit dem elektromagnetischen Wirbelstrombeschleuniger⁴

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die jeweiligen Materialien, welche als Projektil für die unterschiedlichen experimentellen Untersuchungen mit dem elektromagnetischen Beschleuniger in Betracht gezogen wurden. Hierbei wird zudem auf die Größe der verwendeten Projektil, auf Limitierungen beim Einsatz bestimmter Projektil sowie die allgemeine Verwendbarkeit der Projektil zusammen mit dem elektromagnetischen Beschleuniger eingegangen. Es wurden die folgenden Materialien untersucht: Stahl- und Glaskugeln, Quarzsand, Partikel des Mondanalogmaterials JSC-1A, Tongranulatpartikel (Catsan®) und Zeolithkugeln.

Dazu soll vorab das bereits zuvor bei der Vorstellung anderer durchgeführter experimenteller Untersuchungen eingeführte und hier ebenfalls verwendete Mondanalogmaterial JSC-1A kurz besprochen sowie die Gründe für seine Verwendung in der vorliegenden Arbeit erläutert werden. Wie bereits zu Anfang erwähnt, zeichnet sich lunares Regolith aufgrund des Fehlens erosiver Prozesse durch Wind und Wasser im Gegensatz zu irdischem Sand durch seine zerklüftete, scharfkantige Oberfläche aus. Aller Voraussicht nach hat speziell die scharfkantige Oberfläche der Mondstaubpartikel einen

⁴ Dieses Kapitel ist eine erweiterte und aktualisierte Version des vom Autor veröffentlichten Konferenzbeitrags [88].

signifikanten Einfluss auf das Verschleißverhalten sowohl bei Einschlägen der Partikel wie auch auf den im weiteren Verlauf der Arbeit untersuchten abrasiven Verschleiß durch Drittpartikel. In einer Reihe anderer experimenteller Studien, die sich mit dem Verschleiß durch lunares Regolith beschäftigen [14], [20], [21], [24], wurde das Mondanalogmaterial JSC-1A beziehungsweise die feine Fraktion JSC-1AF verwendet. Durch die Verwendung des gleichen Analogmaterials soll eine Vergleichbarkeit mit diesen Studien gewährleistet werden. JSC-1A wurde als Auftragsarbeit der NASA durch Orbitec entwickelt und produziert mit dem Ziel ein vergleichbares Simulat zum früheren JSC-1 zu erhalten [25]. JSC-1A besitzt eine Korngrößenverteilung, die denen der Apollo-Proben ähnelt [25]. Insbesondere im Bereich größerer Partikeldurchmesser über ungefähr 400 μm lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit einigen der Apollo-Proben finden [25]. Durch eine speziell entwickelte Mahltechnik konnte der insbesondere für Verschleißuntersuchungen interessante scharfkantige Charakter der Partikel gewährleistet werden. Anhand der im Material vorkommenden Korngrößen lässt sich das Mondanalogmaterial in drei Unterfraktionen einteilen: JSC-1AC, JSC-1A und JSC-1AF. Dabei beinhaltet JSC-1AC-Partikel kleiner als 5 mm, JSC-1A-Partikel kleiner als 1 mm und JSC-1AF-Partikel kleiner als 50 μm [26]. Abb. 6 zeigt Mikroskopaufnahmen der Fraktion JSC-1A bei verschiedenen Vergrößerungen.

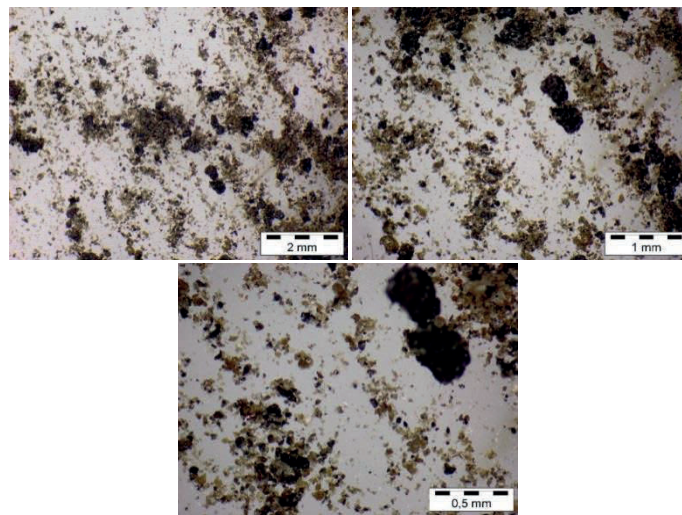


Abb. 6: Mikroskopaufnahmen des Mondstaubsimulats JSC-1A⁵

Als erstes soll untersucht werden, ob die Projektile während des Beschleunigungsvorgangs mit dem elektromagnetischen Beschleuniger intakt bleiben oder eine Fragmentierung der Projektile auftritt. Hierbei dürfte der eigentliche Beschleunigungsvorgang unkritischer sein

⁵ Entnommen aus dem vom Autor bereits veröffentlichten Konferenzbeitrag [87].

als die Kollision des Sabots mit der Stopperplatte und der damit einhergehende Schock. Die Notwendigkeit dieser Untersuchung ergibt sich daraus, dass bei der Verwendung des elektromagnetischen Beschleunigers Projektile einer bestimmten Größe oder Größenverteilung auf das Sabot geladen werden, wobei allerdings nicht die Möglichkeit besteht die Projektile während der Freiflugphase immer uneingeschränkt zu analysieren, da die oben beschriebene Hochgeschwindigkeitskamera nicht über den gesamten Zeitraum der Arbeit zur Verfügung stand. Insbesondere bei brüchigem Material besteht somit keine Möglichkeit ein potentiell Zerschlagen der Projektile während der Beschleunigung festzustellen, da das Zerschlagen ebenfalls durch den Einschlag auf der Probe entstehen kann. Durch die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen soll deshalb unter anderem überprüft werden, inwieweit sich Projektile aus brüchigem Material hinsichtlich ihrer Größe verändern. Es ist davon auszugehen, dass bei der Verwendung einer Vielzahl gleichzeitig geladener Projektile mögliche Fragmentierungen verringert werden, da viele Projektile gar nicht in direktem Kontakt mit dem Sabot stehen, sondern auf anderen Projektilen aufliegen, was zu einer dämpfenden Wirkung führt. Für die Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Methoden angewendet. Zum einen wurden die Projektile nach dem Beschleunigungsvorgang und der Kollision des Sabots mit der Stopperplatte im Freiflug mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (SIMD16) fotografiert. Zum anderen wurde bei brüchigen Materialien versucht die Partikel nach der Freiflugphase wieder aufzufangen, um eine zweite Überprüfung der Unversehrtheit der Partikel zu ermöglichen. Hierzu wurde Knetmasse als eine Art „Witnessplate“ auf eine Aluminiumplatte aufgebracht, um eine Zerstörung der Partikel durch den Einschlag möglichst zu vermeiden. Aus Formatierungsgründen und Gründen der Übersichtlichkeit wurden die einzelnen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen neu angeordnet und besitzen nicht mehr die ursprünglichen Größenverhältnisse. Bei allen Untersuchungen wurden Einzelprojekte verwendet, da dies einerseits wie oben beschrieben ein mögliches Zerschlagen wahrscheinlicher macht, andererseits lassen sich hierdurch die Projektile leichter auf den Fotografien identifizieren.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wird darauf eingegangen welche Projektile für die unterschiedlichen im weiteren Verlauf beschriebenen experimentellen Untersuchungen eingesetzt wurden. Hierbei werden auch die weiteren Limitierungen beschrieben, welche sich unabhängig von einer Unversehrtheit während des Beschleunigungsvorgangs für die jeweiligen Projektile in Bezug auf Verwendung für die experimentellen Untersuchungen ergeben. Alle Versuche wurden hierbei unter gleichen Bedingungen durchgeführt.

2.2.1 Unversehrtheit der Projektile

Stahlprojekteile

Für Stahlkugeln wurden keine Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gemacht, da Stahlkugeln bereits für die Kalibrierungsschüsse verwendet wurden und zu keiner Zeit eine Beschädigung der Projektile festgestellt wurde.

Glasprojekteile

Abb. 7 zeigt die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einer Glaskugel mit einem Durchmesser von 500 μm und einer Geschwindigkeit von ungefähr 150 m/s. Die Glaskugel übersteht den Beschleunigungsvorgang und die Kollision des Sabots mit der Stopperplatte unbeschädigt. Es wurde hier keine „Witnessplate“ verwendet, da auch Glaskugeln für Kalibrierungsschüsse verwendet wurden und es zu keiner Zeit zu einer Beschädigung der Glaskugeln kam.

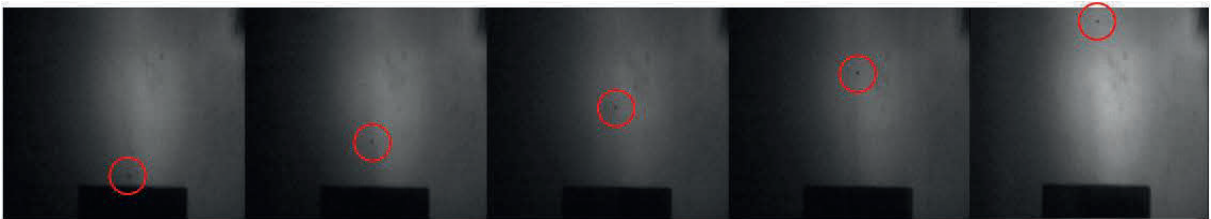


Abb. 7: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einer 500 μm Glaskugel bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 150 m/s

Quarzsandprojekteile

In Abb. 8 sind die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Quarzsandpartikels mit einem Durchmesser zwischen 450 μm und 500 μm bei ungefähr 170 m/s dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass der Partikel vollständig intakt bleibt.

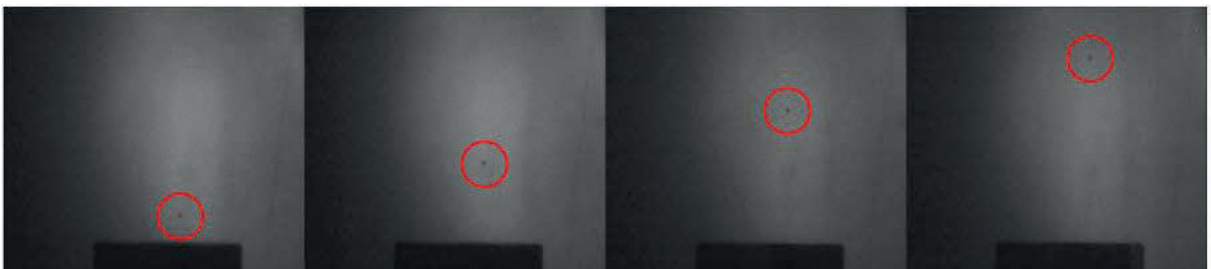


Abb. 8: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Quarzsandpartikels mit einer Korngröße zwischen 450 μm und 500 μm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 170 m/s

JSC-1A-Projektile

Abb. 9 zeigt die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von insgesamt vier verschiedenen JSC-1A-Partikeln mit einem Durchmesser zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$. Die unterschiedlichen Partikel wurden durch Aussieben aus dem Originalmaterial gewonnen. Die Partikel wurden auf ungefähr $170\ \text{m/s}$ beschleunigt. Bei den Schüssen 207, 208 und 210 ist auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu erkennen, dass die Partikel vollständig intakt bleiben. Ebenfalls zeigen die zugehörigen „Witnessplates“ jeweils einen einzelnen vollständig intakten JSC-1A-Partikel. Auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Schuss 209 sind kleinere Fragmente in der Nähe des Hauptprojektils zu erkennen. Auch auf der „Witnessplate“ sind zwei kleinere Projektilfragmente nahe dem Hauptprojektil zu finden. Im Vergleich zum Hauptprojektil sind diese aber bedeutend kleiner. Es kommt somit zu keiner vollständigen Fragmentierung des Projektils. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass die meisten Regolithpartikel den Beschleunigungsvorgang und die Kollision des Sabots mit der Stopperplatte unbeschädigt überstehen und im Falle eines Zerschneidens die Partikel im Wesentlichen ihre ursprüngliche Größe beibehalten.

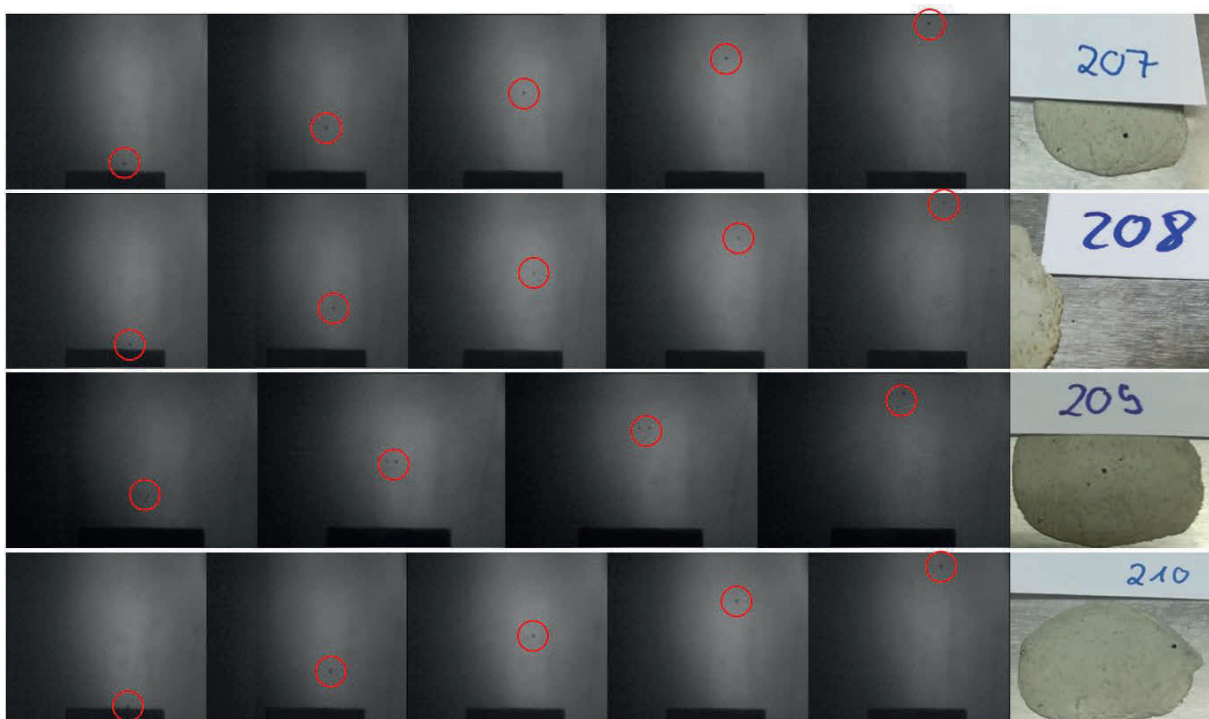


Abb. 9: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$ bei einer Geschwindigkeit von ungefähr $170\ \text{m/s}$

Abb. 10 zeigt weitere Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einem Durchmesser zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$. Die Partikel wurden hierbei auf höhere Geschwindigkeiten von ungefähr $200\ \text{m/s}$ beschleunigt. Auch bei diesen Geschwindigkeiten zeigt sich für die Schüsse 201 und 203 sowohl auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wie auf den „Witnessplates“ keine Fragmentierung der Partikel. Lediglich bei Schuss 202 sind zwei sehr kleine Artefakte unterhalb des Hauptprojektils auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu erkennen. Allerdings sind diese auf der „Witnessplate“ nicht zu erkennen. Somit ist nicht auszuschließen, dass es sich um Verunreinigungen auf dem Sabot handelt die zusammen mit dem JSC-1A-Partikel beschleunigt wurden. Im Falle eines Zerbrechens des Partikels sind diese Fragmente allerdings ebenfalls sehr klein im Vergleich zum Hauptprojektil. Somit ist auch hier die zuvor getroffene Annahme, dass die meisten JSC-1A-Partikel den Beschleunigungsvorgang unbeschädigt überstehen, weiterhin gültig. Im Falle eines Zerbrechens bleibt auch hier die Größe des Hauptprojektils nahezu unverändert.

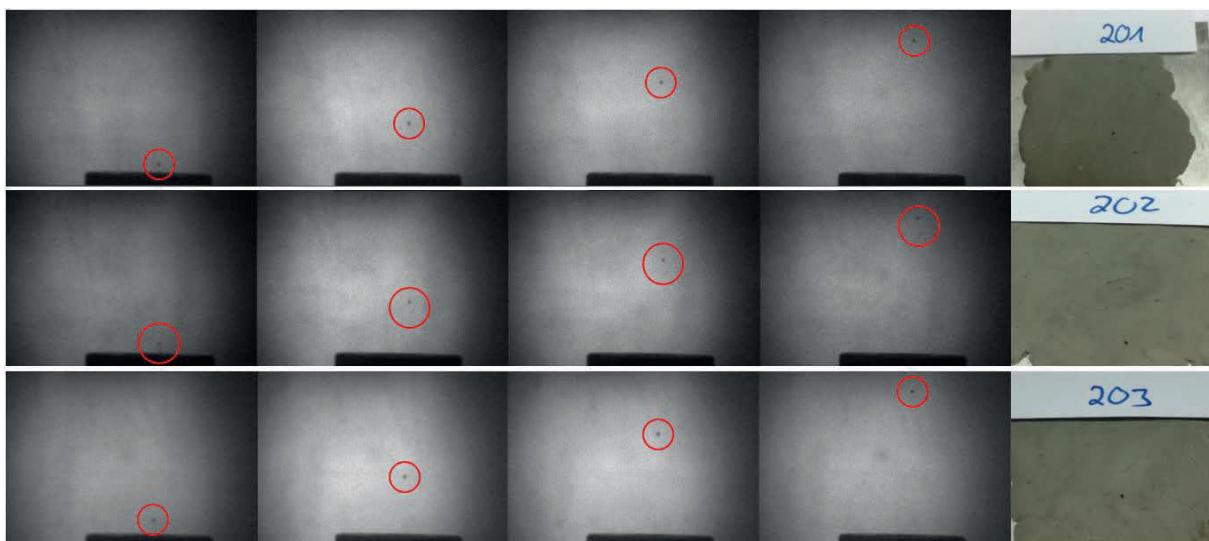


Abb. 10: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$ bei einer Geschwindigkeit von ungefähr $200\ \text{m/s}$

Zusätzlich zu den JSC-1A-Partikeln mit einem Durchmesser zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$ wurden auch größere Partikel mit einem Durchmesser zwischen $1,0\ \text{mm}$ und $1,5\ \text{mm}$ untersucht. Die Partikel wurden auf ungefähr $170\ \text{m/s}$ beschleunigt. Abb. 11 zeigt, dass für Schuss 211 keine Fragmentierung des Partikels auftrat. Obwohl die „Witnessplate“ nicht getroffen wurde, ist nur eine einzige Einschlagstelle auf der Aluminiumplatte zu erkennen. Bei Schuss 212 sind einige kleinere Fragmente unterhalb des Hauptprojektils zu erkennen. Allerdings konnte mit Hilfe der „Witnessplate“ nur das Hauptprojektil aufgefangen werden.

Schuss 213 hingegen zeigt eine vollständige Fragmentierung des Projektils. Dies ist auch deutlich auf der „Witnessplate“ zu erkennen. Neben einem größeren Projektil befindet sich eine langgezogene Spur aus kleineren Projektilfragmenten auf der Knetmasse. Obwohl ein JSC-1A-Partikel komplett intakt geblieben ist und bei einem weiteren Partikel keine nennenswerte Fragmentierung aufgetreten ist, ist die oben getroffene Annahme, dass durch den Beschleunigungsvorgang und die Kollision mit der Stopperplatte keine signifikante Größenänderung der JSC-1A-Partikel auftritt, für diese Korngrößen nicht mehr allgemein gültig. Damit zeigt sich, dass bei größeren JSC-1A-Partikeln eine Fragmentierung eher zu erwarten ist als bei kleineren Partikeln.

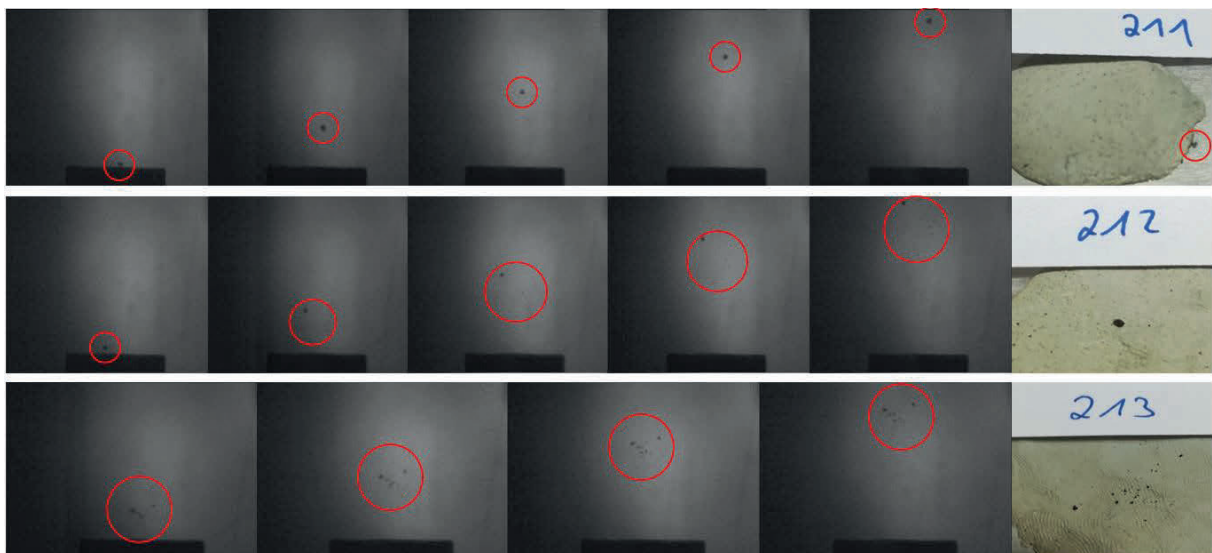


Abb. 11: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße zwischen 1,0 mm und 1,5 mm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 170 m/s

Eine weitere Untersuchung wurde für einen JSC-1A-Partikel mit einem Durchmesser von ungefähr 1,6 mm bei einer höheren Geschwindigkeit von ungefähr 195 m/s durchgeführt. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Abb. 12 zeigen eine vollständige Fragmentierung des Partikels. Dies kann auch durch die „Witnessplate“ belegt werden. Es können neben mehreren kleinen Projektilfragmenten zwei größere Projektile identifiziert werden. Dies unterstützt die zuvor getroffene Aussage, dass größere Partikel leichter fragmentieren. Auch hier ist die Annahme eines näherungsweisen Gleichbleibens der Größe der Projektile nach dem Beschleunigungsvorgang und der Kollision mit der Stopperplatte nicht mehr zulässig.

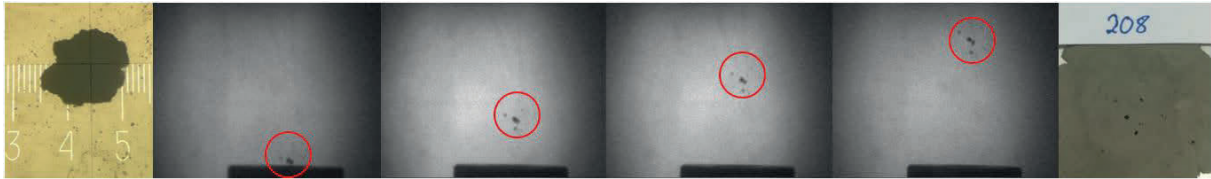


Abb. 12: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines JSC-1A-Partikels mit einer Korngröße von ungefähr 1,6 mm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 195 m/s

Tongranulatprojekteile

Abb. 13 zeigt die Untersuchungen von Tongranulatpartikeln (Catsan®) mit einem Durchmesser zwischen 450 μm und 560 μm bei ungefähr 165 m/s. Dieses Material soll weder für Einzeleinschläge noch für Tests zum Verschleiß durch Projektileinschlag verwendet werden, sondern nur als Vergleichsmaterial verwendet werden. Die Untersuchungen dienen als Test zur weiteren Überprüfung, ob JSC-1A-Partikel den Beschleunigungsvorgang und die Kollision mit der Stopperplatte unbeschädigt überstehen, da die Tongranulatpartikel deutlich weicher und brüchiger als das Mondanalogmaterial JSC-1A sind. Sollten die meisten Tongranulatpartikel intakt bleiben oder nur geringe Fragmentierungen auftreten, ist dies ein weiterer Beweis, dass die oben getroffene Annahme hinsichtlich der nicht nennenswerten Größenänderung der JSC-1A-Partikel für gleiche Projektilgrößen wie die untersuchten Tongranulatpartikel zulässig ist. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Abb. 13 zeigen, dass der in Schuss 217 verwendete Partikel vollständig intakt bleibt. Auch auf der zugehörigen „Witnessplate“ ist nur ein einzelnes Projektil erkennbar. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für Schuss 215 zeigen ein kleines weiteres Projektil vor dem Hauptprojektil. Auf der „Witnessplate“ konnte allerdings kein weiteres weißes Projektil gefunden werden. Somit kann nicht sichergestellt werden, ob es sich tatsächlich um eine Fragmentierung handelt oder lediglich eine Verunreinigung des Sabots vorlag. Der dritte Schuss hingegen zeigt eine vollständige Fragmentierung. Auch wenn hier die „Witnessplate“ verfehlt wurde, kann aufgrund der Menge der auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sichtbaren Partikel ausgeschlossen werden, dass diese Partikel aufgrund einer Verunreinigung des Sabots auftreten.

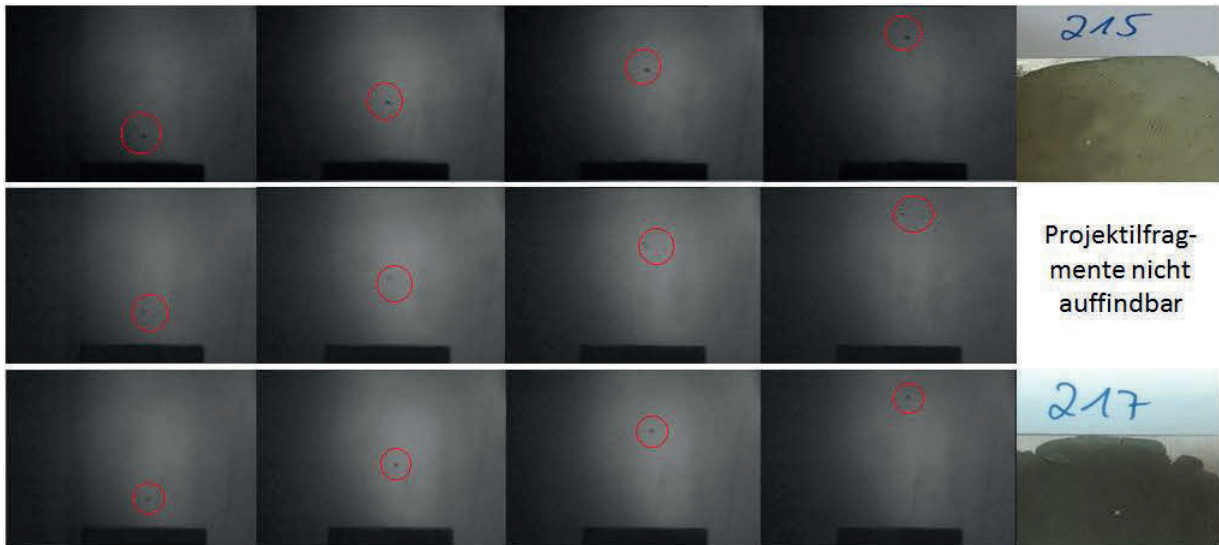


Abb. 13: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Tongranulatpartikeln (Catsan®) mit einer Korngröße zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$ bei einer Geschwindigkeit von ungefähr $165\ \text{m/s}$

Des Weiteren wurde ein Tongranulatpartikel (Catsan®) mit einer Korngröße zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$ auf ungefähr $200\ \text{m/s}$ beschleunigt. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen Abb. 14 zeigen, dass dieser Partikel vollständig intakt bleibt. Dies wird auch durch die „Witnessplate“ gestützt. Da, wie oben erklärt, angenommen werden kann, dass die Tongranulatpartikel leichter als JSC-1A-Partikel zerbrechen, unterstützen die Ergebnisse der vier untersuchten Tongranulatpartikel (Catsan®) die getroffene Annahme, dass sich die JSC-1A-Partikel gleicher Korngröße hinsichtlich ihrer Größe durch die Verwendung im elektromagnetischen Beschleuniger nur vernachlässigbar verändern.



Abb. 14: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Tongranulatpartikels (Catsan®) mit einer Korngröße zwischen $450\ \mu\text{m}$ und $560\ \mu\text{m}$ bei einer Geschwindigkeit von ungefähr $200\ \text{m/s}$

Zeolithprojektil

Als letztes Material wurden Zeolithkugeln mit einem Durchmesser von ungefähr $2\ \text{mm}$ untersucht. Die verwendeten Zeolithkugeln sind noch einmal deutlich weicher und brüchiger als das zuvor untersuchte Tongranulat (Catsan®). Dies zeigt sich auch deutlich in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Abb. 15. Es kommt bereits bei einer Beschleunigung

auf ungefähr 150 m/s zu einer vollständigen Zerstörung des Projektils. Hierbei kann kein Hauptprojektil mehr identifiziert werden. Das Projektil löst sich vollständig in eine langgezogene Staubwolke auf. Zeolith wurde deshalb für keine weiteren Versuche in Betracht gezogen.

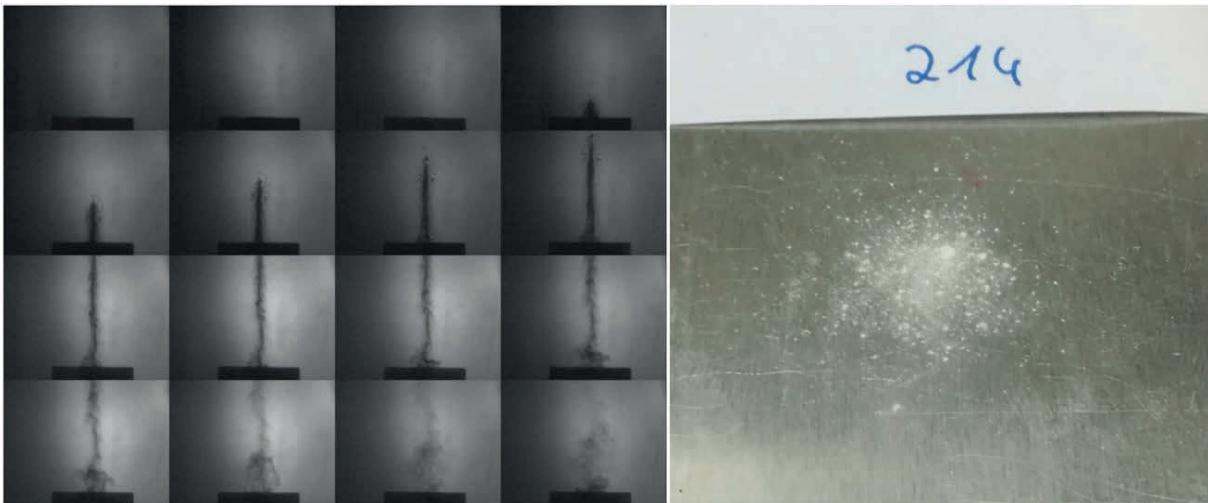


Abb. 15: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Zeolithpartikels mit einem Durchmesser von ungefähr 2 mm bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 150 m/s

Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass Stahl- und Glaskugeln sowie Quarzsand hinsichtlich der Beschleunigung mit dem elektromagnetischen Beschleuniger keiner Limitierung in den untersuchten Geschwindigkeitsbereichen unterliegen. Bei den Untersuchungen der JSC-1A-Partikel hat sich herausgestellt, dass es bei zwei der durchgeführten Schüsse mit Korngrößen zwischen 450 μm und 560 μm zu kleineren Fragmentierungen kam. Die Fragmente sind aber im Vergleich zum Hauptprojektil sehr klein. Es kann daher angenommen werden, dass für diese Korngrößenverteilung die Partikel nahezu ihre Originalgröße behalten und es nur zu insignifikanten Größenänderungen kommt. Des Weiteren lässt sich kein Einfluss durch eine höhere Geschwindigkeit der Projektile auf die Tendenz zur Fragmentierung identifizieren. Da in den weiteren Versuchen mit JSC-1A jeweils eine Bandbreite von Partikelgrößen verschossen wird, kann deshalb angenommen werden, dass die minimale Größenänderung nahezu keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat. Der Effekt der Größenänderung wird zudem weiterhin reduziert je größer die Bandbreite der Partikel ist. Als Beispiel sei eine Korngrößenverteilung zwischen 250 μm und 500 μm angenommen. Selbst wenn einige der größten Partikel in je zwei gleich große Partikel zerbrechen, was auf Basis der zuvor durchgeführten Test als sehr

unwahrscheinlich gilt, liegen diese Partikel nach wie vor im Korngrößenbereich des beschleunigten Materials. Zusätzlich ist eine dämpfende Wirkung bei der Verwendung einer größeren Anzahl von gleichzeitig beschleunigten Partikeln zu erwarten, da nur die unterste Schicht dieser Partikel in direktem Kontakt mit dem Sabot steht. Die Unversehrtheit der JSC-1A-Partikel mit Korngrößen kleiner 560 μm wird weiterhin durch die durchgeführten Untersuchungen mit Tongranulat (Catsan®) gestützt. Hier blieben ebenfalls die meisten Partikel vollständig intakt oder die Größenänderung des Hauptprojektils ist vernachlässigbar klein. Ein anderes Ergebnis ergibt sich mit JSC-1A-Partikeln mit einer Korngröße größer als 1 mm. Hier traten teilweise deutliche Fragmentierungen auf und die Annahme, dass dies nur einen geringen Einfluss auf die Größenänderung des ursprünglichen Projektils hat, ist nicht mehr gültig. Es zeigt sich somit, dass kleinere Korngrößen weniger zu signifikanten Fragmentierungen neigen. Die Untersuchungen der Zeolithpartikel zeigen, dass diese für die Beschleunigung mit dem elektromagnetischen Beschleuniger ungeeignet sind, falls ein beim Einschlag intakter Partikel benötigt wird.

2.2.2 Übersicht über die eingesetzten Projektil

Für die theoretische Betrachtung von Einzeleinschlägen und die damit einhergehende Herleitung von Formeln für die Eindringtiefe der Partikel und für den durch den Einschlag verursachten Schaddurchmesser sowie die Korrelation der Gleichungen mit Experimentaldaten konnten keine Mondanalogmaterialpartikel verwendet werden. Dies hat folgende Gründe: Die Partikel des Mondanalogmaterials JSC-1A besitzen keine einheitlich sphärische Form [25]. Aus diesem Grund ist es schwierig mehrere Partikel mit gleichem Durchmesser für die Einzeleinschläge zu verwenden. Aufgrund der Porosität der Partikel kann sich selbst bei äußerlich identischen Partikeln der innere Aufbau unterscheiden, was zu einer unterschiedlichen Masse der Partikel führt. Des Weiteren hängt selbst bei Partikeln annähernd gleicher Geometrie die Wirkfläche beim Einschlag von der Orientierung der JSC-1A-Partikel beim Einschlag ab. Die Orientierung der Partikel kann während der Versuche nicht gesteuert und insbesondere nicht kontrolliert werden. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die Partikel zum Teil in Folge des Einschlags zerbrechen. Diese Gründe erschweren eine Reproduzierbarkeit der Versuche hinsichtlich Eindringtiefe und Schaddurchmesser, wodurch die Grundlage für auf Experimentaldaten basierende Formeln nicht gegeben ist. Quarzsandpartikel wurden ebenfalls aufgrund ihrer uneinheitlichen Geometrie ausgeschlossen. Für die Einzeleinschläge wurden deshalb Glaskugeln mit drei verschiedenen Durchmessern, 0,5 mm, 1 mm und 1,5 mm verwendet. Somit ist eine

einheitliche geometrische Form der Partikel gewährleistet. Ein mögliches Zerschlagen der Partikel beim Einschlag konnte ebenfalls ausgeschlossen werden, da Glaskugeln bereits bei den Kalibrierungsschüssen verwendet wurden und hier kein Zerschlagen auftrat. Zudem wurden sie für die Geschwindigkeitsmessung mit der Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Basierend auf diesen Versuchen kann bei Glaskugeln ein Zerschlagen infolge des Beschleunigungsvorganges ausgeschlossen werden. Zusätzlich zu den Glaskugeln wurden für die Einzeleinschläge Stahlkugeln mit je 1 mm und 1,5 mm Durchmesser verwendet, um eine größere Variation an Datenpunkten zu erzielen. Sowohl Glas- und Stahlkugeln wie auch Quarzsand wurden nicht für die Untersuchungen zum Verschleiß durch Projektileinschlag verwendet, da hier explizit die Auswirkungen der scharfkantigen mondogolithähnlichen Partikel untersucht werden sollten.

Die für die einzelnen Untersuchungen verwendeten Projektilmaterialien sind in Tab. 2 zusammengefasst. Hierbei sind die Größen der verwendeten Projektile, deren Einsatzgebiet sowie auftretende Limitierungen angegeben.

Tab. 2: Verwendete Projektilmaterialien, Einsatzgebiet und Limitierungen

Verwendete Projektilmaterialien	Verwendete Projektilgrößen	Einsatzgebiet	Limitierung für Einzeleinschläge	Limitierung für Prallverschleiß
Mondanalogmaterial JSC-1A	250 - 560 µm	Prallverschleiß	Keine geometrisch einheitliche Form	keine Limitierung
Quarzsand	450 - 560 µm	nicht verwendet	Keine geometrisch einheitliche Form	zu geringe Ähnlichkeit zu lunarem Regolith
Glaskugel	0,5 - 1,5 mm	Einzeleinschläge	keine Limitierung	geringe Ähnlichkeit zu lunarem Regolith
Stahlkugel	1 - 1,5 mm	Einzeleinschläge	keine Limitierung	geringe Ähnlichkeit zu lunarem Regolith
Tongranulat (Catsan®)	450 - 560 µm	nicht verwendet	Keine geometrisch einheitliche Form	zu geringe Ähnlichkeit zu lunarem Regolith
Zeolithkugel	2 mm	nicht verwendet	Zerschlagen während des Beschleunigungsvorganges	Zerschlagen während des Beschleunigungsvorganges

2.3 Einschläge von sphärischen Vollkörpern⁶

Im ersten Teil dieses Kapitels soll eine theoretische Herleitung der Abhängigkeit zwischen den Einschlaggrößen Eindringtiefe T und Einschlagdurchmesser D_{Imp} sowie der Einschlaggeschwindigkeit v für einen senkrecht zur Probenoberfläche auftretenden Einschlag von sphärischen Vollkörpern durchgeführt werden. Dies soll die Grundlage für die im weiteren Teil beschriebenen experimentellen Untersuchungen zu Einschlägen von Mondstaub schaffen. Ziel ist durch die Darstellung theoretischer Zusammenhänge sowie experimenteller Ergebnisse ein generelles Verständnis der Effekte der Einschläge zu erzielen. Die Ergebnisse dieser Herleitung werden im weiteren Verlauf mit Experimentaldaten, die mit dem elektromagnetischen Beschleuniger gewonnen wurden, verifiziert. Im letzten Teil dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Experimentaldaten mit Literaturdaten verglichen und die Gründe für teilweise auftretende Abweichungen aufgezeigt.

2.3.1 Zusammenhänge zwischen Einschlaggrößen und Einschlaggeschwindigkeit

In diesem Abschnitt soll eine theoretische Beziehung zwischen Eindringtiefe T sowie Einschlagdurchmesser D_{Imp} und der Einschlaggeschwindigkeit v hergeleitet werden. Nach Hutchings [27] bleiben 1 – 10% der kinetischen Energie des einschlagenden Projektils als kinetische Energie des zurückprallenden Projektils erhalten. Die Geschwindigkeit des zurückprallenden Projektils und damit dessen verbleibende kinetische Energie konnte in den durchgeführten Versuchen, die im nächsten Abschnitt behandelt werden, nicht gemessen werden. Aus diesem Grund wird hier vereinfachend angenommen, dass die gesamte kinetische Energie des Projektils für die Verformung des Targetmaterials aufgewendet wird, was einem Steckenbleiben des Projektils entspricht. Deshalb wird in den folgenden Formeln nur eine Proportionalitätsbeziehung angewendet. Eine weitere Vereinfachung besteht in der Annahme, dass der durch den Einschlag entstehende Krater dieselbe Kontur und damit dieselben Dimensionen wie das Projektil aufweist.

⁶ Dieses Kapitel ist eine erweiterte und aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [88]. Signifikante inhaltliche Ergänzungen, die über die bereits veröffentlichten Texte hinausgehen, sind als solche kenntlich gemacht. Dieses Kapitel basiert des Weiteren zu Teilen auf der Literaturrecherche für durch den Autor betreute Studienarbeiten. Da hier nur Primärquellen genannt werden und die Studienarbeiten dadurch „unsichtbar“ bleiben, möchte der Autor hiermit explizit auf die Arbeiten der Studenten Spies [90], Lidel [91] und Richter [92] verweisen und den gebührenden Dank und seine Anerkennung für die geleistete Arbeit zum Ausdruck bringen.

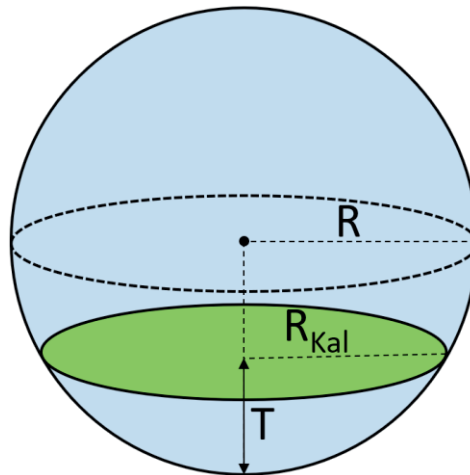


Abb. 16: Definition der geometrischen Größen des Projektils

Allgemein gilt für das Volumen einer Kugelkalotte einer Kugel mit den Radius R :

$$V_{Kalotte} = \frac{1}{3}\pi T^2(3R - T) \quad (2-1)$$

Mit: T = Höhe der Kugelkalotte (Eindringtiefe) und R = Radius des Projektils

Wird hierbei angenommen, dass die Eindringtiefe T deutlich kleiner als der Radius des Projektils ist ($T \ll R$) lässt sich Gleichung (2-1) wie folgt vereinfachen:

$$V_{Kalotte} = \pi T^2 R \quad (2-2)$$

Allgemein gilt für die kinetische Energie eines Körpers:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \propto v^2 \quad (2-3)$$

Mit den anfangs getroffenen Vereinfachungen, dass die gesamte kinetische Energie an das Targetmaterial abgegeben wird und dass die Kontur des Einschlagkraters der des Projektils entspricht, gilt:

$$E_{kin} \propto V_{Kalotte} \quad (2-4)$$

Bei Verwendung eines sphärischen Projektils mit Radius R und Dichte ρ ergibt sich für die kinetische Energie des Projektils folgender Zusammenhang:

$$E_{kin} \propto mv^2 \propto R^3 \rho v^2 \propto V_{Kalotte} \quad (2-5)$$

Mit der vereinfachten Formel aus Gleichung (2–2) gilt deshalb:

$$R^3 \rho v^2 \propto \pi T^2 R \quad (2-6)$$

Somit gilt der folgende Zusammenhang:

$$R \rho^{0,5} v \propto T \quad (2-7)$$

$$v \propto T \quad (2-8)$$

Für den Radius A einer Kugelkalotte einer Kugel mit Radius R gilt:

$$R_{Kal}^2 = T(2R - T) \quad (2-9)$$

Unter der bereits zuvor getroffenen Annahme, dass die Eindringtiefe T deutlich kleiner als der Radius R des einschlagenden Projektils ist ($T \ll R$) und mit Verwendung des Einschlagdurchmessers D_{Imp} ($D_{Imp} = 2R_{Kal}$) gilt deshalb:

$$D_{Imp}^2 = 8TR \quad (2-10)$$

Nach Gleichung (2–6) gilt weiterhin bei der Verwendung eines sphärischen Projektils mit Radius R und Dichte ρ der folgende Zusammenhang:

$$R^3 \rho v^2 \propto \pi \frac{1}{R} T^2 R^2 \quad (2-11)$$

Daraus folgt mit Gleichung (2–10):

$$R \rho^{0,25} v^{0,5} \propto D_{Imp} \quad (2-12)$$

$$v^{0,5} \propto D_{Imp} \quad (2-13)$$

2.3.2 Vergleich der theoretischen Zusammenhänge mit Experimentaldaten

In diesem Kapitel sollen die zuvor hergeleiteten theoretischen Zusammenhänge zwischen den Einschlaggrößen T und D_{Imp} und der Einschlaggeschwindigkeit v anhand von Experimentaldaten überprüft werden. Für diese Experimente wurden Glaskugeln mit den Durchmessern 0,5 mm, 1,0 mm und 1,5 mm sowie Stahlkugeln mit den Durchmessern 1,0 mm und 1,5 mm verwendet. Die Projektile wurden hierzu unter Verwendung des elektromagnetischen Beschleunigers (siehe Kapitel 2.1) auf die beiden Probenmaterialien

Al6061-T6 und Al7075-T6 geschossen und auf Geschwindigkeiten zwischen 50 m/s und 200 m/s beschleunigt. Die Targetmaterialien wurden hierzu nicht weiter bearbeitet und direkt wie vom Hersteller bezogen verwendet. Tab. 3 zeigt eine Übersicht über die für diese Versuche verwendeten Materialien.

Tab. 3: Für die Einzeleinschläge verwendete Materialien [28], [29]

Probenmaterial	Oberflächenhärte (Vickers)	Dichte	Probendicke
Al6061-T6	107	2700 kg/m ³	ungefähr 3 mm
Al7075-T6	175	2810 kg/m ³	ungefähr 3 mm

Projektilmaterial	Verwendete Projektildurchmesser	Dichte
Glas	0,5 mm, 1,0 mm und 1,5 mm	2500 kg/m ³
Stahl	1,0 mm und 1,5 mm	7850 kg/m ³

Die Messung der beiden Einschlaggrößen T und D_{Imp} wurde mit Hilfe eines Auflichtmikroskops durchgeführt. Die Eindringtiefe T wurde mit einer an der Fokussiereinrichtung des Mikroskops befestigten Feinmessuhr (Horex Feinmessuhr) bestimmt. Hierzu wurde das Mikroskop auf einen Punkt der unverformten Probenoberfläche in unmittelbarer Nähe des Einschlagkraters fokussiert (Ort der 1. Messung) und die Feinmessuhr auf null gestellt. Anschließend wurde die Probe soweit verschoben, dass das Mikroskop auf den Einschlagkraterboden fokussiert werden konnte (Ort der 2. Messung). Dadurch kann die Eindringtiefe T direkt an der Feinmessuhr abgelesen werden. Der Einschlagdurchmesser D_{Imp} wurde mit Hilfe des Kreuztisches des Mikroskops bestimmt. Hierbei wurde die Messung in zwei zueinander senkrechten Richtungen zwischen den Kraterrändern durchgeführt. Es sei erwähnt, dass diese Messmethode nur eine Messung zwischen den maximalen Erhebungen der Kraterränder zulässt und nicht in der Ebene der unberührten Probenoberfläche. Der Fehlerbalken in den folgenden Diagrammen gibt hierbei Aufschluss darüber inwieweit die Form des Kraters in der Ebene parallel zur Probenoberfläche von einem idealen Kreis abweicht. Eine mögliche Erklärung der Abweichung vom idealen Kreis ist, dass manche Projektile experimentbedingt nicht perfekt senkrecht zur Probenoberfläche eingeschlagen sind, was zu einer leicht elliptischen Form der Krater führt. Abb. 17 erläutert die beiden Messmethoden. Etwaige fertigungsbedingte Unebenheiten der Oberfläche sind hierbei deutlich geringer als die Eindringtiefe der Projektile und können daher vernachlässigt werden

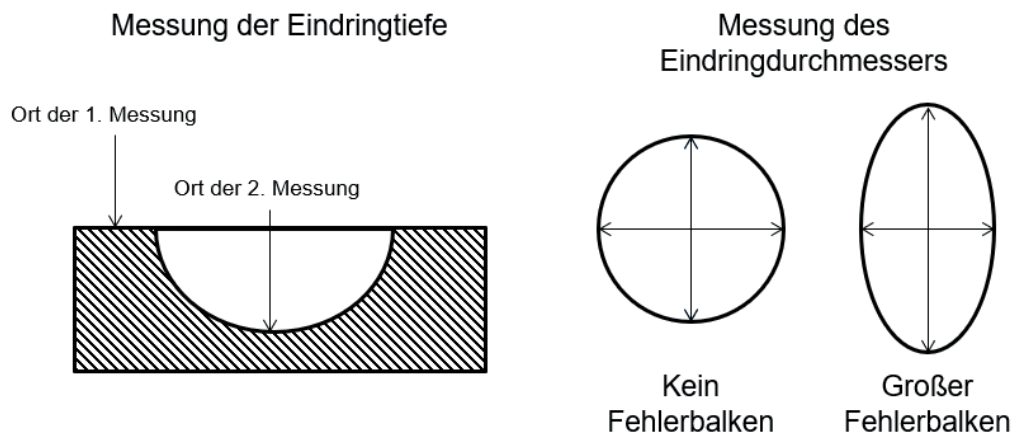


Abb. 17: Erläuterungen zur Messung der Eindringtiefe und des Einschlagdurchmessers

Abb. 18 und Abb. 19 zeigen die Ergebnisse der Einzeleinschlagversuche für Al6061-T6- und Al7075-T6-Proben. Hierbei sind jeweils die Eindringtiefe T über der Einschlaggeschwindigkeit v und der Einschlagdurchmesser D_{Imp} , zur besseren Verdeutlichung der im vorigen Kapitel hergeleiteten Zusammenhänge, über der Wurzel der Einschlaggeschwindigkeit v für die jeweiligen Projektile nebeneinander dargestellt. Dies zeigt, dass die in Kapitel 2.3.1 in Gleichung (2–8) und in Gleichung (2–13) hergeleiteten Korrelationen zwischen den Einschlaggrößen T und D_{Imp} und der Einschlaggeschwindigkeit v unabhängig von Projekttilgröße, Projekttilmaterial und Probenmaterial uneingeschränkt gültig sind.

Der direkte Vergleich der Ergebnisse einer Projekttilart für die Targetmaterialien Al6061-T6 und Al7075-T6 zeigt, dass sowohl für die Eindringtiefe T wie für den Einschlagdurchmesser D_{Imp} für Al6061-T6 grundsätzlich höhere Werte als für Al7075-T6 erreicht werden. Dies lässt sich damit erklären, dass Al6061-T6 eine geringere Oberflächenhärte als Al7075-T6 besitzt (vgl. Tab. 3). Somit widersteht es der Verformung durch die einschlagenden Partikel besser und es bildet sich insgesamt ein kleinerer Einschlagkrater. Dies führt bei einer gegebenen Einschlaggeschwindigkeit v zu kleineren Werten für die Eindringtiefe T und den Einschlagdurchmesser D_{Imp} .

Des Weiteren sinken die Werte der Einschlaggrößen T und D_{Imp} innerhalb eines Projekttilmaterials mit sinkendem Projektildurchmesser für eine gegebene Einschlaggeschwindigkeit v . Dies lässt sich durch die geringere zur Verfügung stehende kinetische Energie der kleineren Projektile erklären. Beim Vergleich der Stahl- und Glaskugeln mit einem Durchmesser von 1,5 mm und 1,0 mm zeigt sich, dass für die

Eindringtiefe T jeweils die Stahlkugeln für eine gegebene Einschlaggeschwindigkeit v einen größeren Wert erzielen als die Glaskugeln:

$$T(\text{Stahl}, \varnothing 1,5 \text{ mm}) > T(\text{Stahl}, \varnothing 1,0 \text{ mm}) > T(\text{Glas}, \varnothing 1,5 \text{ mm}) > T(\text{Glas}, \varnothing 1,0 \text{ mm}).$$

Wohingegen für den Einschlagdurchmesser D_{Imp} Projektile gleichen Durchmessers bei einer gegebenen Einschlaggeschwindigkeit v unabhängig vom Projektilmaterial höhere Werte erzielen:

$$D_{Imp}(\text{Stahl}, \varnothing 1,5 \text{ mm}) > D_{Imp}(\text{Glas}, \varnothing 1,5 \text{ mm}) > D_{Imp}(\text{Stahl}, \varnothing 1,0 \text{ mm}) > D_{Imp}(\text{Glas}, \varnothing 1,0 \text{ mm}).$$

Dies lässt sich anhand der in Kapitel 2.3.1 hergeleiteten Formeln (2–7) und (2–12) erklären. Beim Vergleich der Projektile hinsichtlich Dichte ρ (vgl. Tab. 3) und Projektildurchmesser zeigt sich, dass sich die Dichte ρ zwischen Glas und Stahl um etwas mehr als den Faktor 3 unterscheidet, wohingegen zwischen den Projektildurchmessern 1,5 mm und 1,0 mm und damit auch die Projektilradien R nur ein Faktor von 1,5 liegt. In den beiden Gleichungen für die Eindringtiefe T und den Einschlagdurchmesser D_{Imp} geht der Projektilradius R jeweils linear ein, wohingegen die Dichte ρ in die Gleichung für die Eindringtiefe T mit $\rho^{0,5}$ und in die Gleichung für den Einschlagdurchmesser D_{Imp} mit $\rho^{0,25}$ eingeht. Somit hat der Unterschied zwischen den Projektilradien R auf die Eindringtiefe T einen kleineren Einfluss als der Unterschied zwischen den Dichten ρ . Für den Einschlagdurchmesser D_{Imp} hingegen dominiert der Unterschied zwischen den Projektilradien.

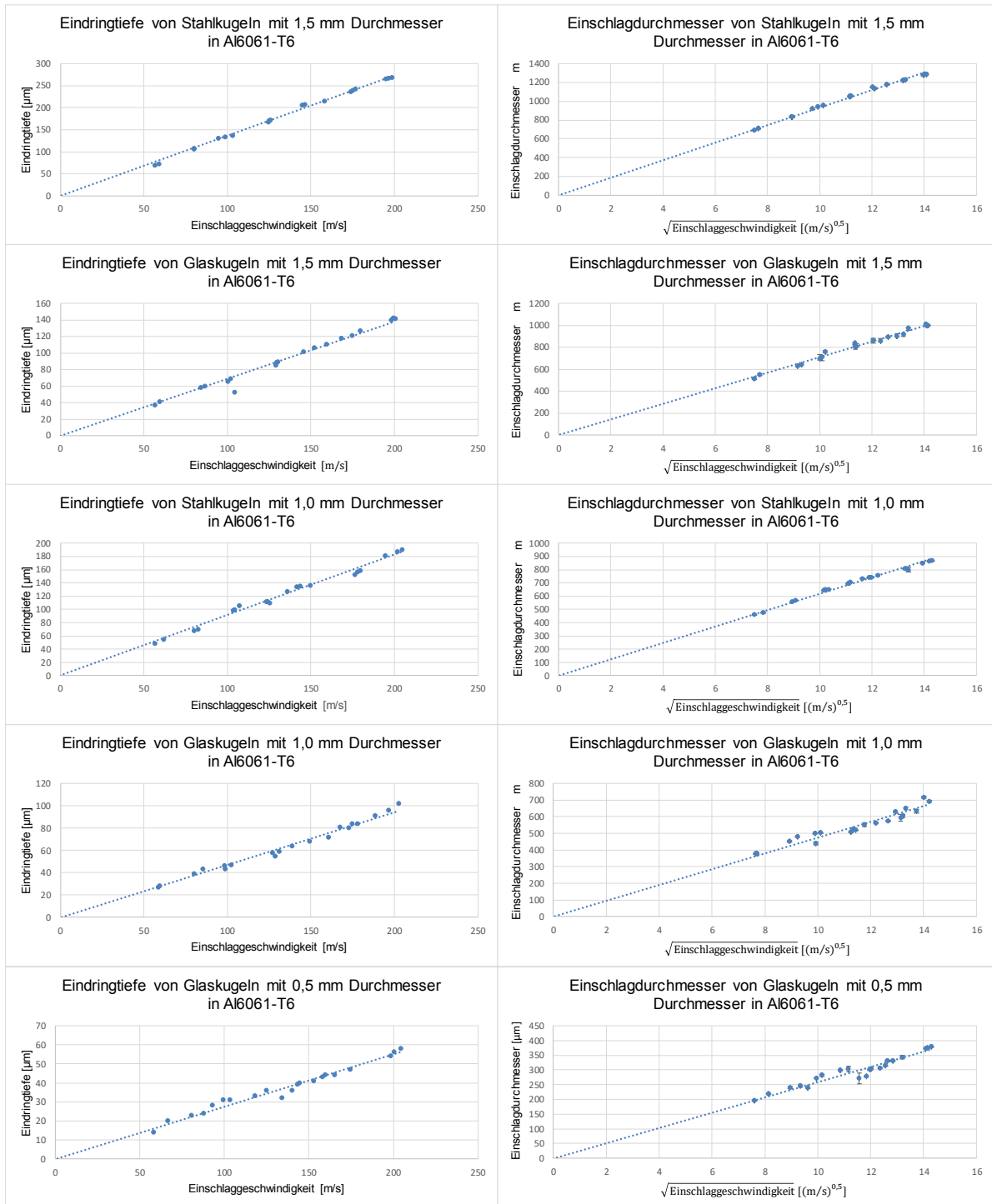


Abb. 18: Eindringtiefe und Einschlagdurchmesser für sphärische Stahl- und Glasprojekte unterschiedlicher Größe und Geschwindigkeit (Al6061-T6-Proben)

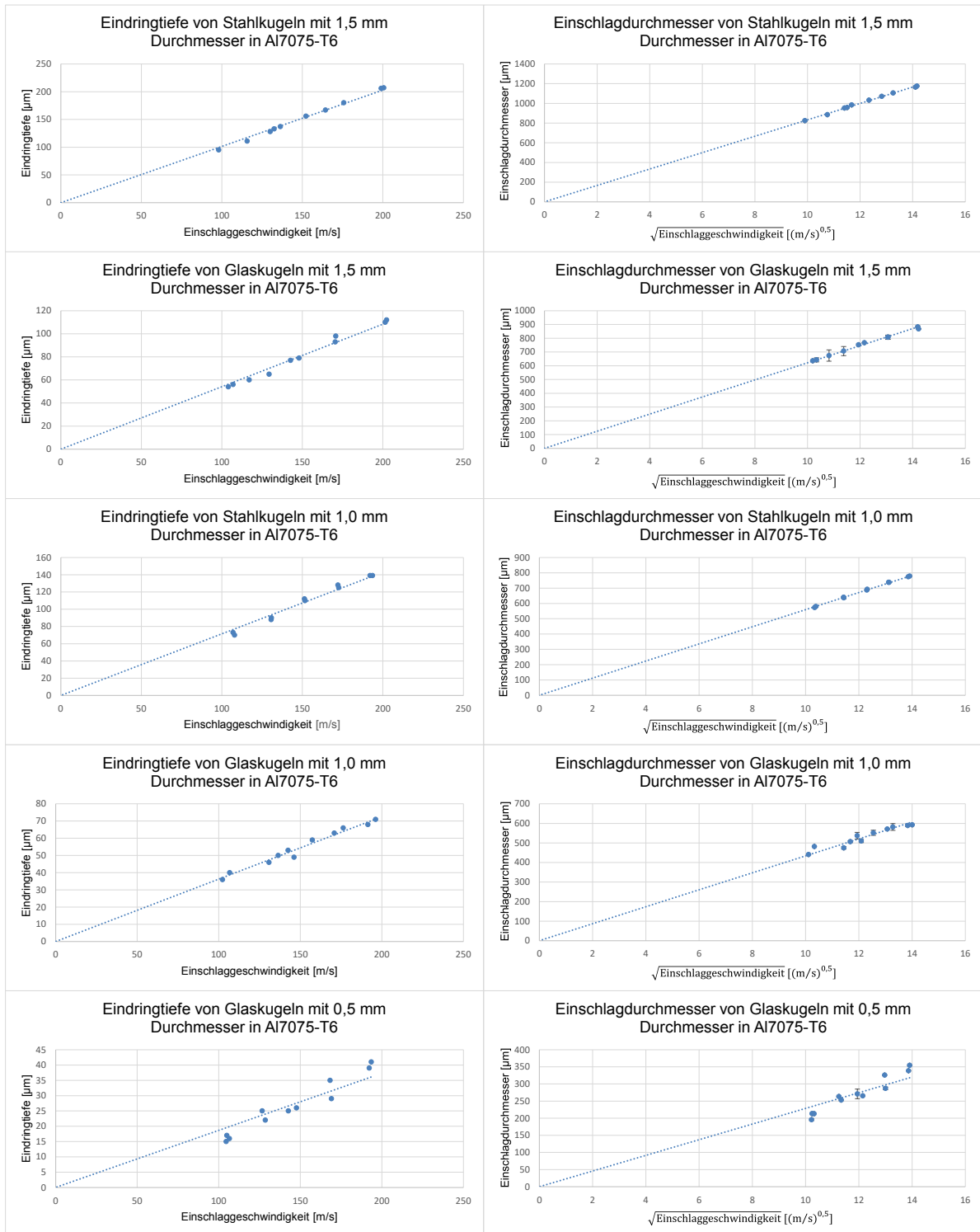


Abb. 19: Eindringtiefe und Einschlagdurchmesser für sphärische Stahl- und Glasprojekte unterschiedlicher Größe und Geschwindigkeit (Al7075-T6-Proben)

Zusätzlich zeigen die Diagramme in Abb. 18 und Abb. 19, dass sich unabhängig von Projektildurchmesser und Targetmaterial für Glaskugeln eine größere Streuung der Messwerte ergibt als für Stahlkugeln. Hierfür können zwei mögliche Gründe angeführt werden. Für die Stahlprojekteile wurden präzise gefertigte Stahlkugeln verwendet, wohingegen die Glaskugeln aus Strahlmittel entnommen wurden. Dadurch ergeben sich aller Wahrscheinlichkeit nach für die Glaskugeln größere Toleranzen hinsichtlich Form und Größe. Des Weiteren wurde bei den Experimenten mit Stahlkugeln jeweils dieselbe Stahlkugel verwendet. Bei den Experimenten mit Glaskugeln war es teilweise aufgrund der Durchsichtigkeit des Materials nicht möglich die Kugeln nach dem Experiment wiederzufinden. Die gilt insbesondere für Glaskugeln mit einem Durchmesser von 0,5 mm, welche auch die größte Streuung aufweisen. Hier war die Auffindbarkeit zusätzlich aufgrund der Größe der Projektile so gering, dass grundsätzlich für jeden Versuch neue Projektile verwendet wurden. Durch die Verwendung verschiedener Projektile haben etwaige fertigungsbedingte Abweichungen einen deutlich größeren Einfluss als bei Verwendung ein und desselben Projektils.

Zuletzt soll der Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe T und dem Einschlagdurchmesser D_{Imp} betrachtet werden. Hierzu wurde auf Basis der gemessenen Eindringtiefe T der theoretisch erzielte Einschlagdurchmesser $D_{berechnet}$ jeweils mit Hilfe der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen geometrischen Zusammenhänge (2–9) und (2–10) berechnet. Abb. 20 zeigt den prozentualen Unterschied zwischen gemessenem Einschlagdurchmesser D_{Imp} und dem theoretisch berechneten Einschlagdurchmesser $D_{berechnet}$. Daraus wird ersichtlich, dass unabhängig von allen anderen Größen der tatsächlich gemessene Einschlagdurchmesser D_{Imp} größer als der theoretisch berechnete Durchmesser $D_{berechnet}$ ist. Dies ist durch die zuvor beschriebene Messmethode bedingt. Der Einschlagdurchmesser D_{Imp} wird zwischen den Kraterrändern gemessen, also in der Ebene der höchsten Erhebung, wohingegen der Wert der Eindringtiefe T zwischen unberührter Oberfläche und Kraterboden gemessen wird. Somit ist der zur gemessenen Eindringtiefe T gehörige Einschlagdurchmesser, welcher dem berechneten entspricht, kleiner als der tatsächlich gemessene Einschlagdurchmesser D_{Imp} . Des Weiteren ist es nicht auszuschließen, dass tatsächlich im Verhältnis mehr Material zur Seite verdrängt wird als unter dem Projektil komprimiert wird. Nach Sundararajan [30] erhöht sich die Härte unter dem Einschlagkrater. Somit erscheint es plausibel, dass sich das Material an den Flanken des Einschlagkraters leichter verdrängen lässt als in Richtung Kraterboden. Dies würde dazu führen, dass es zu keiner geometrisch perfekten Kugelkalotte kommt. Da definitiv

messtechnisch bedingt die gemessene Eindringtiefe T nicht eindeutig einem Einschlagdurchmesser D_{Imp} zugeordnet werden kann, wurden in Abb. 18 und Abb. 19 beide Einschlaggrößen separat betrachtet. Aus diesem Grund wurde auch kein Verhältnis zwischen Kratervolumen und Einschlaggeschwindigkeit v angegeben, da die Bestimmung des Kratervolumens mit Hilfe der gemessenen Einschlaggrößen T und D_{Imp} nicht eindeutig möglich ist.⁷

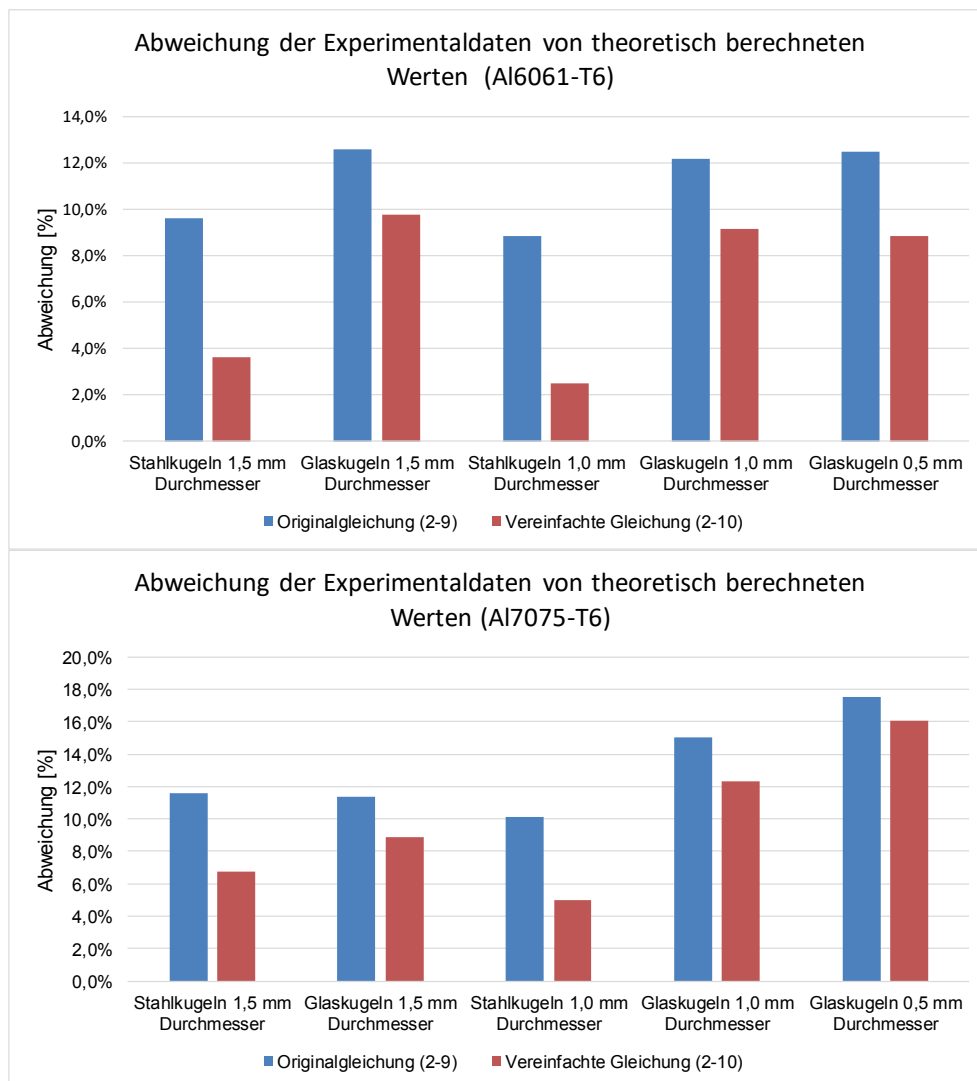


Abb. 20: Unterschied zwischen gemessenem Einschlagdurchmesser $D_{Einschlag}$ und basierend auf der gemessenen Eindringtiefe T theoretisch berechnetem Einschlagdurchmesser $D_{berechnet}$

⁷ Die Erläuterungen hinsichtlich des Unterschiedes zwischen gemessenen und berechneten Einschlaggrößen gehen über die oben angegebene Veröffentlichung des Autors hinaus.

2.3.3 Vergleich der Experimentaldaten mit Literaturwerten⁸

In diesem Kapitel sollen die zuvor hergeleiteten Zusammenhänge zwischen den Einschlaggrößen T und D_{Imp} sowie die gewonnenen Experimentaldaten mit ausgewählten in der Literatur zu findenden Ergebnissen verglichen werden. Hierbei wird zunächst auf den Ansatz des jeweiligen Autors eingegangen, anschließend die resultierende Formel betrachtet und diese mit den in Kapitel 2.3.1 hergeleiteten Zusammenhängen verglichen. In den Formeln werden dieselben Variablenbezeichnungen verwendet, die von den jeweiligen Autoren in ihren Arbeiten angegebenen wurden. Anschließend folgt ein Vergleich der mit der Formel des jeweiligen Autors berechneten Einschlaggrößen mit den in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Experimentaldaten. Der Großteil der behandelten Autoren gibt lediglich Formeln für eine der beiden Einschlaggrößen T und D_{Imp} an. Der Vergleich wird allerdings jeweils für die Eindringtiefe T und den Einschlagdurchmesser D_{Imp} durchgeführt. Die fehlenden Werte für die jeweils nicht von den Autoren behandelte Einschlaggröße werden, soweit nicht anders angegeben, basierend auf dem vereinfachten geometrischen Zusammenhang in Gleichung (2–10) aus den Ergebnissen nach Anwendung der angegebenen Formel berechnet. Es wird der vereinfachte geometrische Zusammenhang gewählt, da sich bei Anwendung des nicht vereinfachten geometrischen Zusammenhangs (Gleichung (2–9)) für die Berechnung der Eindringtiefe T aus dem Einschlagdurchmesser D_{Imp} mathematisch ein parabelförmiger Verlauf für T ergibt:

$$0 = T^2 - 2RT + \left(\frac{D_{Imp}}{2}\right)^2 \quad (2-14)$$

Dies deckt sich weder mit den Experimentaldaten noch mit den im Folgenden behandelten Erkenntnissen aus der Literatur. Abschließend werden die vorgestellten Gleichungen hinsichtlich ihrer verwendeten Variablen zur Berechnung der Einschlaggrößen T und D_{Imp} verglichen.

⁸ Dieses Kapitel geht über die Inhalte der oben angegebenen Veröffentlichung des Autors hinaus.

Hutchings

Hutchings [27] nimmt an, dass in guter Näherung die gesamte kinetische Energie eines Projektils dazu verwendet wird den resultierenden Einschlagkrater zu formen. Unter der Annahme eines sphärischen Projektils ergibt sich nach Hutchings [27] durch Gleichsetzen der kinetischen Energie des Projektils mit der zur Formung des Einschlagkraters geleisteten Arbeit die folgende Gleichung:

$$a = \sqrt{2}r\sqrt{v}\left(\frac{2\rho}{3P}\right)^{0,25} \quad (2-15)$$

Mit: a = Radius des Einschlagkraters, r = Projektilradius, v = Einschlaggeschwindigkeit, ρ = Dichte des Targetmaterials und P = dynamische Härte des Targetmaterials

Die dynamische Härte des Targetmaterials P wird nach Hutchings [27] für Al6061-T6 mit 1,15 GPa angegeben. Für Al7075-T6 sind keine Werte dokumentiert. Hutchings Gleichung [27] liefert dieselbe Abhängigkeit zwischen dem Einschlagdurchmesser D_{Imp} und der Einschlaggeschwindigkeit v wie die zuvor hergeleitete Gleichung (2-13). Der Autor geht davon aus, dass es sich bei der in Hutchings Gleichung [27] angegebenen Dichte des Targetmaterials um einen Schreibfehler handelt und stattdessen die Dichte des Projektils verwendet werden sollte. Würde die Dichte des Targetmaterials verwendet würde die Größe des Einschlagschadens bei gegebener Einschlaggeschwindigkeit und Targetmaterial nur vom Radius des Projektils abhängen. Beispielhaft würden somit Wachs- und Stahlkugeln mit gleichem Radius den gleichen Schaden verursachen. Diese Annahme des Schreibfehlers wird auch durch weitere in Hutchings Veröffentlichung [27] angegebene Gleichungen gestützt. Mit dieser Annahme ergibt sich, dass sich die in Gleichung (2-12) hergeleiteten Abhängigkeiten zwischen Einschlaggeschwindigkeit v und Projektilradius R sowie zwischen Einschlaggeschwindigkeit v und Projektilsdichte ρ mit der Gleichung von Hutchings [27] decken.

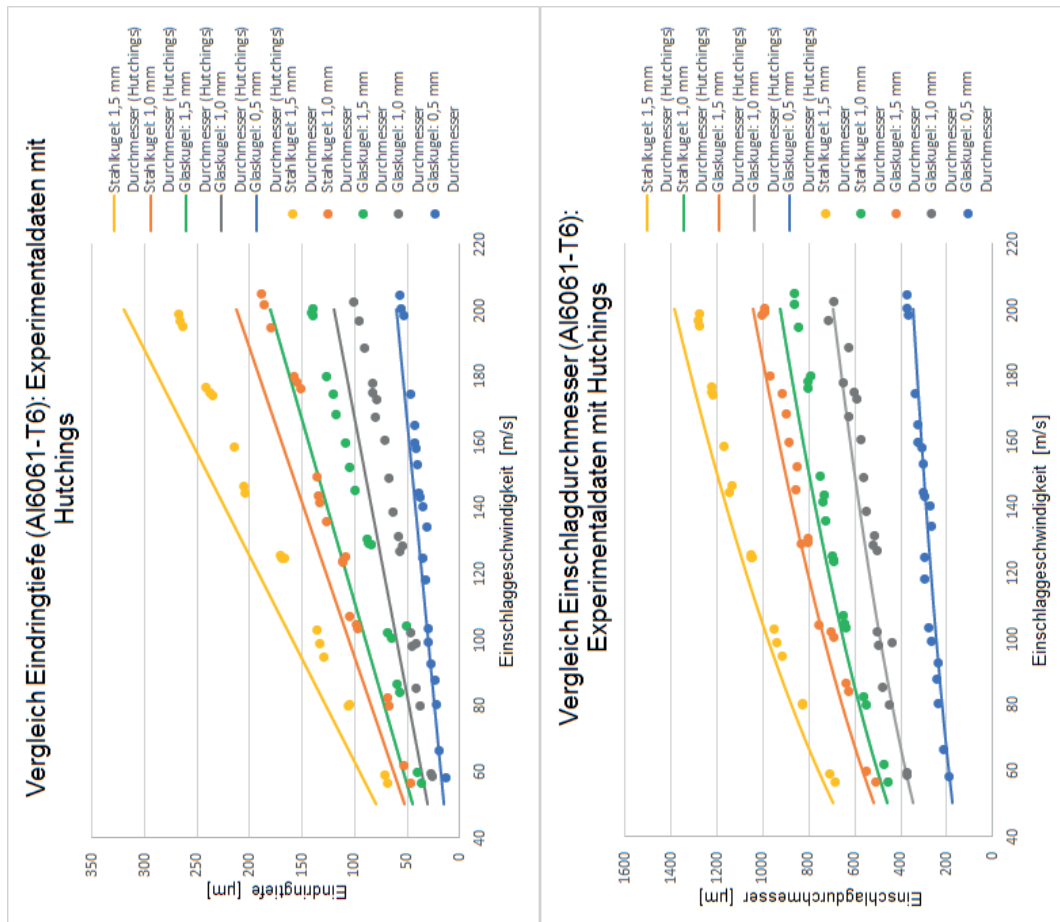


Abb. 21: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Hutchings [27] berechneten Werten

Abb. 21 zeigt den Vergleich zwischen den nach Hutchings [27] berechneten Werten und den Experimentaldaten. Hierbei wird für die jeweiligen Projektile grundsätzlich derselbe Farbcode verwendet. Die berechneten Werte werden dabei als Kurven dargestellt und die Experimentaldaten als Einzelpunkte. Da Hutchings [27] in seiner Arbeit keine Werte für die dynamische Härte für Al7075-T6 angibt, werden nur Werte für Al6061-T6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die nach Hutchings [27] berechneten Werte für den Einschlagdurchmesser D_{Imp} bis auf Einschläge mit Glaskugeln mit einem Durchmesser von 0,5 mm leicht über den Experimentaldaten liegen. Dies erklärt sich dadurch, dass nach Hutchings [27] Ansatz die gesamte kinetische Energie des Projektils für die Verformung aufgewendet wird, in der Realität aber durch das Zurückprallen des Projektils ein gewisser Anteil der kinetischen Energie im Projektil verbleibt. Hutchings [27] berechnet also den maximal möglichen Einschlagdurchmesser D_{Imp} bei einem „Steckenbleiben“ des Projektils. Allerdings wird der Unterschied teilweise durch die in Kapitel 2.3.2 beschriebene Messmethode „kompensiert“, da hier, wie angegeben, eigentlich ein etwas zu großer

Einschlagdurchmesser D_{imp} gemessen wird. Dies wird auch beim Vergleich der berechneten Eindringtiefe T deutlich. Hier findet keine messtechnisch bedingte „Kompensation“ statt. Aus diesem Grund liegen die nach Hutchings [27] berechneten Werte sichtbar über den Experimentaldaten. Insgesamt ist der Verlauf der berechneten Werte und der Experimentaldaten allerdings sehr ähnlich.

Sheldon et al.

Sheldon et al. [31] nehmen in ihrer Herleitung einer Formel für die Eindringtiefe eines sphärischen Partikels ebenfalls an, dass die kinetische Energie des Partikels in diejenige Arbeit umgesetzt wird, die bis zum Erreichen der maximalen Eindringtiefe am Targetmaterial verrichtet wird. Unter der Annahme, dass das durch den Einschlag verdrängte Material proportional zur dritten Potenz der Eindringtiefe ist, ergibt sich nach Sheldon et al. [31] die folgende Formel:

$$q^3 = \frac{D^3 v^3 (\rho_P)^{\frac{3}{2}}}{H_V^{\frac{3}{2}}} \quad (2-16)$$

Mit: q = Eindringtiefe, D = Projektildurchmesser, v = Einschlaggeschwindigkeit, ρ_P = Dichte des Projektils, und H_V = Vickershärte des Targetmaterials

Die zuvor hergeleiteten Formeln (2-7) und (2-8) zeigen auch hier eine direkte Übereinstimmung mit der Gleichung von Sheldon et al. [31] bezüglich den Proportionalitäten zwischen der Eindringtiefe T und der Einschlaggeschwindigkeit v sowie der Projektildichte ρ und dem Projektilradius R .

In Abb. 22 ist ein Vergleich zwischen den nach Sheldon et al. [31] berechneten Werten und den Experimentaldaten dargestellt. Es wurden hinsichtlich der Darstellung dieselben Konventionen verwendet, wie bereits zuvor beschrieben. Der Vergleich der nach Sheldon et al. [31] berechneten Werten mit den Experimentaldaten für die Eindringtiefe T zeigt, dass die auftretende Eindringtiefe T massiv von Sheldon et al. [31] überschätzt wird. Die Abweichung ist hierbei so groß, dass sich dies nicht mehr mit der Annahme erklären lässt, dass die gesamte kinetische Energie beim Einschlag umgewandelt wird. Es wird davon ausgegangen, dass der große Unterschied darauf beruht, dass Sheldon et al. [31] den vereinfachten Ansatz wählten, dass das verdrängte Material direkt proportional zur dritten Potenz der Eindringtiefe ist. Die signifikant höheren Werte ergeben sich auch für den Einschlagdurchmesser D_{imp} . Es ist allerdings zu erkennen, dass sich trotzdem dieselbe

Reihenfolge der Projektile ergibt und die Verläufe der Kurven ähnlich sind. Es handelt sich somit nur um einen konstanten Faktor, der zu den starken Abweichungen führt.

Sundrarajan

Sundrarajan [30] entwickelt in seiner Arbeit eine Formel für den Kraterdurchmesser auf Basis der Energieerhaltung. Hierbei wird die kinetische Energie eines sphärischen Projektils in Verformungsenergie umgewandelt. Die Verformungsenergie wird dazu aufgewendet den Krater zu schaffen und ist deshalb direkt proportional zum entstehenden Kratervolumen.

$$HU = \left(\frac{2\pi}{3}\right) r^3 \rho_P v^2 \quad (2-17)$$

Mit: H = Härte des Targetmaterials, U = Volumen des Einschlagkraters, r = Projektilradius, ρ_P = Dichte des Projektils und v = Einschlaggeschwindigkeit

Durch Einsetzen des nach Sundrarajan [30] vereinfachten geometrischen Zusammenhangs für das Volumen des Einschlagkraters,

$$U \approx \frac{\pi W^4}{64r} \quad (2-18)$$

Mit: U = Volumen des Einschlagkraters, W = Einschlagdurchmesser, r = Projektilradius

lässt sich Gleichung (2-17) folgendermaßen schreiben (es wurde die selbe Notation wie bei Sundrarajan [30] verwendet):

$$W = \left(\frac{128}{3}\right)^{0,25} r v^{0,5} \left(\frac{\rho_P}{H}\right)^{0,25} \quad (2-19)$$

Durch den direkten Vergleich mit den zuvor hergeleiteten Proportionalitätsformeln (2-12) und (2-13) kann auch hier gezeigt werden, dass die Proportionalitätsbeziehungen zwischen dem Einschlagdurchmesser D_{Imp} und der Einschlaggeschwindigkeit v , dem Projektilradius R und der Projektildichte ρ mit den Überlegungen von Sundrarajan [30] übereinstimmen.

Abb. 23 stellt den Vergleich zwischen den nach Sundrarajan [30] berechneten Werten und den Experimentaldaten dar. Es wurden dieselben Konventionen und derselbe Farbcode für die Darstellung verwendet wie bereits zuvor. Für die Berechnung der Werte nach Sundrarajan [30] wurden für die Targetmaterialien die in Tab. 3 angegebenen Werte der

Vickershärte in Pascal verwendet ($9,807 \cdot 10^6 \cdot H_V[-] \approx H_V[\text{Pa}]$). Der Vergleich zeigt, dass auch hier ähnlich wie bei Hutchings [27] der berechnete Einschlagdurchmesser D_{Imp} für die meisten Werte leicht oberhalb der Experimentaldaten liegt. Dies lässt sich wie bereits zuvor durch die Annahme von Sundararajan [30] erklären, dass die gesamte kinetische Energie für die Verformung verwendet wird, also der maximal mögliche Einschlagdurchmesser D_{Imp} berechnet wird. Auch hier wird der Abstand wieder durch die messtechnisch bedingten etwas größeren Werte für D_{Imp} verringert. Aus diesem Grund weichen auch die Werte für die Eindringtiefe T stärker von den Experimentaldaten ab, da hier ebenfalls der Maximalwert für T berechnet wird, allerdings keine messtechnische „Kompensation“ vorliegt. Die Graphen zeigen darüber hinaus eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Reihenfolge und des Verlaufs.

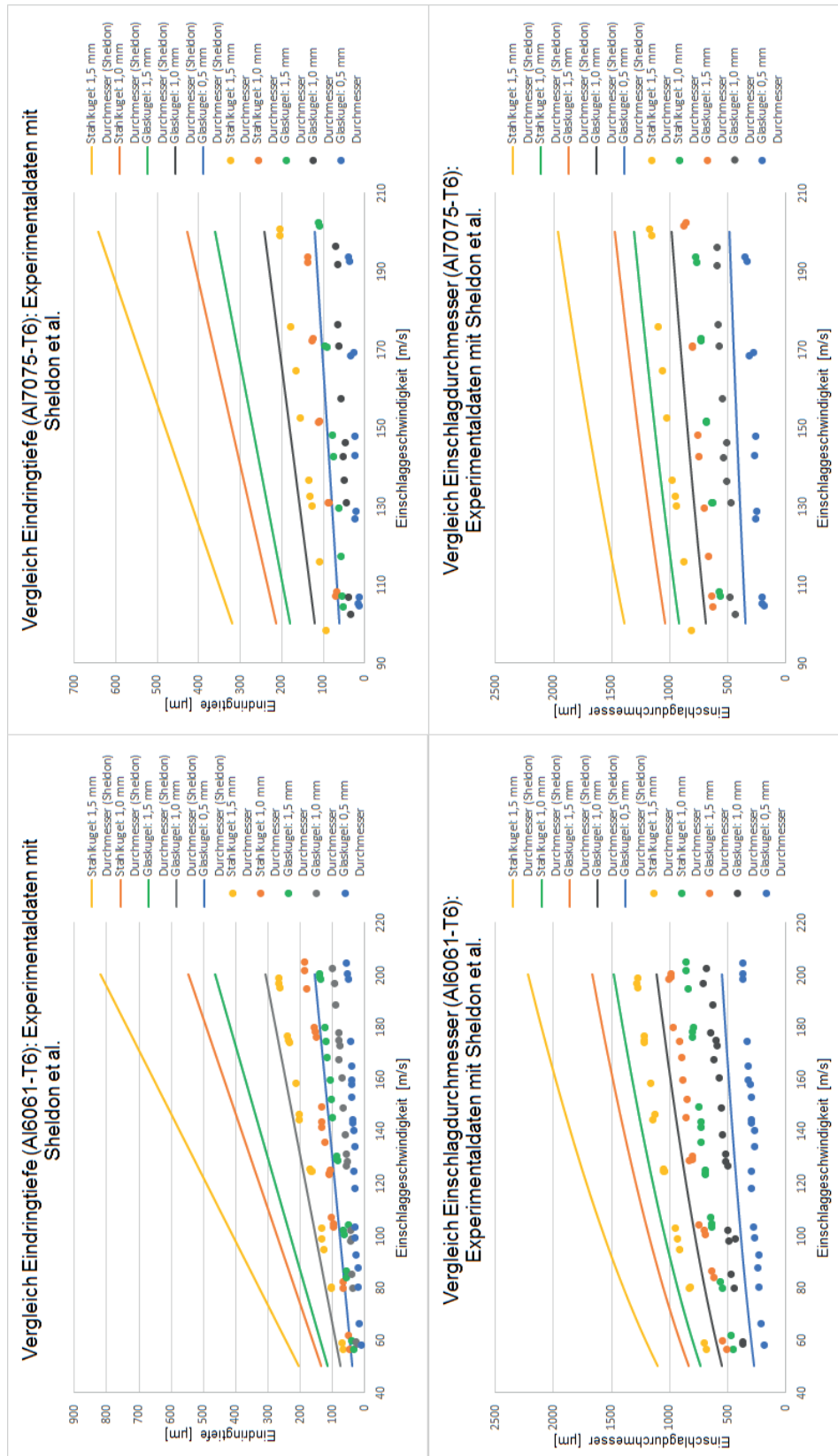


Abb. 22: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Sheldon et al. [31] berechneten Werten

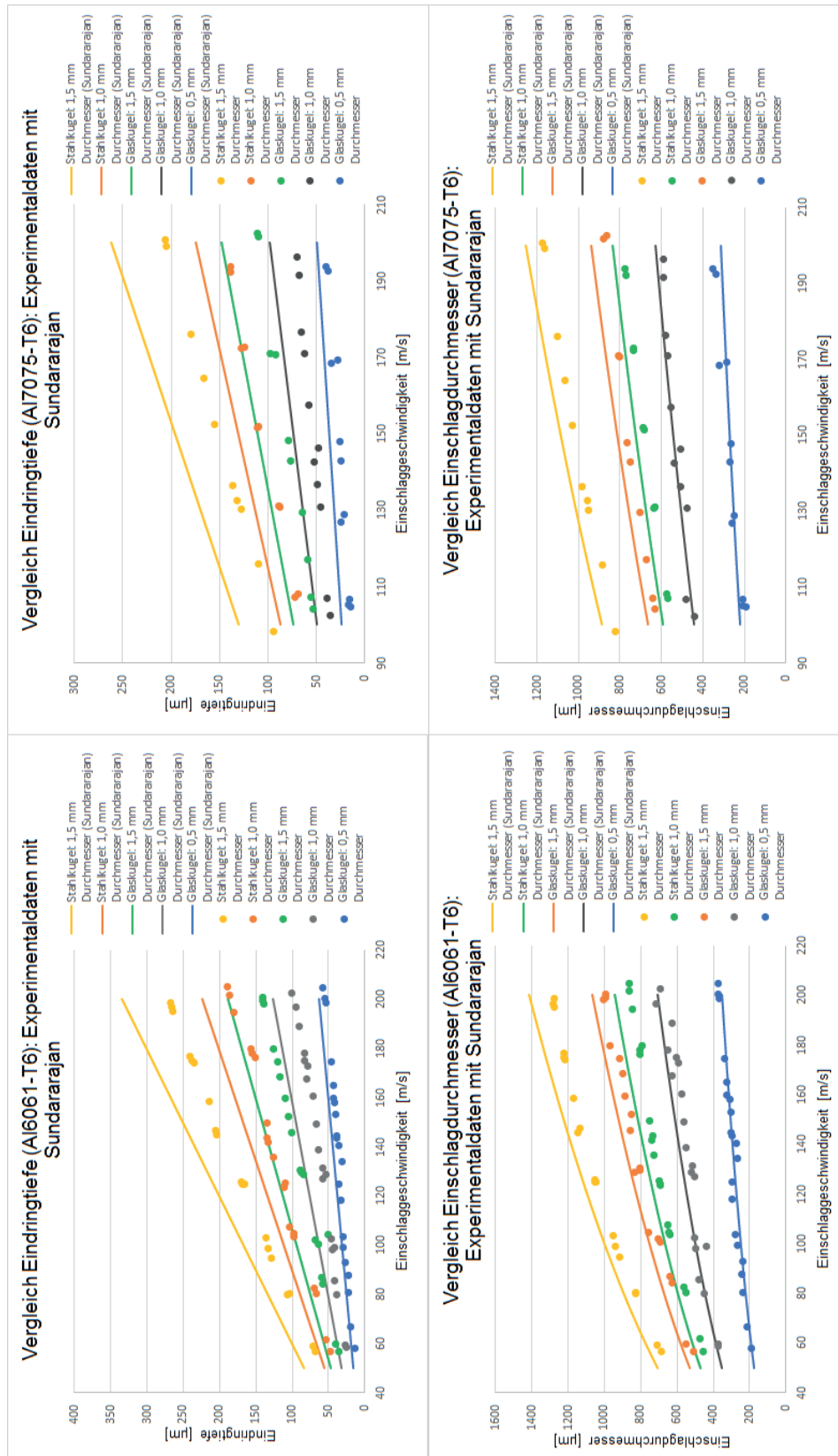


Abb. 23: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Sundararajan [30] berechneten Werten

Goldsmith

Goldsmith [32] wählt in seiner Arbeit den Ansatz über die Bewegungsgleichung eines Projektils. Er vernachlässigt dabei Reibung und elastische Deformationen im Targetmaterial. Als Größen, die der Bewegung entgegenwirken, setzt Goldsmith [32] den „mean flow pressure“ p_m und den anfänglichen Widerstand des Materials gegen Fließen an. Die maximale Eindringtiefe in Folge des Einschlags eines sphärischen Projektils ergibt sich durch Lösen der Gleichung mit der Annahme eines vollständigen Abbremsens des Projektils. Es ergibt sich:

$$x_{max} = v_0 \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi R p_m}\right)} \quad (2-20)$$

Mit: x_{max} = Maximale Eindringtiefe, v_0 = Einschlaggeschwindigkeit, m = Projektilmasse, R = Projektilradius und p_m = mittlerer Druck infolge des Einschlags

Auch hier können dieselben Proportionalitätsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe T und der Einschlaggeschwindigkeit v sowie der Projektilsdichte ρ und dem Projektilradius R wie in den zuvor hergeleiteten Formeln (2-7) und (2-8) identifiziert werden.

Für den in Abb. 24 dargestellten Vergleich der nach Goldsmith [32] berechneten Werte mit den Experimentaldaten wurde für den in der Formel verwendeten Druck p_m die nach Goldsmith [32] gültige Approximation von $p_m = 2,9 \cdot Yield\ strength$ verwendet. (Yield strength nach Herstellerangabe McMaster-Carr: Al6061-T6: 35000 psi; Al7075-T6: 61000 psi). Der Vergleich zeigt, dass die berechnete Eindringtiefe T wieder über der gemessenen Eindringtiefe T liegt. Auch hier kann abermals als Grund angeführt werden, dass nach der Formel von Goldsmith [32] ein vollständiges Abbremsen des Projektils vorausgesetzt wird und damit die maximal mögliche Eindringtiefe T berechnet wird. Der berechnete Einschlagdurchmesser D_{imp} liegt ebenfalls für nahezu alle Werte über den Experimentaldaten. Hier kann derselbe Grund wie zuvor angeführt werden. Hinsichtlich, Verlauf und Reihenfolge der Kurven zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung.

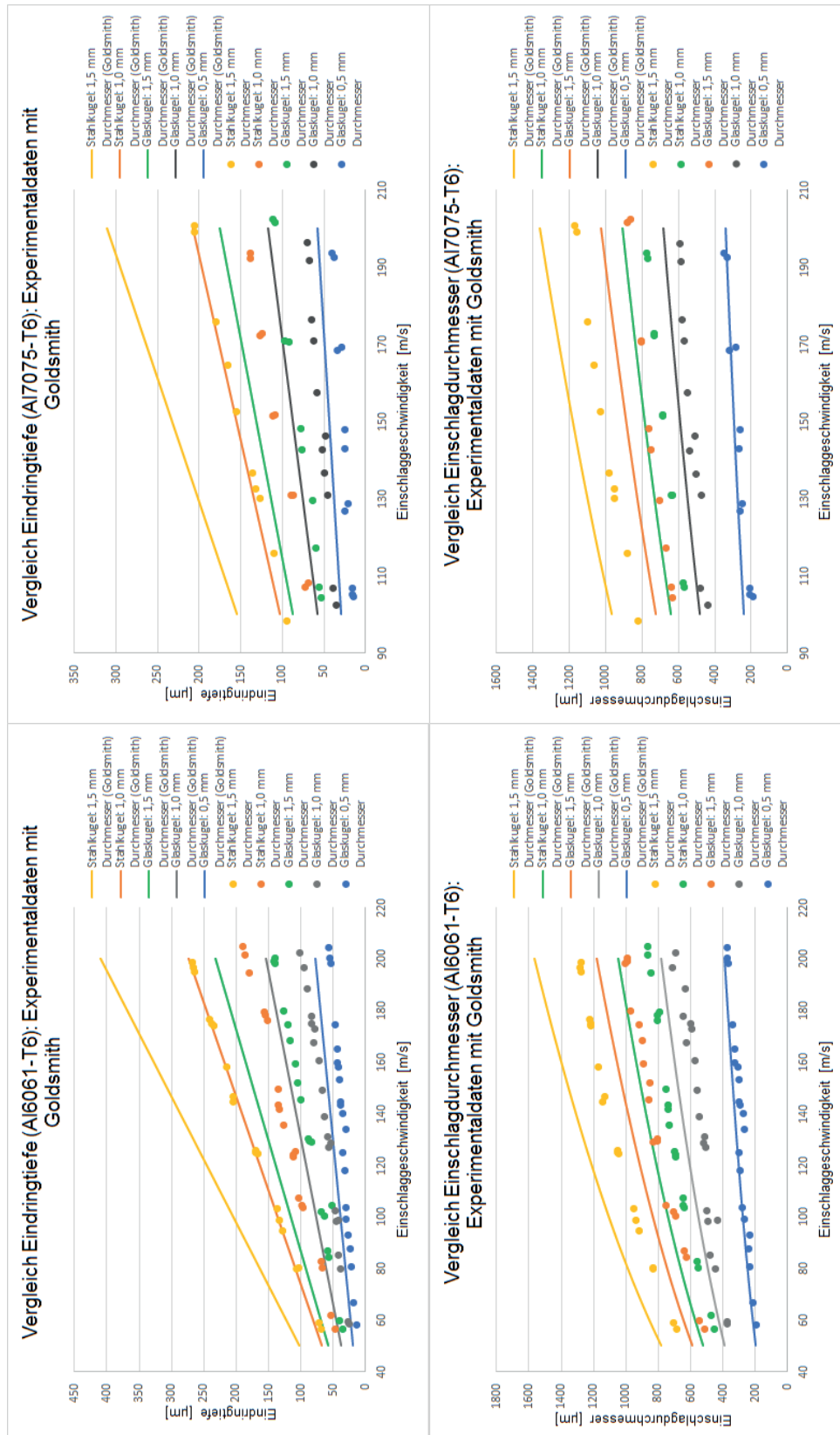


Abb. 24: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Goldsmith [32] berechneten Werten

Abb. 25 zeigt, dass es zu einem signifikant geringeren Unterschied zwischen den nach Goldsmith [32] mit dem in Gleichung (2–9) angegebenen nicht vereinfachten geometrischen Zusammenhang berechneten Werten für den Einschlagdurchmessers D_{Imp} und den Experimentaldaten kommt als zuvor. Es ergeben sich allerdings weiterhin zum größten Teil höhere Werte als für die Experimentaldaten. Der Verlauf der berechneten Werte verhält sich auch hier sehr ähnlich zu den Experimentaldaten.

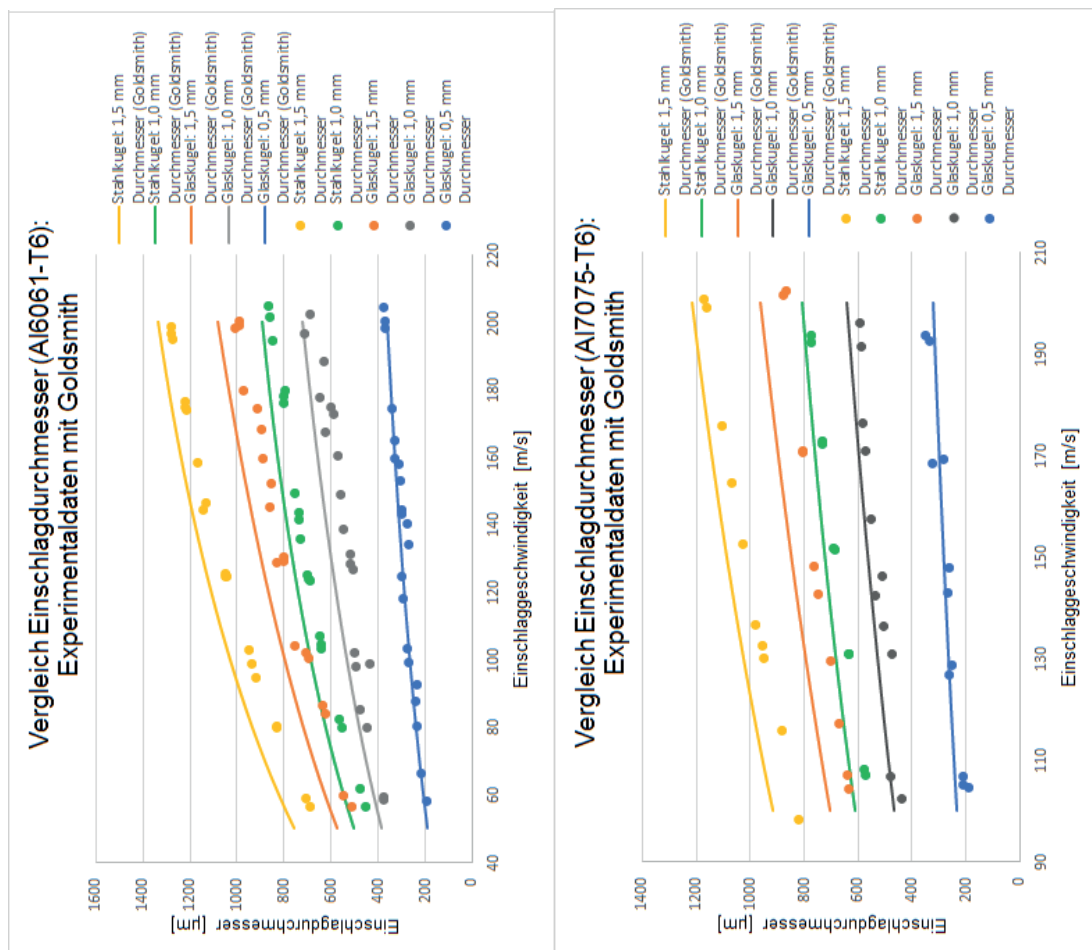


Abb. 25: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Goldsmith [32] berechneten Werten (nicht vereinfachter geometrischer Zusammenhang)

Ben-Ami et al.

Ben-Ami et al. [33] setzten in ihrer Arbeit die Impulsgleichung eines sphärischen Partikels an, um die maximal auftretende Eindringtiefe in Folge des Einschlags zu berechnen. Die Impulsänderung des Partikels wird hierbei durch die vom Material auf das Projektil in Folge des Einschlags wirkende Kraft hervorgerufen. Die Kraft ist hierbei direkt proportional zur Härte des Targetmaterials. Die maximale Eindringtiefe ergibt sich für ein vollständiges Abbremsen des Projektils zu:

$$y_{max} = \left(\frac{m_p}{\pi d_{eff} \cdot H} \right)^{0,5} \cdot U_{y0} \quad (2-21)$$

Mit: y_{max} = maximale Eindringtiefe, m_p = Projektilmasse, d_{eff} = effektiver Projektildurchmesser, H = Vickershärte des Targetmaterials und U_{y0} = Einschlaggeschwindigkeit

Die von Ben-Ami et al. [33] entwickelte Gleichung weist ebenfalls dieselben Proportionalitätsbeziehungen zwischen der Eindringtiefe T und der Einschlaggeschwindigkeit v , der Projektildichte ρ und dem Projektilradius R auf wie die zuvor hergeleiteten Formeln (2-7) und (2-8).

Abb. 26 zeigt den Vergleich zwischen den nach Ben-Ami et al. [33] berechneten Einschlaggrößen und den Experimentaldaten. Es wurden dieselben Konventionen für die Darstellung wie zuvor verwendet. Für die Berechnung der Eindringtiefe T wurde der bereits zuvor beschriebene Zusammenhang ($9,807 \cdot 10^6 \cdot H_v[-] \approx H_v[\text{Pa}]$) verwendet. Ähnlich wie bei den bereits behandelten Autoren wird hier die Eindringtiefe T überschätzt. Auch hier liegt der Grund darin, dass wieder ein vollständiges Abbremsen des Projektils angenommen wird. Beim Vergleich zwischen den Experimentaldaten und den berechneten Werten für den Einschlagdurchmesser D_{imp} zeigt sich ein deutlich geringerer Unterschied. Dies kann wieder anhand der beschriebenen Messmethode begründet werden. Allgemein zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs der gemessenen Werte mit den berechneten Werten.

Verwendet man auch hier für die Berechnung des Einschlagdurchmessers D_{imp} aus den nach Ben-Ami et al. [33] errechneten Werten den in Gleichung (2-9) angegebenen nicht vereinfachten geometrischen Zusammenhang, so ist in Abb. 27 zu erkennen, dass die errechneten Werte für den Einschlagdurchmesser D_{imp} in den meisten Fällen nahezu übereinstimmen. Die Überschätzung der Experimentaldaten wird hierbei also fast vollständig durch die messtechnisch bedingten zu großen Werte für den Einschlagdurchmesser D_{imp} kompensiert beziehungsweise teilweise sogar überkompensiert.

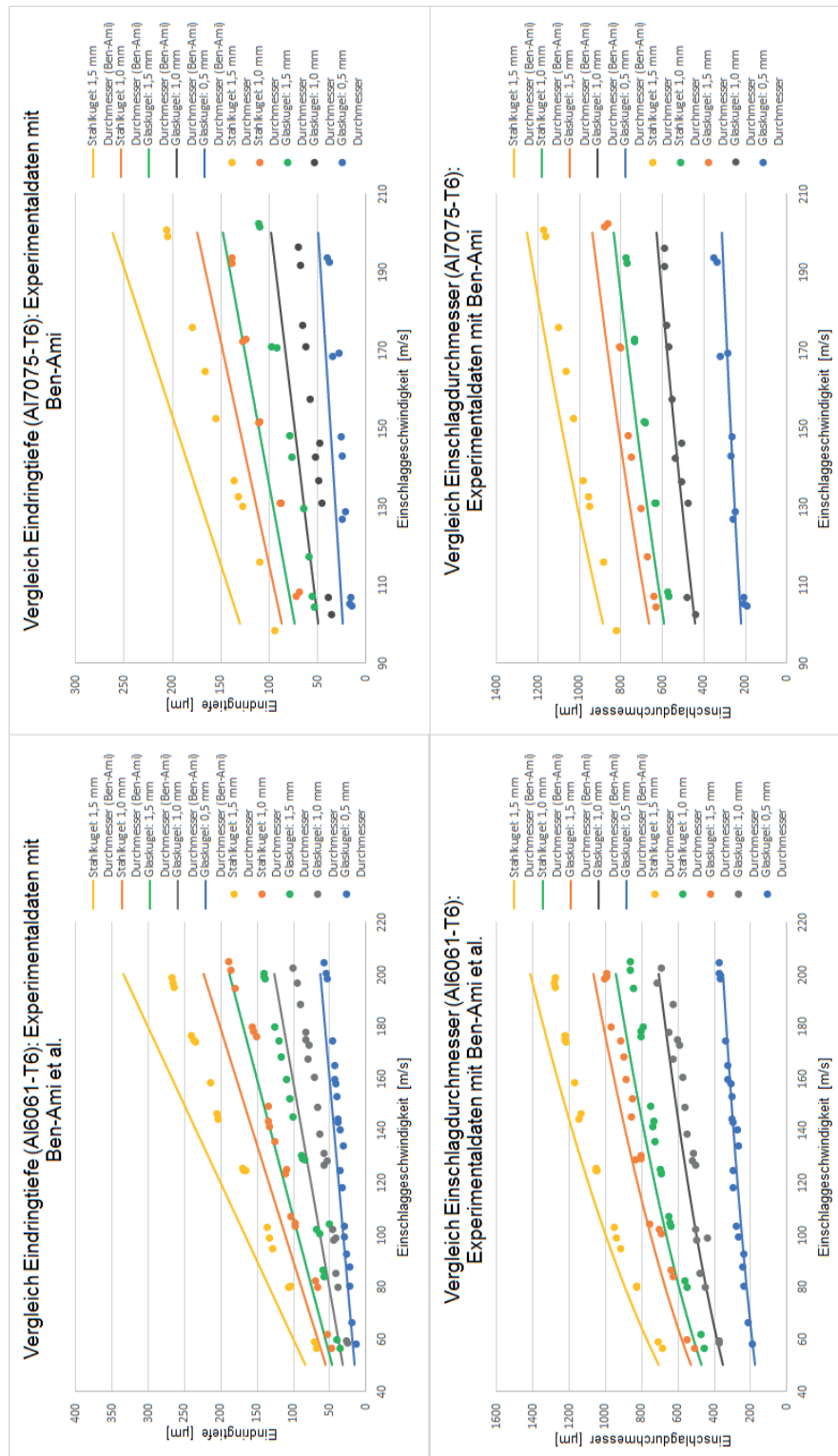


Abb. 26: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Ben-Ami et al. [33] berechneten Werten⁹

⁹ In Anlehnung an den Vergleich zwischen Literaturwerten und den für die Studienarbeit [91] durch den Autor zur Verfügung gestellten Experimentaldaten.

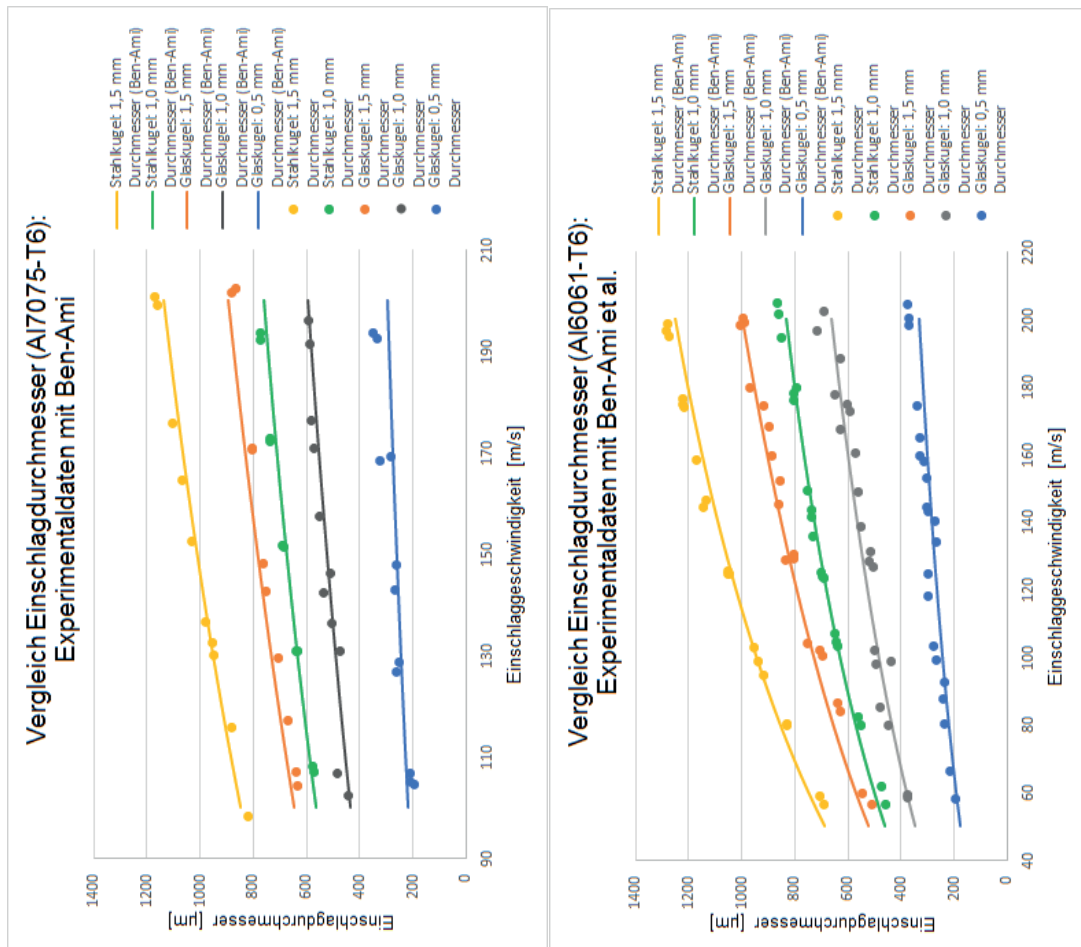


Abb. 27: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Ben-Ami et al. [33] berechneten Werten (nicht vereinfachter geometrischer Zusammenhang)

Huang et al.

Huang et al. [34] berechnen die maximale Eindringtiefe y_{max} in Folge des Einschlags eines sphärischen Projektils mit Hilfe des 2. Newton'schen Gesetzes. Ähnlich wie bei Ben-Ami et al. [33] wird auch hier eine Kraft angenommen, die in Folge des Einschlags auf das Projektil wirkt. Allerdings wird hier angenommen, dass die Kraft direkt proportional zu einem in Folge des Einschlags auftretenden Gegendruck ist:

$$y_{max} = \left(\frac{mV_{y0}^2}{\pi d_p P_n} \right)^{0,5} \quad (2-22)$$

Mit: y_{max} = maximale Eindringtiefe, m = Projektilmasse, V_{y0} = Einschlaggeschwindigkeit, d_p = Projektildurchmesser und P_n = konstanter Gegendruck infolge des Eindringens

Die Formel des maximalen Einschlagdurchmessers wird von Huang et al. [34] unter Anwendung der Annahme, dass die Eindringtiefe deutlich kleiner als der Projektilradius ist, direkt aus Formel (2–22) berechnet:

$$D_{max} \approx 2 \cdot \left(\frac{md_p V_{y0}^2}{\pi P_n} \right)^{0,25} \quad (2-23)$$

Mit: D_{max} = maximaler Kraterdurchmesser, m = Projektillmasse, d_p = Projektildurchmesser, V_{y0}^2 = Einschlaggeschwindigkeit und P_n = konstanter Gegendruck infolge des Eindringens

In den beiden von Huang et al. [34] entwickelten Formeln ergeben sich ein weiteres Mal dieselben Proportionalitätsbeziehungen bezüglich Eindringtiefe T , Einschlagdurchmesser D_{Imp} , Einschlaggeschwindigkeit v , Projektildichte ρ und Projektilradius R wie in den zuvor hergeleiteten Gleichungen (2–7), (2–8), (2–12) und (2–13).

Abb. 28 zeigt die Gegenüberstellung der Experimentaldaten mit den nach Huang et al. [34] berechneten Werten für die beiden Einschlaggrößen T und D_{Imp} . Es wurden für die Darstellung die bereits angegebenen Konventionen verwendet. Für die durchgeführten Berechnungen wird jeweils der Druck P_n benötigt. Huang et al. [34] geben in ihrer Arbeit hierfür weder eine Berechnungsgrundlage noch einen konkreten Wert an. Aus diesem Grund wird für diesen Wert der in [35] beschriebene dynamische Druck verwendet. Nach Johnson [35] berechnet sich der Druck für Aluminiumlegierungen zu: $P = 1,36 \cdot 3 \cdot Yield\ strength$ (Yield strength nach Herstellerangabe McMaster-Carr: Al6061-T6: 35000 psi; Al7075-T6: 61000 psi). Die Gegenüberstellung der Daten zeigt, wie bereits bei den Autoren zuvor, dass sich für die Eindringtiefe T aufgrund der in den Berechnungen von Huang et al. [34] getroffenen Annahme des vollständigen Abstoppens des Projektils höhere Werte als für die Experimentaldaten ergeben. Auch für den nach Huang et al. [34] berechneten Einschlagdurchmesser D_{Imp} ergeben sich zum größten Teil höhere Werte als in den Experimentaldaten. Teilweise scheinen aber die aufgrund der Annahme des vollständigen Abstoppens zu erwartenden höheren Werte durch den zuvor beschriebenen messtechnisch bedingten Einfluss auf den gemessenen Einschlagdurchmesser D_{Imp} kompensiert zu werden. Für den Verlauf der errechneten Kurven kann wieder eine gute Übereinstimmung mit den Experimentaldaten gefunden werden.

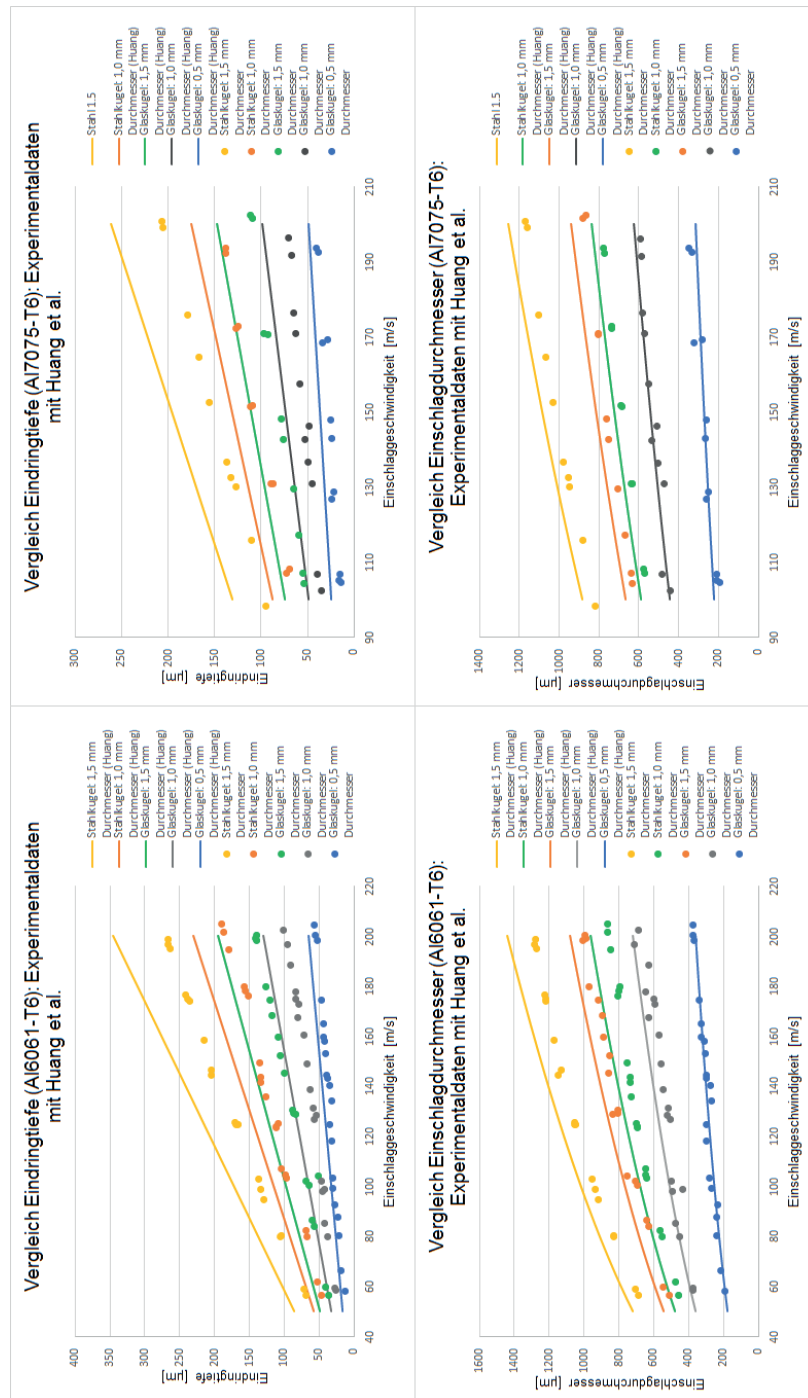


Abb. 28: Vergleich der Experimentaldaten mit den aus der Formel von Huang et al. [34] berechneten Werten¹⁰

¹⁰ In Anlehnung an den Vergleich zwischen Literaturwerten und den für die Studienarbeit [91] durch den Autor zur Verfügung gestellten Experimentaldaten.

Vergleich der vorgestellten Gleichungen

In diesem Abschnitt soll ein kurzer Vergleich der einzelnen vorgestellten Gleichungen der verschiedenen Autoren [27], [30], [31], [32], [33], [34] durchgeführt werden. In Tab. 4 sind die von den jeweiligen Autoren in ihren Gleichungen verwendeten Variablen mit dem zugehörigen Exponenten dargestellt. Bei allen behandelten Gleichungen handelt es sich um Produkte. Der Vergleich zeigt, dass die drei Variablen Projektilradius, Projektilgeschwindigkeit und Projektildichte unabhängig vom Autor in gleicher Weise in die Gleichungen eingehen. Des Weiteren ist der Aufstellung zu entnehmen, dass diese Variablen in gleicher Weise verwendet werden, wie in den in Kapitel 2.3.1 hergeleiteten Proportionalitäten. Da es sich in Kapitel 2.3.1 lediglich um eine Proportionalität handelt, wird von jedem Autor eine weitere Variable verwendet, um den Wert der Einschlaggrößen T und D_{imp} zu berechnen. Alle verwendeten Variablen beschreiben hierbei Eigenschaften des Targetmaterials und gehen für die jeweils berechnete Einschlaggröße mit der gleichen Proportionalität in die Gleichung ein. Die zusätzliche Variable entspricht somit einer Konstanten, die das Targetmaterial und dessen Eigenschaften beschreibt. Ohne Verwendung dieses weiteren Faktors wäre die Gleichung genau wie die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Proportionalitäten nur von Eigenschaften des Projektils abhängig. Somit ist diese weitere Variable zwingend notwendig, um die Gleichung dahingehend anzupassen, dass die Auswirkungen des realen Einschlagvorgangs abhängig vom verwendeten Targetmaterial abgebildet werden können.

Tab. 4: Vergleich der verwendeten Variablen in den vorgestellten Gleichungen für die Einschlaggrößen T und D_{Imp}

Eindringtiefe				
	Projektilradius	Einschlaggeschwindigkeit	Projektildichte	Weitere Variable
Hutchings [27]	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
Sheldon et al. [31]	r	v	$\rho^{0,5}$	$(1/H_V)^{0,5}$
Sundararajan [30]	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
Goldsmith [32]	r	v	$\rho^{0,5}$	$(1/p_m)^{0,5}$
Ben-Ami et al. [33]	r	v	$\rho^{0,5}$	$(1/H)^{0,5}$
Huang et al. [34]	r	v	$\rho^{0,5}$	$(1/P_n)^{0,5}$
Proportionalitätsbeziehung (2-7)	r	v	$\rho^{0,5}$	K.A.

Einschlagdurchmesser				
	Projektilradius	Einschlaggeschwindigkeit	Projektildichte	Weitere Variable
Hutchings [27]	r	$v^{0,5}$	$\rho^{0,25}$	$(1/P)^{0,25}$
Sheldon et al. [31]	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
Sundararajan [30]	r	$v^{0,5}$	$\rho^{0,25}$	$(1/H)^{0,25}$
Goldsmith [32]	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
Ben-Ami et al. [33]	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
Huang et al. [34]	r	$v^{0,5}$	$\rho^{0,25}$	$(1/P_n)^{0,25}$
Proportionalitätsbeziehung (2-12)	r	$v^{0,5}$	$\rho^{0,25}$	K.A.

2.4 Grundlagen für die Verschleißuntersuchungen durch Einschlag von Mondanalogmaterial

In diesem Kapitel sollen zuerst die Grundlagen zum Verständnis der Vorgänge beim Verschleiß durch Partikeleinschläge geschaffen werden. Daran schließt sich die Auswahl der bei experimentellen Untersuchungen verwendeten Korngrößen der JSC-1A-Partikel sowie die zugehörigen Einschlaggeschwindigkeiten an. Darauf aufbauend werden im nächsten Kapitel die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen getrennt nach Einschlaggeschwindigkeiten behandelt. Zusätzlich wird zwischen Einschlägen senkrecht zur Probenoberfläche und Einschlägen unter bestimmten Einschlagwinkeln unterschieden und die Ergebnisse jeweils separat betrachtet.

2.4.1 Grundlagen des Verschleißes durch Projektileinschlag

In diesem Abschnitt sollen die Vorgänge des Verschleißes durch Projektileinschlag und die damit einhergehende Erosion von Materialoberflächen betrachtet werden. Hierbei werden die Unterschiede dieser Vorgänge hinsichtlich duktiler und spröder Oberflächen genauer betrachtet sowie die Abhängigkeit der erosiven Vorgänge vom Einschlagwinkel des Verschleißmaterials gezeigt.

Duktile Oberflächen

Nach Bitter [36] wird die Erosion von Materialoberflächen einerseits durch wiederholte Deformation des Oberflächenmaterials durch die Einschläge und die damit einhergehende Steigerung der Härte hervorgerufen, wodurch das Material spröder und damit ein Herausschlagen von Material erleichtert wird. Andererseits tritt Erosion durch eine Schneidwirkung der einschlagenden Partikel auf. In der Realität finden insbesondere für duktile Materialien beide Vorgänge meist gleichzeitig statt. Die Schneidwirkung (Cutting) ist hierbei stark vom Einschlagwinkel des Materials abhängig, da ein kratzender beziehungsweise schneidender Verschleiß direkt von der Geschwindigkeitskomponente parallel zur Targetoberfläche beeinflusst wird [37]. Auch Finnie [38] führt zwei generelle Phänomene an, die für die Erosion von duktilen Materialien verantwortlich sind: Verdrängung des Probenmaterials sowie die zuvor erwähnte Schneidwirkung (Cutting). Insbesondere dem Materialabtrag für Einschläge im Bereich von 90° zur Oberfläche liegen nach Finnie [38] unter anderem die folgenden verschiedenen Mechanismen zugrunde. Aufgrund mehrfacher Einschläge kommt es zu Materialermüdung. Des Weiteren steigern wiederholte Einschläge die lokale Härte des Probenmaterials, wodurch ein spröderes Materialverhalten zu erwarten ist. Zusätzlich führen mehrfach nacheinander erfolgende Einschläge zu einer Steigerung der Oberflächenrauheit, das Probenmaterial wird unebener. Dies sorgt dafür, dass senkrecht zur Probenoberfläche eintreffende Projektile die verformte Oberfläche unter einem real flacheren, streifenden Winkel treffen. Finnie et al. [39] verweisen deshalb auf einen signifikanten Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Erosion durch senkrecht oder nahe 90° zur Probenoberfläche einschlagende Projektile. Bitter [37] zeigt in seiner Arbeit, dass die Erosion für einen Einschlagwinkel von ungefähr 15° (streifende Einschläge) zur Probenoberfläche für duktile Materialien maximal wird. Für flachere Winkel fällt die Erosion stark ab. Für größere Winkel hin zu senkrechten Einschlägen nimmt die Erosion dagegen langsamer ab und geht nicht auf null zurück. Ein ähnlicher Zusammenhang wird auch von Hutchings [27] beschrieben. Hutchings [27] verweist in seiner Arbeit darauf, dass das Auftreten der maximalen Erosion bei einem Einschlagwinkel zwischen ungefähr 20° und 30° für duktile Materialien gefunden wird. Wohingegen die Erosion für senkrechte Einschläge nur ungefähr ein Drittel des Maximums beträgt. Hutchings [27] führt zur Erklärung der Erosion von senkrechten Einschlägen das Modell eines elementaren Volumenelements ein. Nach seiner Aussage kommt es erst zur Erosion und damit zum Materialabtrag, sobald eine kritische Dehnung für dieses Volumenelement überschritten wird und damit das Fehlerkriterium für dieses

Volumenelement erfüllt ist. Die plastische Dehnung des Targetmaterials muss sich demnach erst aufbauen. Hierdurch kommt es nach Hutchings [27] anfangs zu keinem Materialabtrag und es findet noch keine Erosion statt. Die Experimentaldaten zeigen, dass sich nach dieser Phase ab einer bestimmten Menge eingeschlagenen Materials ein Steady State einstellt. Es kommt zu einem linearen Verlauf der Erosionsrate. Ein vergleichbarer Einschwingvorgang wird auch bei Neilson et al. [40] beschrieben. Bei Einschlägen senkrecht zur duktilen Probenoberfläche kommt es hier allerdings zuerst zu einer deutlichen Ablagerung von Material in der Oberfläche. Mit sinkendem Einschlagwinkel, bis hin zu streifenden Einschlägen, wird für den Beginn der Erosion insgesamt eine geringere Gesamtmasse an einschlagenden Partikeln benötigt. Ebenso sinkt die maximal in der Oberfläche abgelagerte Menge an Material. Mit steigender Einschlaggeschwindigkeit wird bei senkrechten Einschlägen eine geringere Masse an Partikeln benötigt bevor Erosion auftritt. Allerdings führt eine höhere Einschlaggeschwindigkeit auch zu einer anfänglich höheren Massenzunahme der Probe. Auch hier wird nach Abschluss der anfänglichen Materialablagerung unabhängig vom Einschlagwinkel ein linearer Zusammenhang zwischen auftretender Erosion und der Masse des einschlagenden Materials beschrieben. Finnie et al. [39] und Finnie [41] erklären das verzögerte Einsetzen der Steady State Erosion bei Einschlägen senkrecht zur Probenoberfläche damit, dass sich eine für eine gleichbleibende Erosion notwendige Oberflächenrauheit des Probenmaterials erst durch wiederholte Einschläge aufbauen muss. Auch in der Arbeit von Hutchings et al. [42] wird eine mögliche Materialablagerung vor Einsetzen der Steady State Erosion beschrieben. Das Auftreten von Materialablagerungen wird hier vor allem bei weichen Materialien und steilen Einschlagwinkeln beschrieben.

Für duktile Materialien tritt die maximale Erosion, wie zuvor beschrieben, bei kleinen Winkeln zwischen einschlagendem Material und Probenoberfläche auf (streifende Einschläge). Eine detaillierte Betrachtung dieser streifenden Einschläge auf die Probenoberfläche wurde von Hutchings et al. [43] durchgeführt. Nach Aussage der Autoren hängen die Form und die Größe des entstehenden Einschlagkraters entscheidend vom Einschlagwinkel ab. Bei flachen (streifenden) Einschlagwinkeln ist die deutliche Ausbildung einer sich über den Krater rand wölbenden Kraterlippe aus abgeschertem Material zu verzeichnen. Beim Vergleich [44] von getempertem und gehärtetem Material zeigt sich, dass eine gehärtete Oberfläche zu stärker ausgeprägten Lippen führt. Hutchings et al. [44] begründen dies damit, dass sich bei getemperten Materialien die Verformungsarbeit über ein größeres Volumen verteilt, wohingegen bei gehärteten Materialien lokale Scherwirkungen nahe der Oberfläche

auftreten. Die Variation des Einschlagwinkels [43] zeigt, dass es mit steigendem Einschlagwinkel ab etwa 25° zu einem Abreißen der Lippe kommt, was zu einem deutlichen Materialverlust führt. Wird der Einschlagwinkel weiter gesteigert tritt ab 40° kein Abreißen der Lippe mehr auf. Allerdings unterscheiden sich die entstehenden Krater nach Aussage von Hutchings et al. [43] deutlich von den Kratern bei flacheren Einschlagwinkeln. Ebenfalls sorgt eine höhere Einschlaggeschwindigkeit für ein leichteres Abreißen der Lippe [43], [44]. Für das Abscheren einer Kraterlippe führen Hutchings et al. [44] zwei Mechanismen an. Aufgrund der Adhäsion zwischen Projektil und Lippe kann es zu einem Abreißen der Lippe kommen. Des Weiteren kann die Verdrängung des Materials am Fuß der Kraterlippe den Abriss ermöglichen. Hutchings et al. [43] zufolge kann ein Abreißen der Kraterlippe ebenfalls durch Mehrfacheinschläge hervorgerufen werden, da die Lippe nur durch ein schmales Band mit der Probenoberfläche verbunden ist. Dadurch liegt bereits eine deutliche Materialschwächung vor. Die erodierte Masse wird hierbei signifikant von der Lippenmasse bestimmt.

Der Einfluss der Projektilgeometrie auf die Erosion wurde von Chen et al. [45] mit Hilfe von Simulationen untersucht. Hierbei wurde zwischen sphärischen, quaderförmigen und dreieckigen Projektilen bei einem Einschlagwinkel von 40° unterschieden. Einzeleinschläge von dreieckigen Projektilen erzeugten hierbei den größten Materialverlust, da sie beim Einschlag die kleinste Kontaktfläche besitzen und damit die größte Spannung im Targetmaterial erzeugen. Der geringste Materialverlust wurde für quaderförmige Körper gemessen, da sie beim Einschlag die größte Kontaktfläche besitzen. Bei Mehrfacheinschlägen wird der größte Materialverlust wieder von dreieckigen Geometrien erzeugt. Allerdings erzeugen hier die quaderförmigen Projektile eine stärkere Erosion als die sphärischen Projektile. Als Grund wird angeführt, dass durch den wiederholten Einschlag die Oberflächenrauheit steigt und damit die pflügenden Effekte verstärkt werden. Zusätzlich steigt aufgrund der Oberflächenrauheit der reale Einschlagwinkel. Nach Chen et al. [45] hat die Änderung der Orientierung eines quaderförmigen Projektils bei Mehrfacheinschlägen dagegen aufgrund der durch die Einschläge erhöhten Oberflächenrauheit nur geringe Effekte.

Spröde Oberflächen

Nach Bitter [36] ist der hauptsächliche Effekt, der für die Erosion von spröden Materialien verantwortlich ist, eine wiederholte Deformation der Oberfläche. Spanende Effekte (Cutting) können bei spröden Materialien nahezu vernachlässigt werden. Die maximale Erosionsrate

für spröde Materialien liegt nach Bitter [36] bei Einschlägen senkrecht zur Probenoberfläche, wobei noch relativ hohe Werte bis zu einem Bereich von 70° (steiler Einschlag) erreicht werden. Unterhalb von 20° (streifender Einschlag) findet nahezu keine Erosion mehr statt. Das Auftreten der maximalen Erosion bei Einschlägen senkrecht zur Oberfläche wird ebenfalls durch die Arbeiten von Neilson et al. [40] und Hutchings et al. [42] bestätigt. Sparks et al. [46] betrachteten in ihrer Arbeit ebenfalls die Winkelabhängigkeit der Erosion von spröden Materialien (Glaskeramik). Bei der Untersuchung des Einschlags von Glaskugeln zeigt sich auch hier ein deutlicher Anstieg der Erosion bei einem Einschlagwinkel von ca. 90° zur Oberfläche, sobald eine für die Erosion nötige kritische Geschwindigkeit der Projektile überschritten wird. Zudem wird für diese Projektile ebenfalls wie zuvor für duktile Materialien von einer anfänglichen Ablagerung des Projektilmaterials berichtet. Für runde Partikel ergibt sich ein sprunghafter Anstieg der Erosion bereits für kleinere Einschlagwinkel von $45^\circ - 60^\circ$. Dieser tritt in der Studie nur bei einer Einschlaggeschwindigkeit von 44 m/s auf. Bei einer höheren Geschwindigkeit konnte dieser Sprung nicht gefunden werden. Der Vergleich mit kantigen Partikeln bei einem Einschlagwinkel von 30° liefert nach Sparks et al. [46], dass runde Partikel eine deutlich geringere Erosion als eckige Partikel erzeugen. Allerdings kommt es bei runden Partikeln unter diesem Einschlagwinkel zu einem abrupten Anstieg der Erosion ab dem Überschreiten einer kritischen Einschlaggeschwindigkeit, welche im Bereich von ungefähr 50 m/s liegt. Dieser Anstieg ist für eckige Projektile nicht zu verzeichnen. Die geringe Erosionsrate der runden Quarzsandpartikel wird damit erklärt, dass unterhalb der kritischen Größen für ein Absplittern von Bruchstücken mehrere Einschläge an derselben Stelle nötig sind. Auch Finnie [41] zeigt in seiner Arbeit auf, dass beim Einschlag von Stahlkugeln auf Glasoberflächen anfangs nur ringförmige Risse auf der Oberfläche entstehen. Erst bei weiteren Einschlägen wird Materialabtrag erwartet und es kommt zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit. Wiederhorn et al. [47] belegen in ihrer Arbeit ebenfalls den Einfluss der Projektilgeometrie auf die Erosion von spröden Oberflächen. Spitze Projektile führen zu einem Abplatzen oder Herausschlagen von Teilen der Oberfläche. Wohingegen beim Einschlag der flachen Seite eines Projektils die dafür nötigen Verformungen und Spannungen weniger konzentriert an einem Punkt auftreten. Des Weiteren wird angeführt, dass die Steigerung der Bruchzähigkeit des Materials ebenfalls zu einer geringeren Anzahl an Einschlägen führt, die in der Lage sind Material aus der Oberfläche herauszuschlagen.

2.4.2 Bestimmung der untersuchten Korngrößen und Geschwindigkeiten¹¹

Die zuvor bereits behandelten experimentellen Studien [14], [20], [21], in denen Mondanalogmaterial verwendet wurde, um den durch Partikeleinschlag hervorgerufenen Verschleiß zu untersuchen, zeigen, dass bereits bei verhältnismäßig geringen Einschlaggeschwindigkeiten von bis zu 105 m/s eine signifikante Schädigung von technischen Oberflächen und Systemen zu erwarten ist. Verschiedene durchgeführte Simulationen [17], [18], [19] zeigen, dass während lunarer Landevorgänge durchaus auch deutlich höhere Einschlaggeschwindigkeiten zu erwarten sind. Dabei wurden insbesondere die CFD-Simulationen von Lane et al. [17] über einen großen Bereich an unterschiedlichen Korngrößen für verschiedene Landerhöhen über Grund durchgeführt. Die Ergebnisse von Lane et al. [17] zeigen, dass die aufgewirbelten Partikel im untersuchten Korngrößenbereich (10 – 500 μm) Geschwindigkeiten zwischen ungefähr 200 m/s und 1500 m/s erreichen können. Des Weiteren zeigt die Studie eine gute Übereinstimmung der Partikelgeschwindigkeiten für Partikeldurchmesser zwischen ungefähr 250 μm und 500 μm unabhängig von der jeweiligen simulierten Landerhöhe über Grund. Für kleinere Korngrößen unterscheiden sich die jeweils erreichten Partikelgeschwindigkeiten je nach simulierter Landerhöhe über Grund teilweise deutlich. Je nach durchgeführter Simulation variieren die maximal erreichten Geschwindigkeiten und die zugehörigen Korngrößen von ungefähr 900 m/s bei einem Partikeldurchmesser von 50 μm bis zu 1500 m/s bei einem Partikeldurchmesser von 25 μm .

¹¹ Dieser Abschnitt ist eine erweiterte und aktualisierte Version des Motivationsteils der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [89].

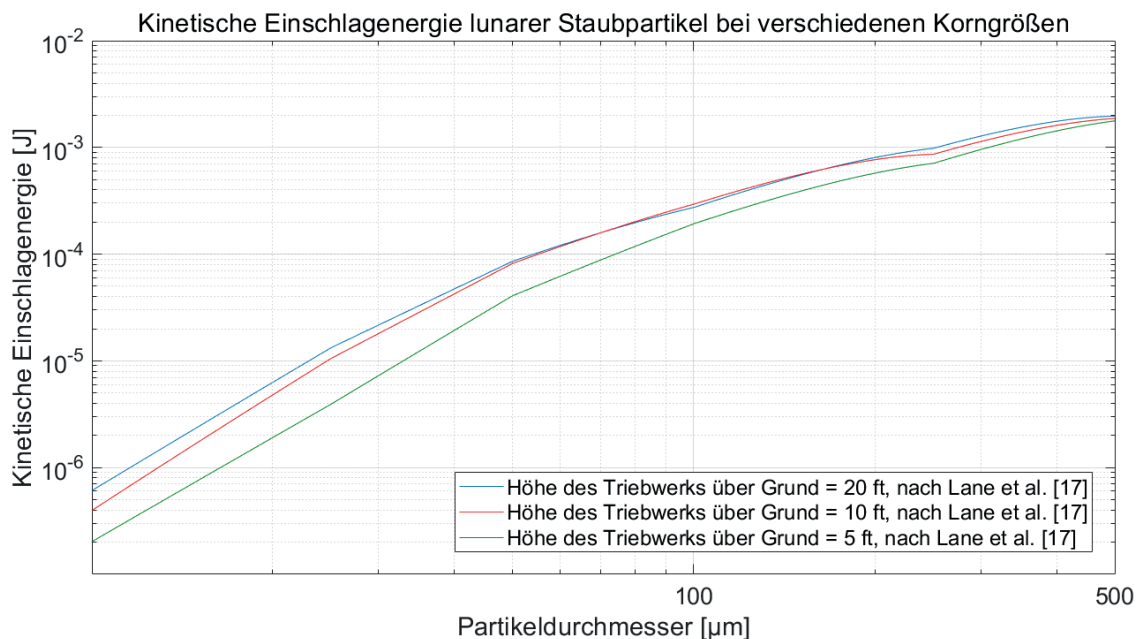


Abb. 29: Kinetic Energy lunarer Regolithpartikel, basierend auf den Simulationen von Lane et al. [17]

Abb. 29 zeigt die kinetische Energie eines einzelnen lunaren Regolithpartikels basierend auf den von Lane et al. [17] errechneten Korngrößen und Geschwindigkeiten. Hierzu wurden sphärische Regolithpartikel mit einer Dichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ [11] angenommen. Obwohl die Geschwindigkeit der Partikel hin zu kleineren Partikeldurchmessern zunimmt, zeigt die Abbildung deutlich, dass die maximale kinetische Energie der Partikel unabhängig von der jeweiligen Simulation [17] ihren Maximalwert beim größten in der Studie [17] betrachteten Partikeldurchmesser von 500 µm annimmt. Sie nimmt deutlich mit kleiner werdendem Partikeldurchmesser ab. Des Weiteren kann mit der Proportionalitätsbeziehung (2–12) für den zu erwartenden Schaddurchmesser D_{Imp} beim Einschlag eines sphärischen Vollkörpers gezeigt werden, dass mit den von Lane et al. [17] berechneten Werten großflächigere Schäden für die langsameren aber größeren Partikel, unabhängig von der jeweiligen Simulation, zu erwarten sind, weshalb in dieser Studie primär größere Partikel betrachtet werden sollen. Auf dieser Grundlage sowie den von Lane et al. [17] durchgeführten Berechnungen und dem in Kapitel 2.1 behandelten Leistungsspektrum des elektromagnetischen Beschleunigers werden die in der vorliegenden experimentellen Studie verwendeten Partikeldurchmesser des Mondanalogmaterials JSC-1A auf Durchmesser größer als 250 µm beschränkt. Diese Beschränkung gewährleistet durch die damit verbundene Begrenzung der zu erzielenden Projektilgeschwindigkeit auf maximal ungefähr 360 m/s einen immer noch effizienten Einsatz des Beschleunigers im Hinblick auf den Spulenverschleiß. Neben den technischen Randbedingung des Versuchszustandes sowie der

guten Übereinstimmung der errechneten Werte der verschiedenen Simulationen [17] für Durchmesser größer als 250 μm , kann zusätzlich mit der Proportionalitätsbeziehung (2–7) für die zu erwartende Eindringtiefe T gezeigt werden, dass die maximale Eindringtiefe für die von Lane et al. [17] berechneten Geschwindigkeiten, unter der Annahme eines sphärischen Vollkörpers und unabhängig von der jeweiligen Simulation, für Projektile mit einem Durchmesser größer als 250 μm zu erwarten ist.

2.5 Senkrechte Einschläge bei einer Geschwindigkeit von 200 m/s¹²

Im ersten Teilversuch dieser Arbeit, der sich direkt mit dem Verschleiß durch den Einschlag von Mondanalogmaterial beschäftigt, sollen die Auswirkungen der Einschläge des zuvor bereits eingeführten Mondanalogmaterials JSC-1A (siehe Kapitel 2.2) auf verschiedene technische Oberflächen untersucht werden. In den Versuchen wurden Partikel des Mondanalogmaterials mit einem Korngrößenbereich zwischen 450 μm und 560 μm verwendet, da hier nach Abb. 29 die größte Einschlagenergie pro Partikel zu erwarten ist. Die verwendeten Korngrößen wurden hierbei direkt aus dem Originalmaterial durch Aussieben gewonnen. Der gewählte Korngrößenbereich und die zugehörige Einschlaggeschwindigkeit basieren hierbei auf den im vorigen Kapitel behandelten Berechnungen von Lane et al. [17]. Für diesen Korngrößenbereich wurde deshalb eine durchschnittliche Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s gewählt. Für die im Folgenden behandelten Experimente wurde der in Kapitel 2.1 beschriebene elektromagnetische Wirbelstrombeschleuniger im Betriebsmodus mit dem 10 μF -Kondensator verwendet. In den durchgeführten Experimenten wurde die Gesamtmasse pro Schuss, die auf die verwendeten Probenmaterialien Al6061-T6, Glas und Polycarbonat (Makrolon®) auf je ungefähr 10 mg JSC-1A begrenzt. Die Begrenzung der Gesamtmasse ermöglicht es die Partikel sauber auf dem für den Beschleunigungsvorgang verwendeten Sabot zu platzieren. Die Auswahl der Probenmaterialien wurde auf der Grundlage früherer Verschleißversuche mit JSC-1A getroffen [14], [20], [21], [24]. Zudem ermöglicht diese Auswahl neben der Vergleichbarkeit mit früheren experimentellen Studien allgemeine Aussagen über das Verhalten duktiler sowie spröder Werkstoffe zu treffen. Des

¹² Dieses Kapitel ist eine erweiterte und aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [89]. Signifikante inhaltliche Ergänzungen, die über den bereits veröffentlichten Text hinausgehen, sind in der Arbeit als solche kenntlich gemacht.

Weiteren kann ein direkter Vergleich der Auswirkungen des Einschlags von Mondanalogmaterial anhand optischer Messgrößen untersucht werden.

2.5.1 Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen

Die Untersuchung der verschiedenen Targetmaterialien wurde jeweils mit quadratischen Proben mit einer Stärke von 3 mm und einer Kantenlänge von 50 mm durchgeführt. Sämtliche Proben wurden direkt wie vom Hersteller bezogen verwendet und keiner weiteren Bearbeitung unterzogen. Vor dem Beschuss mit JSC-1A wurden sowohl die Glas- wie auch die Al6061-T6-Proben mit Isopropanol gereinigt, wohingegen für die Makrolon®-Proben destilliertes Wasser zur Reinigung verwendet wurde.

Der durch den Beschuss mit dem Mondanalogmaterial JSC-1A auftretende Verschleiß wurde durch die Änderung makroskopischer Oberflächeneigenschaften der drei Probenmaterialien charakterisiert. Für die beiden optischen Medien wurde die Änderung der optischen Transmission durch den Beschuss verwendet. Hierzu wurden die Proben jeweils nach dem Beschuss mit JSC-1A mit einem Spektrophotometer (Perkin Elmer UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19) vermessen und die verbleibende Transmission mit einer unbeschossenen, gereinigten Probe verglichen. Die beschossenen Proben hingegen wurden nach dem Beschuss nicht erneut gereinigt und wurden mit etwaigen durch den Beschuss anhaftenden Partikeln vermessen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da anzunehmen ist, dass die Reinigung technischer Oberflächen während einer Mission auf dem Mond nicht immer gewährleistet werden kann, insbesondere bei rein robotischen Missionen oder weit verteilten Infrastrukturelementen. Jedoch ist davon auszugehen, dass anhaftende Partikel einen signifikanten Einfluss auf die Änderung der optischen Eigenschaften haben.

Bereits frühere Studien [14], [20] haben gezeigt, dass der Einschlag von Regolith in der Lage ist optische Systeme zu schädigen sowie die optischen Eigenschaften von technischen Oberflächen zu degradieren. Die durch den Einschlag hervorgerufene Degradation der optischen Eigenschaften kann dabei einen signifikanten Einfluss auf unterschiedlichste auf der Mondoberfläche eingesetzte Systeme haben. So könnte beispielsweise die Degradation des Coverglases von Solarzellen und die damit verbundene Verringerung der erzeugten elektrischen Leistung potentiell die gesamte Mission in Gefahr bringen oder zu einer signifikanten Verringerung der möglichen operationellen Missionszeit führen. Ebenso könnten sich auch für Kamerasysteme durch die Degradation von optischen Oberflächen

signifikante Beeinträchtigungen ergeben. Beispielsweise ist ein signifikant negativer Einfluss auf die gewonnenen wissenschaftlichen Daten zukünftiger Deep Space Teleskope bereits durch den durch Abdeckung bedingten Verlust weniger hundert Pixel denkbar. Aus diesen Gründen wurde versucht bei den optischen Proben den Worst-Case Fall abzudecken und die maximale Degradation der optischen Eigenschaften zu messen.

Bei den verwendeten Aluminiumproben wurden die durch den Beschuss hervorgerufenen Verschleißeffekte durch die Änderung der Oberflächenrauheit charakterisiert. Die Messung der Oberflächenrauheit der Proben wurde mit einem Laserinterferometer (Rodenstock RM600) durchgeführt. Die jeweiligen Al6061-T6-Proben wurden dazu jeweils vor und nach dem Beschuss vermessen. Aus denselben Gründen wie bereits bei den optischen Medien beschrieben, wurde auch bei den Aluminiumproben auf eine Reinigung der Proben nach dem Beschuss verzichtet.

In Tab. 5 sind die für die Einschlaguntersuchungen bei 200 m/s senkrecht zur Probenoberfläche verwendeten Probenmaterialien sowie die zur Charakterisierung des auftretenden Verschleißes verwendeten Messgrößen noch einmal zusammengefasst.

Tab. 5: Untersuchte Oberflächenmaterialien und gemessene Verschleißgrößen

Untersuchtes Material	Gemessene Größen	Makroskopische Oberflächenveränderung
Al6061-T6	Oberflächenrauheit [R_a]	Veränderung der Oberflächentopologie
Glas	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften
Polycarbonat (Makrolon®)	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften

2.5.2 Versuchsergebnisse und Diskussion¹³

In diesem Abschnitt sollen die Versuchsergebnisse des Einschlags von Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A mit Korngrößen zwischen 450 μm und 560 μm auf verschiedene technische Oberflächen bei einer Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s behandelt werden. In den folgenden Unterkapiteln wird zuerst eine Gegenüberstellung der einzelnen beschossenen Probenmaterialien durch optischen Vergleich durchgeführt. Im Anschluss werden die Auswirkungen des Partikeleinschlags auf die Probenmaterialien jeweils separat hinsichtlich der in Tab. 5 dargestellten

¹³ Die dargelegten Ergebnisse basieren auf den Experimentaldaten aus der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [89].

Verschleißgrößen charakterisiert. In jedem Unterkapitel schließt sich direkt an die Präsentation der Ergebnisse eine Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse an.

2.5.2.1 Optische Analyse der Probenmaterialien

Das Kapitel „Optische Analyse der Probenmaterialien“ soll anhand von Mikroskopaufnahmen der beschossenen Proben eine generelle Aussage über die Interaktion der einschlagenden JSC-1A-Partikel mit der Probenoberfläche ermöglichen. Im Speziellen soll anhand der Mikroskopaufnahmen untersucht werden, ob der Partikeleinschlag bei den jeweiligen Materialien zu einer Anlagerung der Partikel oder zu Erosion der Materialoberfläche führt. Hierzu wurden die Proben nach dem Beschuss mit dem Mondstaubanalogmaterial unter einem Mikroskop untersucht.

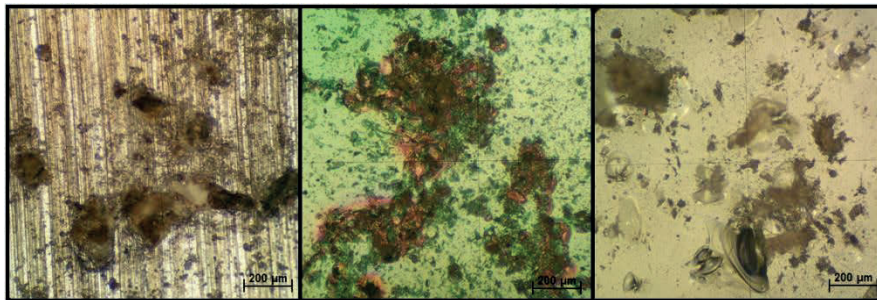


Abb. 30: Mikroskopaufnahmen der Proben nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln (von links nach rechts: Al6061-T6, Makrolon®, Glas)¹⁴

Abb. 30 zeigt exemplarisch für jedes verwendete Targetmaterial einen Ausschnitt der beschossenen Probenoberfläche. Die Aufnahme der Aluminiumprobe in Abb. 30 links zeigt deutlich, dass Mondanalogmaterial nach dem Einschlag auf der Probenoberfläche haften bleibt und sich dabei in die Oberfläche einlagert. Insbesondere im unteren Bereich der Aufnahme sind größere Restfragmente der Projektile zu erkennen. Die Aussage, dass es zu einer Einlagerung von Partikeln kommt, deckt sich mit den Erkenntnissen von Mpagazehe et al. [14], die in dieser Studie unter Zuhilfenahme von EDX-Untersuchungen gewonnen wurden. Auch hier konnte Mondanalogmaterial in den beschossenen Proben nachgewiesen werden. Des Weiteren wurde in der Studie von Neilson et al. [40] dargelegt, dass der Einschlag von geringen Mengen an Erosivmaterial zu Anfang bei duktilen Werkstoffen zu einer Massensteigerung, also einer Einlagerung von Beschussmaterial führt. Erst mit steigender Menge an einschlagendem Erosivmaterial setzt eine Erosion und eine damit verbundene Massenabnahme der Proben ein. In dieser Studie [40] liegt die Masse an

¹⁴ Entnommen aus der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [89].

einschlagendem Material im Grammbereich und ist damit deutlich größer als die Masse an einschlagendem Material in der vorliegenden Studie. Damit decken sich auch hier die quantitativen Erkenntnisse mit qualitativen Ergebnissen der Mikroskopuntersuchungen.

Die Aufnahmen der Makrolon®-Probe in Abb. 30 in der Mitte zeigen, ähnlich wie bei den Aluminiumproben, deutliche Materialablagerungen auf der Probenoberfläche. Allerdings sind hier keine größeren Fragmente des Mondanalogmaterials eindeutig erkennbar. Die Ablagerungen sind gleichmäßiger verteilt. Da es sich auch bei Makrolon® um ein duktileres Material handelt, kann die Einlagerung der einschlagenden Partikel ebenfalls mit den Erkenntnissen von [40] erklärt werden.

Die Mikroskopaufnahme der Glasprobe in Abb. 30 rechts zeigt, dass der Einschlag des Mondanalogmaterials zu einem muschelförmigen Abplatzen der spröden Oberfläche führt, was auf eine Erosion der Oberfläche schließen lässt. Dies ist deutlich im unteren Bildbereich mittig sowie am linken unteren Bildrand zu erkennen. Allerdings können auch hier speziell im oberen linken Bildbereich und neben der größeren muschelförmigen Beschädigung im unteren Bereich Ablagerungen der einschlagenden Partikel nachgewiesen werden. Da hier sowohl Erosion wie auch Ablagerung von JSC-1A nachgewiesen werden können, lässt sich anhand der Mikroskopaufnahmen für die Glasproben keine eindeutige Aussage hinsichtlich des dominanten Prozesses bei den gewählten Einschlaggrößen machen. Auf Basis der optischen Analyse kann eine Ablagerung der einschlagenden Partikel auf der Targetoberfläche für alle Probenmaterialien nachgewiesen werden, wobei allerdings nur für die duktilen Materialien dieser Prozess als dominant klassifiziert werden kann, da bei der Glasoberfläche zusätzlich eine sichtbare Erosion auftritt.

2.5.2.2 Änderung der Oberflächenrauheit von Aluminiumproben

In diesem Abschnitt sollen die makroskopischen Oberflächenveränderungen von Al6061-T6 untersucht werden, welche durch den senkrechten Einschlag von Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A mit einem Korngrößenbereich zwischen 450 µm und 560 µm bei einer Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s hervorgerufen werden. Aluminiumlegierungen sind ein gängiger Werkstoff für Weltraumanwendungen. Der Anwendungsbereich reicht hierbei von reinen Strukturbauteilen über Radiatoren bis hin zu optischen Spiegeln. Durch die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten ist es nicht möglich alle Auswirkungen durch einen einzigen Parameter zu beschreiben. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Leistung einiger kritischer Komponenten wie Radiatoren oder

optische Instrumente signifikant durch die Oberflächenrauheit der Legierung beeinflusst wird. Aus diesem Grund soll die Änderung der Oberflächenrauheit zur Charakterisierung des Verschleißes durch den Einschlag von Mondstaub verwendet werden.

In der vorliegenden Studie wurde die Oberflächenrauheit der Proben jeweils aus dem Mittelwert zweier zueinander senkrechter Messungen ermittelt. Des Weiteren wurden die Empfehlungen aus der ISO 4288 (04/98) nicht exakt befolgt. Der bei den Messungen angewendete Cut-off wurde für alle Messungen der beschossenen Proben auf 2,5 festgelegt und hängt damit nicht von dem jeweils gemessenen R_a -Wert ab. Ein fest vorgegebener Cut-off wurde zum einen deshalb verwendet, damit für den Rauheitskennwert R_a grundsätzlich jeweils die gleichen Messstrecken verwendet werden. Ein variierender Cut-off würde zu einer Veränderung der Länge der Messstrecke führen. Da die beschädigte Fläche nur einen kleinen Teil der Probe ausmacht, würde insbesondere bei einem größeren Cut-off ein großer Bereich an unbeschädigter Probenoberfläche bei der Messung berücksichtigt werden. Dadurch wäre ein Vergleich mit Messwerten, die über einen kleineren Messbereich und damit weitestgehend nur im beschädigten Bereich der Probe liegen, erschwert. Zum anderen wird durch die Verwendung eines fest definierten Cut-off die Vergleichbarkeit mit der später behandelten Messung gewährleistet, da hier ebenfalls bei beschossenen Proben grundsätzlich ein Cut-off von 2,5 verwendet wurde.

Abb. 31 zeigt die Änderung der Oberflächenrauheit der Al6061-T6-Proben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln in einem Korngrößenbereich zwischen 450 μm und 560 μm bei einer Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s. In der Abbildung ist neben der Oberflächenrauheit der unbeschossenen Proben und der beschossenen Proben auch explizit die Differenz der beiden Rauheitswerte angegeben, um den Vergleich der Proben zu erleichtern, da es bereits erkennbare Unterschiede zwischen den Rauheitswerten der unbeschossenen Proben gibt. Die Werte in Abb. 31 zeigen, dass es durch den Beschuss zu einer signifikanten Steigerung um im Mittel mehr als das 3-fache der Oberflächenrauheit durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln kommt. Wobei die Absolutwerte der Steigerung der Oberflächenrauheit in einem relativ ähnlichen Bereich liegen. Die bereits aus Abb. 30 ersichtlichen Einlagerungen der Partikel führen somit zu einer deutlichen Veränderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften der Proben. Beim Vergleich der Oberflächenrauheit der unbeschossenen Proben mit den beschossenen Proben fällt auf, dass die Abweichung der Messwerte einer Probe für die unbeschossenen Proben signifikant kleiner ist als die Abweichungen der beschossenen Proben. Insbesondere bei Probe 2 ist

zu erkennen, dass die Messwerte der beschossenen Probe eine vergleichsweise große Streuung aufweisen. Die verhältnismäßig geringe Anzahl und die Verwendung vergleichsweise großer Partikel führen zu einer inhomogenen Verteilung der Einschläge auf der Oberfläche. Dies kann auch durch die Mikroskopaufnahmen in Abb. 30 bestätigt werden. Es entstehen somit im Einschlagsbereich sowohl nur gering von den Einschlägen betroffene Stellen sowie Stellen, die deutlich durch die Einlagerung der JSC-1A-Partikel verändert wurden. Die Verteilung der Schädigungen ist somit bei zwei Messtrecken an verschiedenen Stellen der Probe im Allgemeinen nicht gleich. Dadurch lassen sich die deutlich größeren Abweichungen im Vergleich zur unbeschossenen Probe erklären, da im Gegensatz dazu die Oberflächenrauheit der unbeschossenen Proben durch den abschließenden Bearbeitungsprozess des Herstellers bedingt ist. Dieser maschinelle Fertigungsschritt hat im Allgemeinen eine gleichmäßige Oberfläche zur Folge, wodurch die Oberflächenrauheit weitestgehend unabhängig vom Ort der Messtrecke sein sollte.

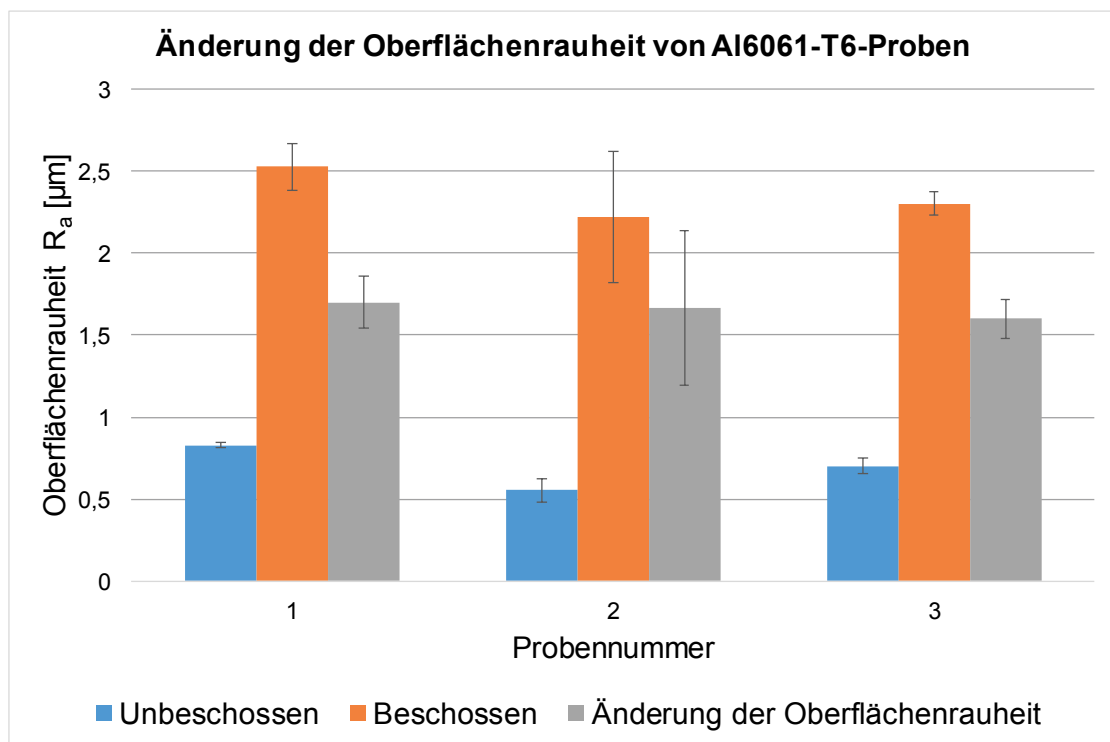


Abb. 31: Änderung der Oberflächenrauheit von Al6061-T6-Proben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s

2.5.2.3 Änderung der Transmission von Glasproben

In diesem Abschnitt soll die Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften von Glasproben durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln in einem Korngrößenbereich

zwischen 450 μm und 560 μm bei einer Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s durch die Änderung der Transmission der Proben charakterisiert werden. Wie zuvor erwähnt, wurden die Auswirkungen des Einschlags von JSC-1A-Partikeln auf Glasproben bereits von Wittbrodt et al. [20] untersucht. In dieser Studie [20] wurden allerdings lediglich die direkten Schädigungen durch den Einschlag untersucht. Eine Analyse der Auswirkungen des Beschusses auf die Änderung der Transmission wurde nach Kenntnis des Autors nicht durchgeführt.

Abb. 32 zeigt die Transmission der untersuchten Glasproben vor und nach dem senkrechten Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A. Der blaue Graph stellt hierbei die Transmission einer einzelnen unbeschossenen Glasprobe dar, die als Referenz für die beschossenen Proben verwendet wird. Die Abbildung zeigt, dass die Glasprobe eine relativ hohe optische Transmission im Bereich zwischen 350 nm und 800 nm besitzt. Für Wellenlängen kleiner 350 nm bricht die optische Transmission signifikant ein und geht für Wellenlängen kleiner 300 nm nahezu auf 0% zurück. Das einfallende Licht wird von der Probe absorbiert. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit die Änderung der Transmission nur für einen Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 800 nm, in dem die Transmission einen relativ konstanten Verlauf aufweist, betrachtet. Diese Einschränkung auf den Bereich, der hauptsächlich im Bereich des sichtbaren Lichtes liegt, ermöglicht zudem einen einfacheren Vergleich mit den im nächsten Kapitel behandelten Makrolon®-Proben.

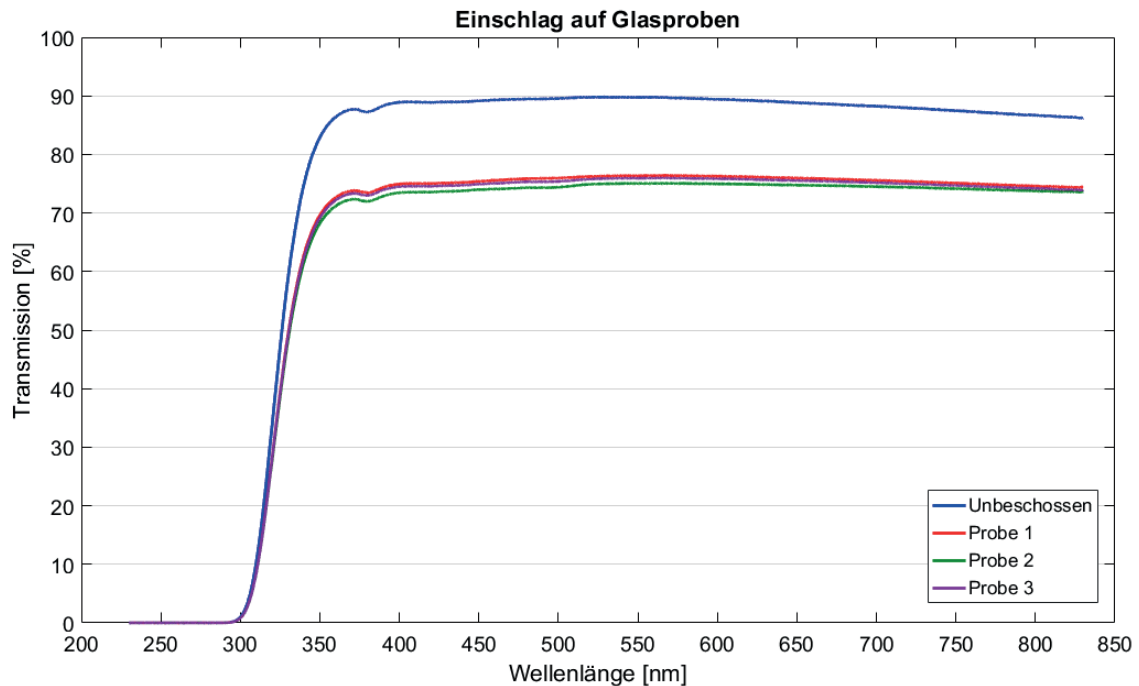


Abb. 32: Änderung der Transmission von Glasproben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s

In Abb. 32 ist zu erkennen, dass der Einschlag der JSC-1A-Partikel im Mittel über den betrachteten Wellenlängenbereich (400 nm - 800 nm) für alle beschossenen Proben zu einer Reduzierung der optischen Transmission von weniger als 15% führt. Des Weiteren ist ersichtlich, dass der Verlauf der optischen Transmission der beschossenen Proben ähnlich dem Verlauf der unbeschossenen Proben ist. Dies kann insbesondere durch das auftretende lokale Minimum bei ungefähr 400 nm sowie den starken Abfall der optischen Transmission im Bereich zwischen 300 nm und 350 nm belegt werden. Der Beschuss führt demnach nicht zu einer Veränderung des allgemeinen optischen Verhaltens der Probe. Es kommt lediglich zu einem Absinken der durch die optische Transmission charakterisierten optischen Performance des Materials. Eine mögliche Erklärung für die vergleichsweise geringe Reduzierung der optischen Transmission kann in den Mikroskopaufnahmen in Abb. 30 gefunden werden. In diesen Aufnahmen ist zu erkennen, dass nach dem Beschuss mit dem Mondanalogmaterial größere Teile der Probe unbeschädigt bleiben. An diesen Stellen kann das einfallende Licht die Probe weiterhin ungehindert passieren. Sie tragen also nicht zum Absinken der optischen Transmission bei. Der Vergleich der hier gemessenen Werte mit den Ergebnissen von Mpagazehe et al. [14] für Acrylglasproben zeigt, dass der Beschuss der Glasproben zu einer signifikant geringeren Abnahme der Transmission führt. Für die unterschiedlichen Ergebnisse können hierzu mehrere mögliche Gründe angeführt

werden. Wie die Mikroskopaufnahmen in Abb. 30 zeigen, kommt es bei dem duktilen Material Makrolon® zu einer stärkeren Bedeckung der Probe durch das Eindringen und Anhaften der Partikel an den Schadstellen. Es kann angenommen werden, dass sich die in [14] untersuchten Acrylglasproben ähnlich wie die hier untersuchten Makrolon®-Proben verhalten, da es sich ebenfalls um einen optischen Kunststoff und damit um ein duktilen Material handelt. An den muschelförmigen Beschädigungen, an denen Teile der Glasoberfläche herausgeschlagen wurden, kommt es lediglich zu einer Streuung des Lichtes, wohingegen bei einer Bedeckung eine vollständige Behinderung des Lichtwegs nicht auszuschließen ist. Ein weiterer möglicher Grund für die im Vergleich geringere Reduzierung der optischen Transmission ist, dass in der Studie von Mpagazehe et al. [14] eine signifikant größere Menge an Partikeln auf der Probe zum Einschlag gebracht wurden. Dadurch kann angenommen werden, dass es zu einer gleichmäßigeren, flächigeren Schädigung der Probe kommt. Die Fläche an unbeschädigter Oberfläche dürfte sich somit signifikant verringern. Zusammen mit der bereits erläuterten Annahme, dass es auch bei den in [14] untersuchten Acrylglasproben zu einer Einlagerung von JSC-1A und Bedeckung der Schadstellen mit Mondanalogmaterial kommt, lässt sich somit eine weitere mögliche Erklärung für die signifikant geringere optische Performance der Acrylglasproben in [14] finden.

2.5.2.4 Änderung der Transmission von Makrolon®-Proben

In diesem Abschnitt soll die Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften von Makrolon®-Proben durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln in einem Korngrößenbereich zwischen 450 µm und 560 µm bei einer Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s durch die Änderung der Transmission der Proben charakterisiert werden. Abb. 33 zeigt die optische Transmission der Makrolon®-Proben vor und nach dem Beschuss. Wie bei den zuvor behandelten Glasproben wurde auch hier eine einzelne gereinigte Makrolon®-Probe als Referenz für die drei durch den Beschuss degradierten Proben verwendet. Der blaue Graph in Abb. 33 stellt den Verlauf der optischen Transmission dieser Referenzprobe dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die optische Transmission im dargestellten Wellenlängenbereich für Wellenlängen größer 400 nm einen verhältnismäßig konstanten Verlauf mit einer leichten Abnahme hin zu kleineren Wellenlängen besitzt. Unterhalb einer Wellenlänge von 400 nm kommt es zu einem rapiden Einbruch der optischen Transmission bis die Probe das einfallende Licht nahezu vollständig absorbiert. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit nur Wellenlängen näher betrachtet, die in einem Bereich zwischen

400 nm und 800 nm liegen. Dieser Bereich entspricht weitestgehend dem Bereich sichtbaren Lichtes. Zudem zeigt sich, wie bereits erwähnt, ein näherungsweise konstanter Verlauf der optischen Transmission.

Abb. 33 zeigt, dass der senkrechte Beschuss der Makrolon®-Proben mit JSC-1A-Partikeln gemittelt über den betrachteten Wellenlängenbereich (400 nm - 800 nm) im Mittel für die drei beschossenen Proben in einer Reduzierung der optischen Transmission von ungefähr 22% resultiert. Der Abbildung ist weiterhin zu entnehmen, dass sich der Verlauf der optischen Transmission durch den Beschuss nicht signifikant ändert. Speziell das zweimalige leichte Absinken der Transmission bei ungefähr 600 nm und 650 nm sowie der rapide Rückgang der Transmission bei ungefähr 400 nm sind auch im Verlauf der optischen Transmission der beschossenen Proben wiederzufinden. Allerdings ist zu erwähnen, dass der Verlauf der optischen Transmission der beschossenen Proben einen leicht abnehmenden Trend hin zu kleineren Wellenlängen im Vergleich zur unbeschossenen Probe aufweist. Ein möglicher Grund könnte die Zunahme von Streuung an den Schadstellen für kleinere Wellenlängen sein. Jedoch kann trotzdem angenommen werden, dass keine signifikante Wellenlängenabhängigkeit der Reduzierung der optischen Transmission beim Beschuss mit JSC-1A-Partikeln für Makrolon®-Probe vorliegt. Im Vergleich zu den zuvor behandelten Glasproben sinkt die verbleibende optische Transmission nach dem Beschuss stärker ab. Eine mögliche Erklärung ist in den Mikroskopaufnahmen in Abb. 30 zu finden. Die Mikroskopaufnahmen zeigen, dass es bei den Makrolon®-Proben durch den Beschuss zu einer stärkeren Bedeckung der Probenoberfläche durch ein Anhaften des Mondanalogmaterials kommt. An Schadstellen der Glasproben, an denen ein muschelförmiges Absplittern der Probenoberfläche auftritt, wird das einfallende Licht im Gegensatz zu bedeckten Oberflächen, an denen der Lichtdurchgang stark behindert ist, lediglich gestreut. Dies stellt eine mögliche Erklärung für die stärkere Reduzierung der optischen Transmission bei Makrolon®-Proben dar.

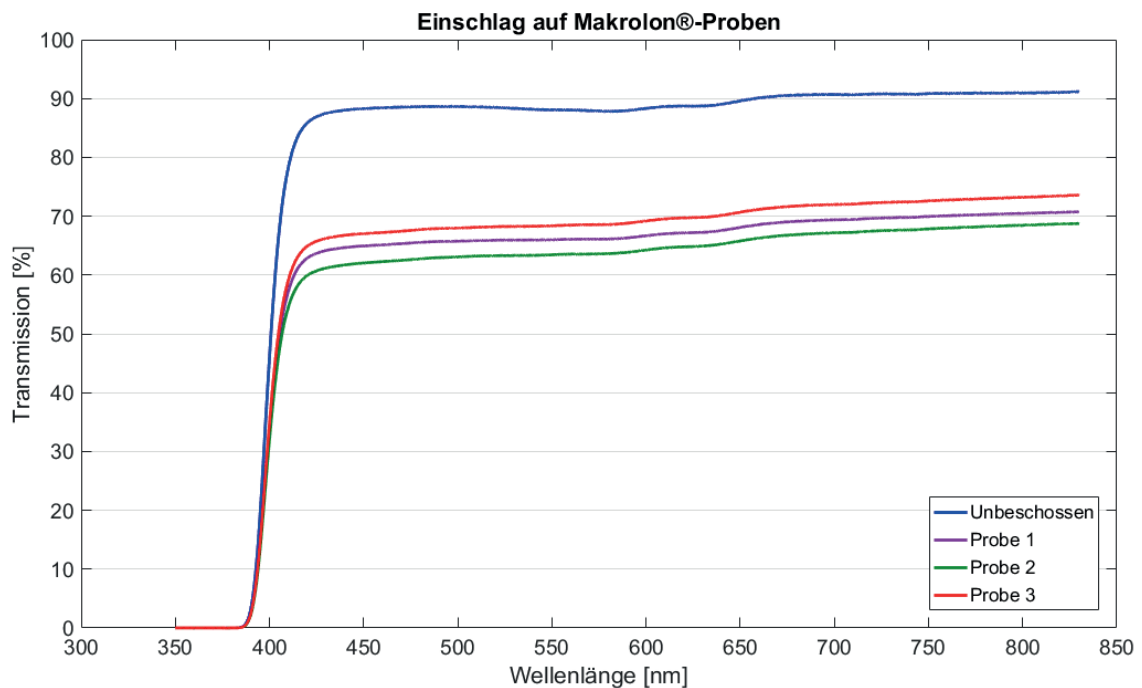


Abb. 33: Änderung der Transmission von Makrolon®-Proben durch den senkrechten Beschuss mit JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s

Im Vergleich zu den Erkenntnissen von Mpagazehe et al. [14] für Acrylglasproben ergibt sich für die hier untersuchten Makrolon®-Proben eine signifikant geringere Reduzierung der Transmission. Da es sich bei beiden Materialien um optische Kunststoffe und damit um duktile Materialien handelt, kann der zuvor bei den Glasproben unterschiedliche Schädigungsmechanismus der Probenoberfläche nicht als Erklärung dienen. Allerdings verwenden Mpagazehe et. al [14] in ihrer Arbeit einige Gramm an Mondanalogmaterial für den Beschuss, wohingegen in der vorliegenden Arbeit lediglich ungefähr 10 mg verwendet wurden. Es ist deshalb unter der Annahme, dass es auch bei Acrylglas zu einem Anhaften der Partikel kommt, davon auszugehen, dass eine gleichmäßigere und flächigere Bedeckung der Probenoberfläche bei Mpagazehe et. al [14] auftritt. Damit existiert eine signifikant geringere Fläche an unberührter Probenoberfläche, woraus eine stärkere Abnahme der Transmission resultiert. Selbst wenn ein Anhaften der Partikel aufgrund der geringeren Einschlaggeschwindigkeit und Korngröße der Projektile bei Mpagazehe et. al [14] nur in geringerem Maße auftritt, so kann die stärkere Abnahme der Transmission dennoch durch die großflächigere und einheitlichere Beschädigung der Probenoberfläche im Einschlagsbereich erklärt werden, was anhand der Fotografien in [14] belegt werden kann.

2.5.3 Fazit der senkrechten Einschläge bei 200 m/s

Die Untersuchungen des senkrechten Beschusses mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A bei ungefähr 200 m/s haben gezeigt, dass der Einschlag bereits geringer Mengen von ungefähr 10 mg des Materials zu nachweislichen Schädigungen von Materialoberflächen und Veränderungen von makroskopischen Materialparametern führen kann. Die Ergebnisse zeigen, dass speziell bei duktilen Materialien eine Einlagerung beziehungsweise ein Anhaften der Partikel als dominierender Effekt des Beschusses auftritt. Bei den spröden Glasoberflächen hingegen zeigt sich eher Erosionsverhalten, das sich in einem muschelförmigen Abplatzen des Oberflächenmaterials äußert. Allerdings konnte auch hier ein Anhaften der Partikel nachgewiesen werden, wenngleich es in geringerem Ausmaß als bei den duktilen Oberflächen auftritt. Anhand der zur Charakterisierung des Verschleißes verwendeten makroskopischen Oberflächeneigenschaften kann die bereits bei geringen Mengen einschlagender Partikel auftretende deutliche Schädigung der Materialien auch quantitativ belegt werden. Bei den untersuchten Aluminiumproben erhöht sich die Oberflächenrauheit durch den Beschuss mit ungefähr 10 mg JSC-1A im Mittel um nahezu das 3,5-fache. Die zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften gemessene optische Transmission reduziert sich durchschnittlich für alle untersuchten Glasproben im Mittel über den betrachteten Wellenlängenbereich (400 nm - 800 nm) um ungefähr 14%. Wobei der mittlere Verlust der optischen Transmission im selben Wellenlängenbereich für Makrolon® durch die stärkere Bedeckung mit Mondanalogmaterial mit knapp 22% etwas größer ist. Zusätzlich zeigt sich, dass für beide optischen Materialien die Reduzierung der optischen Transmission nicht signifikant von der jeweiligen Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängt, da der Verlauf der Graphen der Messwerte der unbeschossenen und der beschossenen Proben keine signifikanten Unterschiede zeigt.

2.6 Einschläge bei 200 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln¹⁵

Für den ersten Teil der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Experimente zur Untersuchung der Auswirkungen des Einschlags des Mondanalogmaterials JSC-1A unter verschiedenen Einschlagwinkeln wurde ebenfalls der Korngrößenbereich zwischen

¹⁵ Dieses Kapitel ist eine erweiterte und aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [89]. Signifikante inhaltliche Ergänzungen, die über den bereits veröffentlichten Text hinausgehen, sind in der Arbeit als solche kenntlich gemacht.

450 μm - 560 μm gewählt. Der verwendete Korngrößenbereich wurde hierzu wie zuvor direkt aus dem Originalmaterial durch Sieben gewonnen. Die Einschlaggeschwindigkeit sowie der zugehörige Korngrößenbereich basieren auf den in Kapitel 2.4.2 dargelegten Annahmen. In diesem Teilversuch wurden die Partikel deshalb auf eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ungefähr 200 m/s beschleunigt. Dafür wurde ebenfalls der in Kapitel 2.1 beschriebene elektromagnetische Wirbelstrombeschleuniger im Betriebsmodus mit dem 10 μF -Kondensator verwendet. Für alle durchgeführten Experimente wurde die Gesamtmasse der einschlagenden Partikel auf ungefähr 10 mg festgelegt. Dies ermöglicht ein sauberes Platzieren der Partikel auf dem Sabot, so dass sichergestellt werden kann, dass alle beschleunigten Partikel auf der zu untersuchenden Probe einschlagen. Bei deutlich größeren Mengen an JSC-1A nehmen die Partikel eine zu große Fläche auf dem Sabot ein. Bei der Kollision zwischen Sabot und Stopperplatte werden dadurch Teile der Partikel von der Stopperplatte abgehalten.

2.6.1 Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen

Als Targetmaterialien für die Einschlagsversuche wurden die Aluminiumlegierung Al6061-T6 sowie die beiden optischen Medien Glas und Polykarbonat (Makrolon®) verwendet. Sämtliche verwendeten Targetmaterialien wurden keiner weiteren Bearbeitung unterzogen und wurden wie vom Hersteller erhalten verwendet. Lediglich eine Reinigung der Materialien wurde durchgeführt, um Fremdkörper, die die Messungen beeinflussen können, zu entfernen. Die Reinigung erfolgte für die Aluminiumproben und die Glasproben mit Isopropanol. Die Makrolon®-Proben wurden mit destilliertem Wasser gereinigt. Alle verwendeten Proben, mit Ausnahme der für Einschläge unter 75° verwendeten Proben, besitzen eine quadratische Form mit einer Kantenlänge von 50 mm. Für die Einschlagwinkel unter 75° wurden rechteckige Proben (50 x 60 mm²) verwendet, um hier den Einschlag aller beschleunigten Partikel aufgrund des hohen Anstellwinkels der Probe zu garantieren. Die Dicke aller Proben beträgt ungefähr 3 mm. Wie bereits im vorigen Kapitel wurden die verschiedenen Probenmaterialien einer optischen Analyse mittels Mikroskopie unterzogen. Für die Mikroskopie nach dem Beschuss wurden die Proben kein weiteres Mal gereinigt, sondern direkt aus dem Versuchsaufbau entnommen und untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist eine generelle Aussage darüber zu treffen, welcher Schädigungsmechanismus, Anhaften beziehungsweise Einlagerung der einschlagenden Partikel oder Erosionseffekte, bei den jeweiligen Materialoberflächen auftritt sowie dessen Winkelabhängigkeit zu charakterisieren. Dies ermöglicht es abzuschätzen, ob

Erosionseffekte oder eine Anlagerung von Partikeln der jeweils dominierende durch den Beschuss hervorgerufene Prozess ist. Zusätzlich zu den Mikroskopuntersuchungen wurden die Auswirkungen der Einschläge durch die Änderung makroskopischer Oberflächeneigenschaften charakterisiert. Dazu wurden die Änderung der Oberflächenrauheit für Aluminiumproben und die Änderung der optischen Transmission für die beiden optischen Medien herangezogen. Die Messung der Transmission erfolgte mit einem Spektrophotometer (Perkin Elmer UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19). Die Messungen nach dem Beschuss entsprechen hierbei einer Worst-Case Messung, da versucht wurde die verbleibende Transmission jeweils am Punkt der geringsten Resttransmission zu messen. Die Veränderung der Oberflächenrauheit der Aluminiumproben wurde mit einem Laserinterferometer (Rodenstock RM600) durchgeführt. In Tab. 6 sind die in den Experimenten verwendeten Materialien und die für die Charakterisierung des Verschleißes durch Projektileinschlag jeweils verwendeten Messgrößen zusammengefasst.

Tab. 6: Untersuchte Materialien und gemessene Größen

Untersuchtes Material	Gemessene Größen		Makroskopische Oberflächenveränderung
Al6061-T6	Einschlagwinkel [°]	Oberflächenrauheit [R _a]	Veränderung der Oberflächentopologie
Glas	Einschlagwinkel [°]	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften
Polycarbonat (Makrolon®)	Einschlagwinkel [°]	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften

2.6.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

Die Auswirkungen des Beschusses mit dem Mondanalogmaterial JSC-1A bei einer Einschlaggeschwindigkeit von ungefähr 200 m/s auf die zuvor vorgestellten Materialien Al6061-T6, Glas und Makrolon® wurden für die folgenden 4 Einschlagwinkel 0°, 15°, 45° und 75° untersucht. Der Einschlagwinkel ist dabei folgendermaßen definiert: Als Einschlagwinkel wird der Winkel zwischen Schussrichtung und der Oberflächennormalen der zu untersuchenden Probe angesehen. Einschläge senkrecht zur Oberfläche erfolgen demzufolge unter einem Einschlagwinkel von 0°. Die Definition des Einschlagwinkels α ist in Abb. 34 noch einmal graphisch dargestellt.

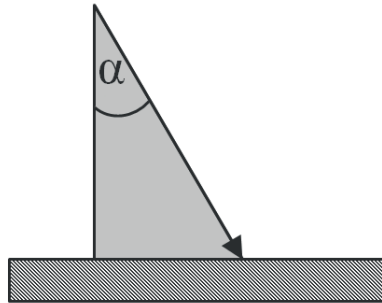


Abb. 34: Definition des Einschlagwinkels

2.6.2.1 Untersuchung von Al6061-T6-Proben

Optische Analyse der Al6061-T6-Proben¹⁶

Abb. 35 zeigt für jeden untersuchten Einschlagwinkel exemplarisch einen Ausschnitt der beschossenen Al6061-T6-Probenoberflächen. Die Mikroskopaufnahmen zeigen hierbei deutlich, dass es für die Einschlagwinkel kleiner und gleich 45° zu einer signifikanten Einlagerung beziehungsweise einem signifikanten Anhaften der einschlagenden JSC-1A-Partikel kommt. Wohingegen bei den Einschlägen bei 75° kaum Einlagerungen erkennbar sind und die Oberfläche von Schleiferscheinungen bedeckt ist.

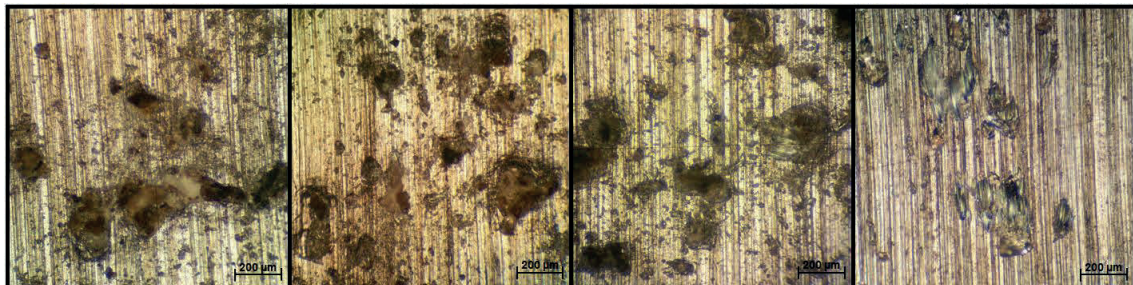


Abb. 35: Mikroskopaufnahmen der Al6061-T6 Proben für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° , 15° , 45° , 75° ; von links nach rechts) nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln

Basierend auf der Betrachtung der in Abb. 35 dargestellten Mikroskopaufnahmen kann angenommen werden, dass die größte Menge an anhaftenden Projektilfragmenten bei einem Einschlagwinkel von 15° auftritt. Die Mikroskopaufnahmen belegen, dass bei diesem Einschlagwinkel eine größere Fläche mit den Mondanalogmaterialpartikeln bedeckt ist als bei allen anderen untersuchten Einschlagwinkeln. Der steile Einschlagwinkel ermöglicht es offensichtlich den JSC-1A-Partikeln in die Probenoberfläche einzudringen, wobei die Geschwindigkeitskomponente parallel zur Targetoberfläche noch klein genug ist, sodass die

¹⁶ Die detaillierte optische Analyse wurde in der bereits veröffentlichten Publikation [89] nicht durchgeführt. Sie basiert jedoch auf den in der Publikation angegebenen Mikroskopaufnahmen.

Partikel in den durch den Einschlag erzeugten Schadstellen haften können. Für senkrechte Einschläge können insgesamt etwas weniger anhaftende Projektilfragmente auf der Oberfläche identifiziert werden. Es ist allerdings festzustellen, dass die anhaftenden Projektilfragmente bei den senkrechten Einschlägen stärker lokal geclustert sind. Für Einschlagwinkel größer als 15° ist ebenfalls zu erkennen, dass es wie bei den Einschlägen bei einem Winkel von 15° zu einer flächigeren Verteilung der Schädigungen kommt. Jedoch ist hier an den Schadstellen teilweise ein geringeres Anhaften der Projektilfragmente zu erkennen. Dies lässt sich im Speziellen am rechten Bildrand der Probenaufnahme erkennen. Hier ist eine ausgeprägte Schädigung zu erkennen, allerdings keine deutlich sichtbaren Partikelfragmente, wie zum Beispiel bei den Einschlägen bei 15° rechts im unteren Bildbereich. Ein möglicher Grund hierfür ist die steigende Geschwindigkeitskomponente parallel zur Probenoberfläche. Umso größer diese Komponente wird, umso wahrscheinlicher ist es, dass die Mondanalogmaterialpartikel nicht in den durch den Beschuss erzeugten Schadstellen haften, sondern daran abgleiten. Zudem ist davon auszugehen, dass die Partikel aufgrund der reduzierten Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Probenoberfläche weniger stark in die Probenoberfläche eindringen. Dies lässt sich durch die Betrachtung der Einschläge bei 75° verdeutlichen. Der Vergleich der Aufnahmen für 75° mit den anderen Einschlagwinkeln zeigt, dass für 75° keine Cluster von anhaftenden Partikeln mehr auftreten, sondern hauptsächlich Kratzer und Schleiferscheinungen auf den Proben zu erkennen sind, was auf ein Abgleiten der Partikel des Mondanalogmaterials zurückzuführen ist. Dies zeigt, dass für Einschlagwinkel von 75° nur noch ein sehr kleiner Teil der einschlagenden Partikel in der Lage ist an der Probenoberfläche zu haften. Geringe Mengen sind jeweils im oberen linken Bildrand sowie am Ende der Schleiferscheinung unten mittig zu erkennen. Basierend auf den Erkenntnissen für die unterschiedlichen Einschlagwinkel kann auch hier angenommen werden, dass aufgrund der duktilen Materialoberfläche die Einlagerung beziehungsweise das Anhaften von Partikeln den dominanten Verschleißeffekt für die untersuchten Al6061-T6-Proben darstellt. Jedoch treten für flache, streifende Einschläge auch verstärkt erosive Vorgänge zu Tage.

Änderung der Oberflächenrauheit von Al6061-T6-Proben

Resultate: Die Änderung der Oberflächenrauheit der Al6061-T6 Proben aufgrund des Beschusses mit dem Mondanalogmaterial JSC-1A für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge) ist in Abb. 36 dargestellt.

Die Oberflächenrauheit steigt für alle Einschlagwinkel deutlich an, wobei sie in Richtung der streifenden Einschlüge langsam zurückgeht. Die dargestellte Oberflächenrauheit der jeweiligen Probe wurde hierbei für alle Proben mit Ausnahme der Einschlüge unter 75° aus dem Mittelwert von zwei senkrecht zueinander liegenden Messungen berechnet. Bei einem Beschuss unter einem Winkel von 75° erzeugen die Einschlüge aufgrund des hohen Anstellwinkels Schädigungen, die über ein schmales Band in Schussrichtung verteilt sind, wohingegen sich die Beschädigungen für kleinere Einschlagwinkel über eine annähernd kreisförmige Fläche verteilen. Aus diesem Grund wurden für die Einschlüge unter einem Winkel von 75° zwei parallele Messungen in Schussrichtung durchgeführt, da bei zwei senkrechten Messungen eine der Messungen über einen großen Bereich verlaufen würde, der nicht von den Einschlügen betroffen ist. Dies würde einen Vergleich der verschiedenen Einschlagwinkel erschweren. Des Weiteren wurden die Vorgaben der ISO 4288 (04/98) nicht exakt eingehalten. Der Cut-off wurde unabhängig vom gemessenen R_a -Wert auf 2,5 festgelegt. Dies hat denselben Grund, wie die zwei parallelen Messungen für die Einschlagwinkel von 75° . Durch die Festlegung des Cut-off konnte sichergestellt werden, dass für den R_a -Wert jeweils die gleichen Messstrecken verwendet wurden. Bei einem größeren Cut-off würde ein großer Bereich von unbeschädigter Probenoberfläche mit in die Messung einfließen, wodurch ein Vergleich der Ergebnisse mit Proben, bei denen der Cut-off und damit die Messstrecke kleiner ist, erschwert würde.

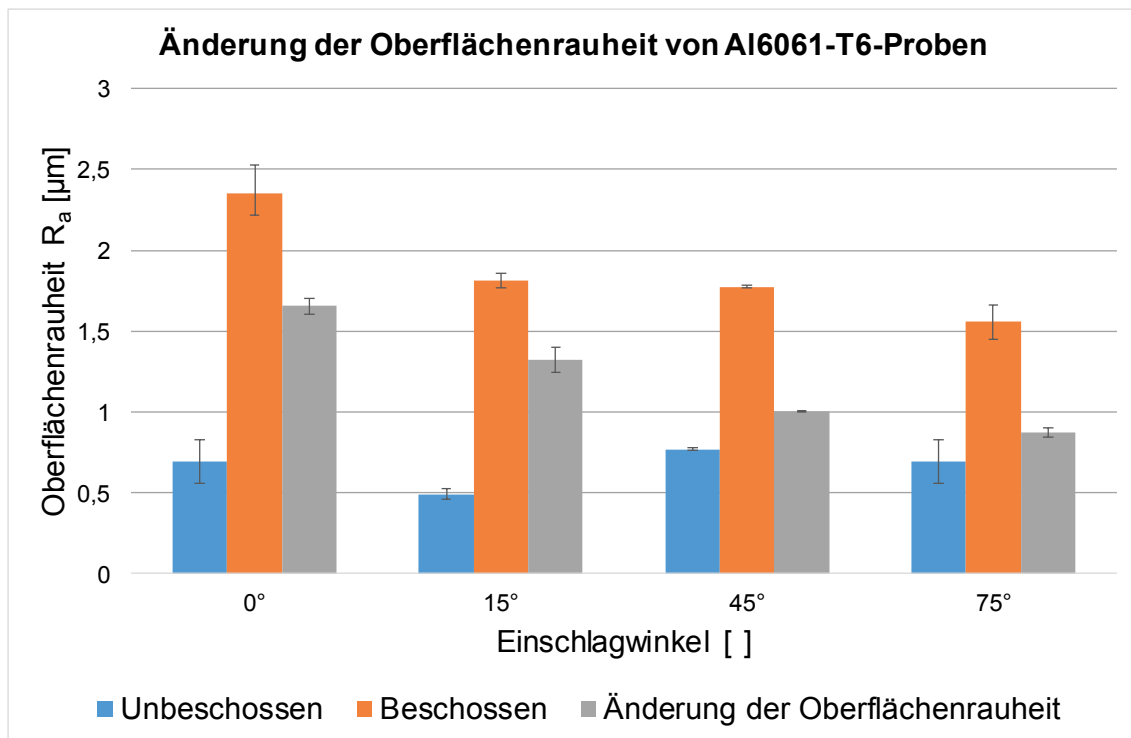


Abb. 36: Vergleich der Änderung der Oberflächenrauheit der Al6061-T6-Proben aufgrund des Beschusses mit JSC-1A-Partikel für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge)

Diskussion: Abb. 36 zeigt, dass die gemessene Oberflächenrauheit der untersuchten Al6061-T6-Proben im Mittel über alle untersuchten Einschlagwinkel ungefähr um das 2,9-fache ansteigt. Wie zuvor erwähnt, ergibt sich die größte Änderung der Oberflächenrauheit für Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche. Die Änderung der Oberflächenrauheit aufgrund des Beschusses mit ungefähr 10 mg des Mondanalogmaterials JSC-1A beträgt für diesen Einschlagwinkel ungefähr $1,6 \mu\text{m}$. Des Weiteren sinken sowohl die absolute Oberflächenrauheit sowie deren Änderung aufgrund des Beschusses hin zu größeren Einschlagwinkeln ab und erreichen bei einem Einschlagwinkel von 75° ihr Minimum. Die Änderung der Oberflächenrauheit beträgt bei Einschlägen mit einem Winkel von 75° nur noch ungefähr $0,87 \mu\text{m}$. Obwohl durch die Einschläge, wie in Abb. 35 gezeigt, hauptsächlich Kratzer und Schleiferscheinung auf der Probenoberfläche entstehen, ist die Änderung der Oberflächenrauheit für Einschläge unter einem Winkel von 75° nur ungefähr halb so groß wie der Wert für Einschläge senkrecht zur Oberfläche. Dies liegt daran, dass nicht nur Partikel des Mondanalogmaterials, welche an der Probenoberfläche haften und dadurch zu Erhebungen führen, sondern auch die aus den streifenden Einschlägen resultierenden Kerben einen signifikanten Einfluss auf den gemessenen R_a -Wert haben.

2.6.2.2 Untersuchung von optischen Materialien

Optische Analyse der Glasproben¹⁷

In Abb. 37 ist für jeden der untersuchten Einschlagwinkel exemplarisch ein Ausschnitt der beschossenen Oberflächen der Glasproben abgebildet. Anhand dieser Mikroskopaufnahmen ist deutlich zu erkennen, dass unabhängig vom jeweiligen Einschlagwinkel muschelförmige Schädigungen durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln auf den Probenoberflächen hervorgerufen werden. Dieser Effekt resultiert aus der Sprödigkeit der Glasproben.

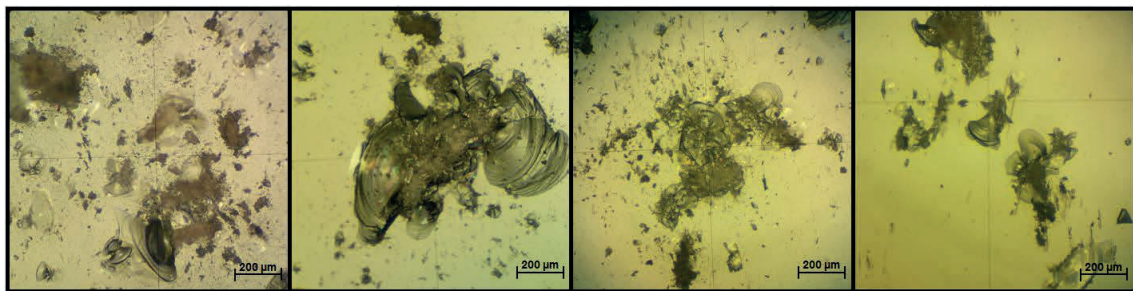


Abb. 37: Mikroskopaufnahmen der Glasproben für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° , 15° , 45° , 75° ; von links nach rechts) nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln

Die Mikroskopaufnahmen in Abb. 37 zeigen allerdings auch, dass bei den senkrecht zur Probenoberfläche durchgeführten Einschlägen des Mondanalogmaterials JSC-1A neben den muschelförmigen Schädigungen zusätzlich eine signifikante Menge an einschlagenden Partikeln auf der Probenoberfläche haftet und sich teilweise an den Schadstellen ablagert. Der Bildausschnitt der Einschläge unter einem Winkel von 15° zeigt ein deutlich anderes Bild. Ein großer Bereich des Bildausschnittes ist hier durch mehrere ineinander übergehende beziehungsweise sich überlagernde muschelförmige Beschädigungen dominiert. Insgesamt scheinen die Beschädigungen auch tiefer in die Materialoberfläche zu gehen. Es sind zudem nur geringe Spuren an anhaftendem Material in den großen muschelförmigen Beschädigungen zu erkennen. Wie in den Mikroskopaufnahmen zu erkennen ist, wird die Fläche, die durch die Einschläge beschädigt wird, für Einschläge unter einem Winkel von 45° wieder kleiner. Zudem scheinen die Beschädigungen weniger tief in das Material zu gehen. Des Weiteren zeigen die Mikroskopaufnahmen eine Vielzahl kleinerer Oberflächenbeschädigungen, die entweder von Sekundäreinschlägen der erodierten Glaspartikel oder Bruchstücken des Mondanalogmaterials stammen. Auch hier

¹⁷ Die detaillierte optische Analyse wurde in der bereits veröffentlichten Publikation [89] nicht durchgeführt. Sie basiert jedoch auf den in der Publikation angegebenen Mikroskopaufnahmen.

können lediglich geringe Spuren anhaftenden Projektilmaterials zum Beispiel am unteren Rand des Bildes identifiziert werden. Die Mikroskopaufnahmen in Abb. 37 zeigen, dass für streifende Einschläge bei einem Einschlagwinkel von 75° nur kleine verteilte Schädigungen auf der Oberfläche auftreten. Im Gegensatz zu den flächigen Schädigungen zum Beispiel bei Einschlägen unter einem Winkel von 15° zeigt sich hier ein Band an einzelnen flächenmäßig signifikant kleineren Schädigungen. Auch für die Einschläge unter 75° kann, wie am oberen Bildrand zu erkennen ist, eine Ablagerung von Projektilmaterial nicht ausgeschlossen werden. Anhand der Ergebnisse für die unterschiedlichen Einschlagwinkel kann angenommen werden, dass aufgrund der spröden Materialoberfläche ein muschelförmiges Abplatzen und damit ein erosiver Vorgang den dominanten Verschleißeffekt für die untersuchten Glasproben darstellt. Allerdings konnten bei allen untersuchten Einschlagwinkeln zumindest geringe Mengen an anhaftenden beziehungsweise eingelagerten Projektilfragmenten identifiziert werden. Wobei speziell im Falle der senkrechten Einschläge im Vergleich zu den anderen Beschusswinkeln eine signifikant größere Menge abgelagert wird.

Änderung der optischen Transmission von Glasproben

Resultate: Abb. 38 zeigt den Verlauf der Transmission über verschiedene Wellenlängen für die untersuchten Glasproben vor und nach dem Beschuss mit ungefähr 10 mg des Mondanalogmaterials JSC-1A für verschiedene Beschusswinkel (0° = Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge). Die abgebildete verbleibende optische Transmission nach dem Beschuss stellt den Mittelwert über unterschiedliche Proben für den jeweiligen Einschlagwinkel dar. Für die Messungen wurde versucht den Ort der geringsten Transmission zu messen, um den Worst-Case Fall abzudecken, da insbesondere für optische Systeme der Verlust bereits weniger Pixel einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit dieser Systeme haben kann. Abb. 38 zeigt, dass die geringste Resttransmission aller untersuchten Einschlagwinkel für 15° auftritt. Wenn nur ein Wellenlängenbereich von 400 nm bis 800 nm, was hauptsächlich dem Bereich sichtbaren Lichtes entspricht, betrachtet wird, sinkt die über diesen Bereich gemittelte verbleibende Transmission von ungefähr 89% für unbeschossene Proben auf ungefähr 71% für die beschossene Probe ab. Die Resttransmission für Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche liegt im Mittel über dem Bereich des sichtbaren Lichtes mit 75% etwas höher. Die verbleibende Resttransmission steigt mit größeren Winkeln weiter an und erreicht bei Einschlagwinkeln von 75° ihr Maximum bei ungefähr 85%.

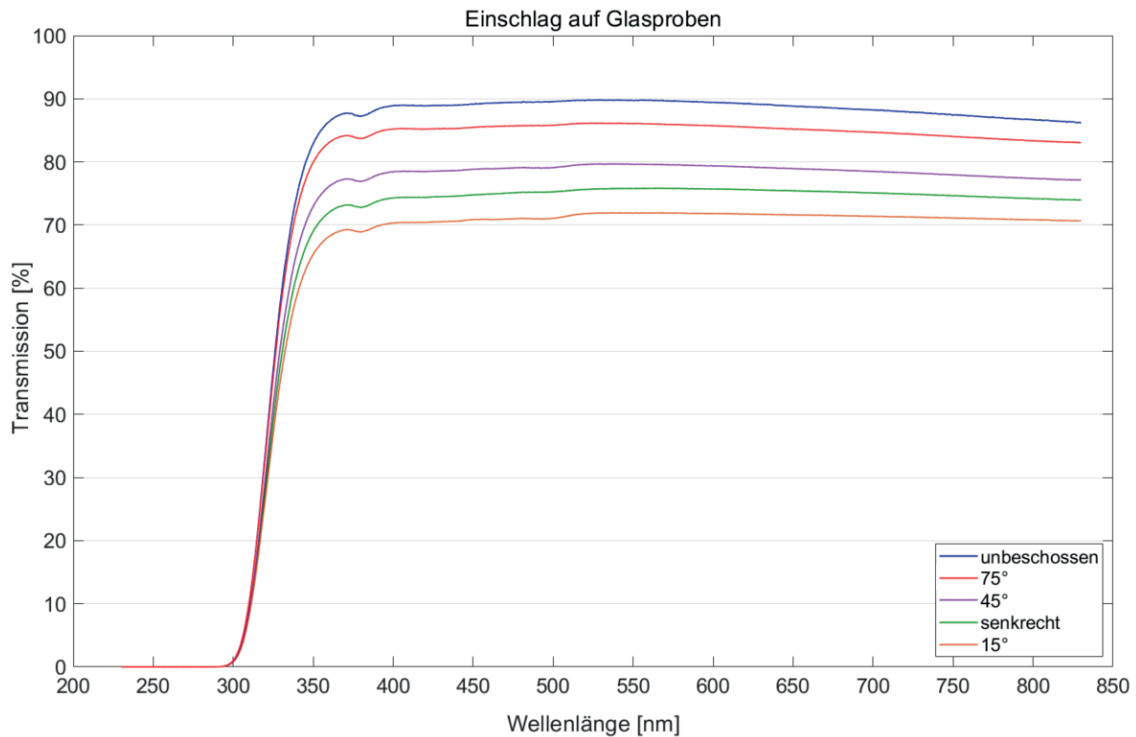


Abb. 38: Verbleibende Transmission der Glasproben nach dem Einschlag von JSC-1A- Partikeln für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge)

Diskussion: Die Lichtstreuung an den großflächigen muschelförmigen Beschädigungen, die bei Einschlägen unter einem Winkel von 15° auftritt, hat den größten Einfluss auf den Verlust von optischer Transmission. Obwohl ein signifikanter Anteil an Partikeln des Mondanalogmaterials bei Einschlägen senkrecht zur Oberfläche, wie in Abb. 37 gezeigt, an den Schadstellen haftet, ist die verbleibende Transmission für diesen Einschlagwinkel höher. Die anhaftenden Partikel behindern den Durchgang des Lichts durch die Probe. Jedoch sind die mit JSC-1A-Partikeln bedeckten Bereiche deutlich kleiner im Vergleich zu den großflächigen Beschädigungen bei einem Einschlagwinkel von 15° . Einschläge unter einem Winkel von 45° zeigen deutlich kleinere muschelförmige Beschädigungen und die Menge der anhaftenden Partikel sinkt. Dies führt zu einer höheren Resttransmission. Die Einschläge bei einem Winkel von 75° verzeichnen den geringsten Verlust an optischer Transmission. Wie in Abb. 37 gezeigt, treten bei Winkeln von 75° nur kleinere verteilte Oberflächenschädigungen auf. Weiterhin ist zu erkennen, dass große Bereiche der Probe weder mit Partikeln bedeckt sind noch sonst von den Einschlägen betroffen sind. In diesen Bereichen kann das Licht die Probe ungehindert passieren.

Optische Analyse der Makrolon®-Proben¹⁸

In diesem Abschnitt werden die Effekte des Einschlags von ungefähr 10 mg des Mondanalogmaterials JSC-1A auf ein weiteres optisches Material, Makrolon®, anhand von Mikroskopaufnahmen untersucht. Wie bereits bei den beiden anderen untersuchten Materialien ist dazu exemplarisch für jeden Einschlagwinkel eine Mikroskopaufnahme der beschossenen Probenoberflächen in Abb. 39 dargestellt. Die Aufnahmen zeigen, dass der Einschlag von ungefähr 10 mg des Mondanalogmaterials JSC-1A unabhängig vom Einschlagwinkel zu einer lokalen Bedeckung der Makrolon®-Proben führt, was auf ein Anhaften beziehungsweise auf eine Ablagerung der JSC-1A-Partikel hindeutet.

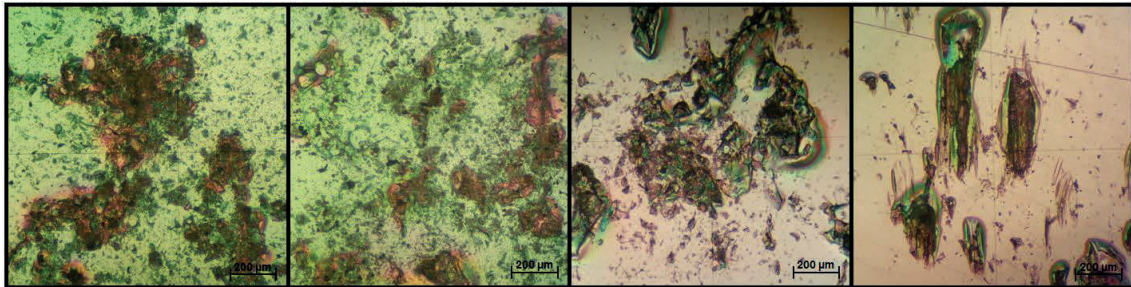


Abb. 39: Mikroskopaufnahmen der Makrolon®-Proben für unterschiedliche Einschlagwinkel (0°, 15°, 45°, 75°; von links nach rechts) nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln

Ein Grund für das unabhängig vom jeweiligen Einschlagwinkel auftretende Anhaften der Projektilfragmente ist, dass die scharfkantigen JSC-1A-Partikel in der Lage sind in die duktile Makrolon®-Oberfläche einzudringen und an den verursachten Schadstellen zu haften. Dieser Effekt konnte bereits bei der duktilen Oberfläche der Al6061-T6-Proben festgestellt werden. Insbesondere bei den beiden steilen Einschlagwinkeln 0° (senkrecht zur Probenoberfläche) und 15° sind große Teile der Proben mit Fragmenten der JSC-1A-Partikel bedeckt. Des Weiteren zeigt Abb. 39, dass sich die Menge an anhaftenden Partikeln für größere Einschlagwinkel als 15° verringert. Bereits bei einem Einschlagwinkel von 45° existieren auf der abgebildeten Probenoberfläche größere Bereiche auf denen selbst kleinere Oberflächenbeschädigungen, die beispielsweise aus Sekundäreinschlägen von Projektilfragmenten resultieren könnten, nur vereinzelt auftreten. Speziell im oberen Bereich der Aufnahme sind neben der ausgeprägten Schädigung nahezu keine Einschlagsschäden zu erkennen. Für Einschläge unter einem Winkel von 75° sind nur noch Kratzer und riefenartige Beschädigungen auf der Probenoberfläche zu erkennen. Allerdings

¹⁸ Die detaillierte optische Analyse wurde in der bereits veröffentlichten Publikation [89] nicht durchgeführt. Sie basiert jedoch auf den in der Publikation angegebenen Mikroskopaufnahmen.

können auch hier speziell im unteren Bereich der Aufnahme Projektilfragmente in den Schädigungen identifiziert werden. Die Mikroskopaufnahmen unterstützen somit die Aussage, dass die Einlagerung beziehungsweise das Anhaften von Fragmenten der JSC-1A-Partikel der dominierende Schädigungsprozess für die duktilen Makrolon®-Proben ist. Anders als bei den untersuchten Glasproben sind hier keine muschelförmigen Beschädigungen auf der Probenoberfläche sichtbar.

Änderung der optischen Transmission von Makrolon®-Proben

Resultate: Abb. 40 stellt für verschiedene Einschlagwinkel (0° = Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge) die Transmission von Makrolon®-Proben vor und nach dem Beschuss mit 10 mg des Mondanalogmaterials JSC-1A dar. In den abgebildeten Graphen wird, aus demselben Grund wie zuvor beschrieben, der Mittelwert der Worst-Case Messung der beschossenen Proben für den jeweiligen Einschlagwinkel dargestellt. Abb. 40 zeigt, dass die minimal verbleibende Resttransmission für Einschläge senkrecht zur Oberfläche auftritt. Für den Messbereich wurden wie zuvor beschrieben nur Wellenlängen zwischen 400 nm und 800 nm betrachtet. Dies wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Glasproben gemacht. Die Transmission fällt auch für unbeschossene Makrolon®-Proben für Wellenlängen kleiner als 400 nm stark ab. Da dies bei den Glasproben erst für Wellenlängen kleiner 350 nm auftritt, wurden, um beide Ergebnisse besser vergleichen zu können, die betrachteten Werte für beide Messungen auf denselben Bereich beschränkt. Die verbleibende mittlere Transmission im Bereich des sichtbaren Lichts fällt hier ungefähr auf 67% ab. Für flachere Einschlagwinkel steigt die verbleibende Transmission an. Sie erreicht mit ungefähr 82% gemittelt über den sichtbaren Bereich bei einem Einschlagwinkel von 75° ihr Maximum. Dies verdeutlichen auch die Mikroskopaufnahmen in Abb. 39. Hier ist erkennbar, dass mit steigendem Einschlagwinkel weniger Probenfläche mit JSC-1A-Partikeln bedeckt ist, wodurch mehr Licht ungehindert passieren kann.

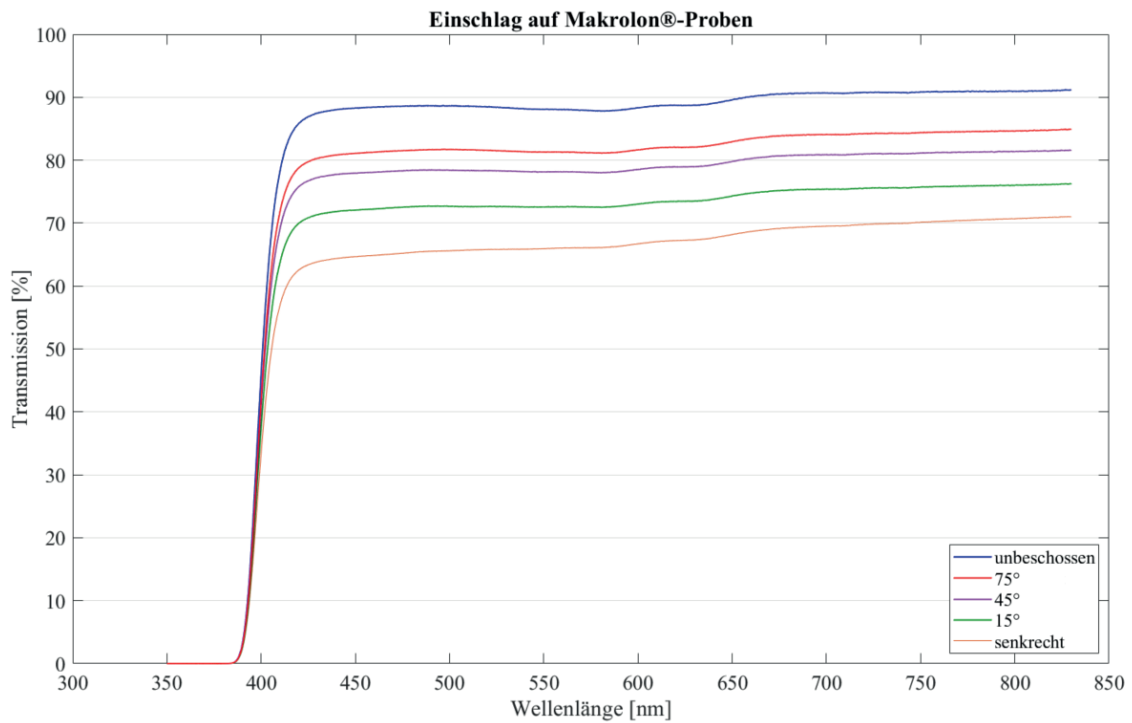


Abb. 40: Verbleibende Transmission der Makrolon®-Proben nach dem Einschlag von JSC-1A-Partikeln für unterschiedliche Einschlagwinkel (0° = Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifende Einschläge)

Diskussion: Obwohl aus den Mikroskopaufnahmen in Abb. 39 zu entnehmen ist, dass bei den Einschlägen unter einem Einschlagwinkel von 15° die Probe flächiger als bei Einschlägen senkrecht zur Oberfläche bedeckt ist, verringert sich die verbleibende Transmission für Einschläge senkrecht zur Oberfläche am stärksten. Dies lässt sich damit erklären, dass die Einschläge senkrecht zur Probenoberfläche weniger, aber dichtere Materialablagerungen erzeugen, die den Lichtdurchgang stärker behindern. Die Abnahme der verbleibenden Transmission für größere, flachere Einschlagwinkel kann ebenfalls mit Hilfe der Mikroskopaufnahmen in Abb. 39 erklärt werden. Es kommt zu einer geringeren Materialablagerung und deutlich größere Flächen auf der Makrolon®-Probe sind nicht oder kaum vom Partikeleinschlag und der Ablagerung von Projektilfragmenten betroffen. Hinsichtlich der Änderung der Transmission hat der Beschuss mit JSC-1A-Partikeln einen geringfügig stärkeren Einfluss auf die Makrolon®-Proben, verglichen mit den Untersuchungen der Glasproben. Ein möglicher Grund dafür ist, dass das Herausschlagen von Material aus der spröden Glasoberfläche einen etwas geringeren Einfluss auf die Änderung der optischen Performance hat, als das großflächige Anhaften von Mondanalogmaterialpartikeln. Bei den muschelförmigen Schädigungen wird das Licht

hauptsächlich gestreut, wohingegen eine Bedeckung den Durchgang des Lichtes direkt behindert.

2.6.3 Fazit der Einschläge bei 200 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln

Die Untersuchungen des Beschusses mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A bei ungefähr 200 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln in den beiden vorigen Kapiteln haben gezeigt, dass unabhängig vom verwendeten Probenmaterial die stärkste Degradation von makroskopischen Oberflächeneigenschaften für steile Einschlagwinkel zu erwarten ist. Mit steigendem Einschlagwinkel hin zu streifenden Einschlägen nehmen diese Effekte ab. Jedoch konnte trotzdem nachgewiesen werden, dass der Einschlag bereits geringer Mengen von ungefähr 10 mg des verwendeten Mondanalogmaterials selbst bei sehr flachen Einschlagwinkeln zu nachweislichen Schädigungen von Materialoberflächen und Veränderungen von makroskopischen Materialparametern führen kann. Generell konnte durch die mikroskopischen Untersuchungen gezeigt werden, dass bei duktilen Materialien die Einlagerung beziehungsweise das Anhaften von Projektilfragmenten unabhängig vom Einschlagwinkel der dominierende Effekt der Oberflächenveränderung ist, wobei er hin zu größeren Einschlagwinkeln signifikant abnimmt. Im Gegensatz dazu weisen die spröden Glasoberflächen hauptsächlich ein Erosionsverhalten bedingt durch ein muschelförmiges Abplatzen der Oberfläche auf. Auch hier nehmen die Auswirkungen hin zu größeren Einschlagwinkeln ab. Allerdings konnte auch bei den Glasproben ein, wenn auch im Vergleich zu den duktilen Materialien deutlich schwächer ausgeprägtes, Anhaften der Projektilfragmente nachgewiesen werden. Die Untersuchungen der Al6061-T6-Proben haben gezeigt, dass bereits bei der geringen Menge von ungefähr 10 mg JSC-1A die Oberflächenrauheit im Mittel über alle Einschlagwinkel um das circa 2,9-fache ansteigt. Auch bei den optischen Materialien konnte eine deutliche Veränderung der zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften gemessenen Transmission nachgewiesen werden. Der mittlere Verlust der optischen Transmission über alle Einschlagwinkel gemittelt über den betrachteten Wellenlängenbereich (400 nm - 800 nm) liegt bei den untersuchten Glasproben bei ungefähr 11,2%. Für die untersuchten Makrolon®-Proben ergibt sich im Mittel über alle Einschlagwinkel im selben Wellenlängenbereich ein ungefähr 1,2-fach höherer Wert für den Verlust an optischer Transmission. Zusätzlich konnte auch hier, wie bereits bei der Betrachtung ausschließlich senkrechter Einschläge, anhand des Verlaufs der Graphen keine signifikante Abhängigkeit der Reduzierung der optischen Transmission von der jeweiligen Wellenlänge des einfallenden Lichtes festgestellt werden.

2.7 Senkrechte Einschläge bei einer Geschwindigkeit von 360 m/s¹⁹

Für die hier beschriebenen Einschlagversuche zur Untersuchung der Auswirkungen des Einschlags des Mondanalogmaterials JSC-1A wurde der in Kapitel 2.1 beschriebene elektromagnetische Beschleuniger in der 60 μ F Konfiguration verwendet, um die für die Experimente notwendige Geschwindigkeit von ungefähr 360 m/s zu erreichen. Basierend auf den in Kapitel 2.4.2 dargelegten Annahmen wurde für die durchgeführten Experimente ein Korngrößenbereich von 250 μ m - 350 μ m gewählt, der wie zuvor direkt durch Sieben aus dem Originalmaterial gewonnen wurde.

2.7.1 Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen

Bei den Einschlaguntersuchungen senkrecht zur Probenoberfläche bei ungefähr 360 m/s wurden die vier Probenmaterialien, AlMg₃, Glas, Acrylglas (Polymethylmethacrylat, PMMA) und Polycarbonat (Makrolon®) mit ungefähr je 10 mg gesiebten JSC-1A-Partikeln (250 μ m – 350 μ m) beschossen. Die Auswahl der Probenmaterialien wurde auf der Grundlage früherer Verschleißversuche mit JSC-1A getroffen [14], [20], [21], [24].

Für die im Folgenden durchgeführten Untersuchungen wurden jeweils quadratische Proben mit einer Kantenlänge von 50 mm und einer Dicke von 3 mm verwendet. Die Aluminiumproben wurden hierzu zusätzlich poliert, um eine vergleichbare Oberflächenrauheit der Proben zu gewährleisten. Des Weiteren wurden die Glas- und Aluminiumproben vor den Versuchen mit Isopropanol gereinigt. PMMA und Makrolon® wurden mit destilliertem Wasser gereinigt. Alle optischen Proben wurden ansonsten im Auslieferungszustand belassen. Die optische Transmission der Proben wurde vor und nach dem Beschuss mit einem Spektrophotometer (Perkin Elmer UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19) bestimmt. Dazu wurden die Proben nach dem Beschuss nicht gereinigt, da anzunehmen ist, dass die auf der Probe anhaftenden Partikel einen signifikanten Einfluss auf die optischen Eigenschaften der Probe haben und des Weiteren anzunehmen ist, dass eine Reinigung der Oberflächen zum Beispiel bei rein robotischen Missionen nicht immer gewährleistet werden kann. Bei den optischen Proben wurde versucht den Worst-Case Fall abzudecken und die maximale Degradation der optischen Eigenschaften zu messen. Hierzu wurden die Messungen in etwa in der Mitte der Probe durchgeführt, da die Konzentration

¹⁹ Dieses Kapitel ist eine aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [86].

der Partikel nach außen hin abnimmt. Die verbleibende Transmission der beschossenen Proben wurde dabei mit der Transmission einer unbeschossenen, gereinigten Probe verglichen. Für die Messung der Änderung der Oberflächenrauheit der Aluminiumproben wurde ein Laserinterferometer (Rodenstock RM600) verwendet. Hierzu wurden die Proben ebenfalls vor und nach dem Beschuss vermessen. Der Verzicht auf eine Reinigung der Proben nach dem Beschuss erfolgt aus denselben Gründen wie bereits bei den optischen Proben dargelegt. Lediglich eine Aluminiumprobe wurde nach dem Beschuss in einem Ultraschallbad gereinigt, um zu überprüfen, ob und inwieweit die Partikel reversibel an der Oberfläche haften und keine dauerhaften Schäden hinterlassen. In Tab. 7 sind die verwendeten Probenmaterialien mit den zugehörigen gemessenen Verschleißgrößen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tab. 7: Untersuchte Materialien und gemessene Verschleißgrößen

Untersuchtes Material	Gemessene Größen	Makroskopische Oberflächenveränderung
AlMg3	Oberflächenrauheit [R_a]	Veränderung der Oberflächentopologie
Glas	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften
Acrylglas (PMMA)	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften
Polycarbonat (Makrolon®)	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften

2.7.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel behandelt die Versuchsergebnisse der JSC-1A Einschläge bei 360 m/s sowie für die oben beschriebenen Versuchsmaterialien. Die Materialien werden hierbei jeweils separat betrachtet. An diese Betrachtung schließt sich in den jeweiligen Abschnitten die Diskussion der Ergebnisse an.

2.7.2.1 Oberflächenrauheit von Aluminiumproben

Die Oberflächenrauheit der Aluminiumproben wurde aus dem Mittelwert von zwei diagonalen Messungen gebildet, um die unterschiedliche Auflösung in x- und y-Richtung der mit dem RM600 durchgeführten 3D-Messung zu kompensieren. Des Weiteren wurde für die Vermessung der beschossenen Proben die ISO 4288 (04/98) absichtlich nicht vollständig erfüllt. Es wurde hier grundsätzlich ein maximaler Cut-off von 2,5, unabhängig vom gemessenen R_a -Wert, gewählt, um die Messstrecke über alle Proben gleich zu halten. Da der beschädigte Bereich auf der Probe relativ klein ist, würde ein größerer Cut-off große

Teile der unbeschädigten Probe mit in die Berechnung einfließen lassen, wodurch die Bestimmung der Auswirkung der Einschläge erschwert wird.

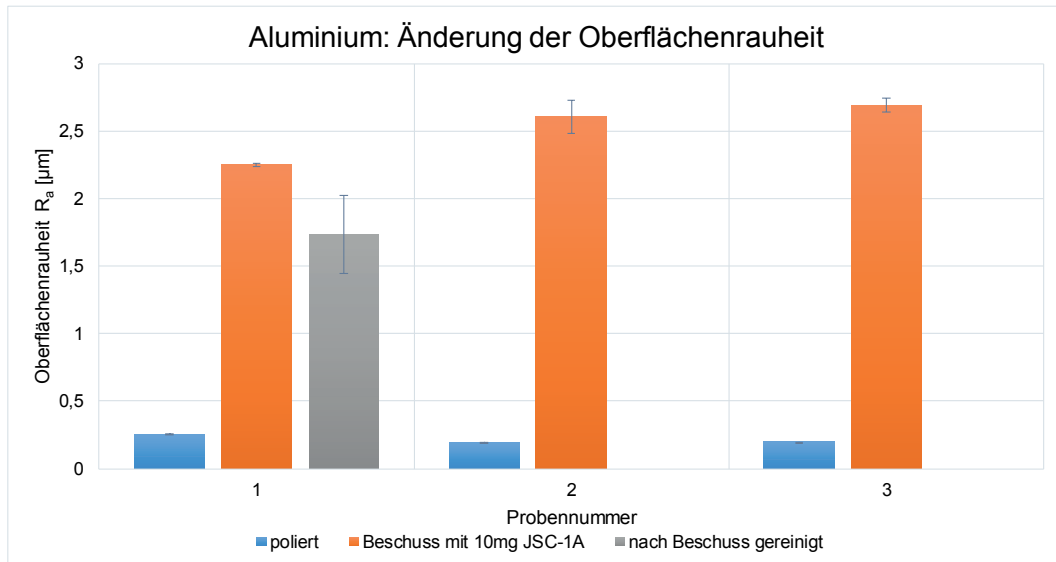


Abb. 41: Änderung der Oberflächenrauheit von Aluminiumproben

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 41 dargestellt. Die Fehlerbalken geben hierbei die Abweichung zwischen den beiden diagonalen Messungen an. Deutlich zu erkennen ist, dass die Oberflächenrauheit um das 8-fache und teilweise noch darüber hinaus durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln zunimmt. Die absoluten Werte sind damit deutlich höher als die in [14] beschriebenen Ergebnisse. Ein Grund hierfür könnte darin bestehen, dass in der vorliegenden Arbeit deutlich größere Partikel verwendet wurden. Der Hauptgrund besteht allerdings darin, dass eine Vielzahl einschlagender Partikel beim Einschlag zerbrechen und in der Oberfläche steckenbleiben, was zu einer deutlichen Erhöhung der Oberflächenrauheit führt. Trotz der Reinigung einer Probe in einem Ultraschallbad verbleiben eine große Anzahl von Partikeln in der Oberfläche und können nicht mehr herausgelöst werden. Wie Abb. 41 zeigt, sinkt die Oberflächenrauheit der gereinigten Probe nur in einem geringen Maße. Die Partikel bedecken also nicht lediglich die Oberfläche, sondern hinterlassen dauerhafte Schäden. Der Unterschied zwischen den beiden diagonalen Messungen ist hier relativ groß im Vergleich zu den anderen Proben. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Verteilung der herausgelösten Partikel nicht so einheitlich ist wie für den Partikeleinschlag.

Abb. 42 zeigt die Änderung der Oberflächenrauheit durch wiederholten Beschuss. Die Fehlerbalken geben dabei den Unterschied zwischen den beiden diagonalen Messungen wieder. Für diese Untersuchungen wurden die Proben zwischen zwei aufeinanderfolgenden

Schüssen nicht gereinigt und es wurde jeweils 10 mg des gesiebten JSC-1A pro Schuss verwendet. Daher entspricht die Schussnummer der 10-fachen Menge an JSC-1A-Partikeln in Milligramm. Es ist anzunehmen, dass durch den nachfolgenden Schuss die in der Oberfläche steckenden Partikel des vorangehenden Schusses teilweise zerbrechen. Teile der neu einschlagenden Partikel haften an den zuvor eingeschlagenen Partikeln oder bleiben ebenso in der Probenoberfläche stecken. Aus diesem Grund steigt die Oberflächenrauheit über den betrachteten Bereich relativ konstant an. Der Wert für den zweiten Beschuss kann leider nicht angegeben werden, da hier eine Fehlmessung mit dem RM600 auftrat. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich der in Abb. 42 dargestellte Trend nicht über eine Vielzahl von Schüssen weiter fortsetzt. Es ist eher davon auszugehen, dass sich der Wert der Oberflächenrauheit asymptotisch einem Maximum annähert. Die Untersuchungen zeigen wie bereits zuvor, dass der für die Änderung der Oberflächeneigenschaften dominante Prozess für Aluminiumproben im Anhaften beziehungsweise Steckenbleiben der JSC-1A-Partikel an oder in der Probenoberfläche zu finden ist, wohingegen erosive Prozesse für die verwendete Partikelgröße, Geschwindigkeit und Partikelmenge eine eher untergeordnete Rolle spielen.

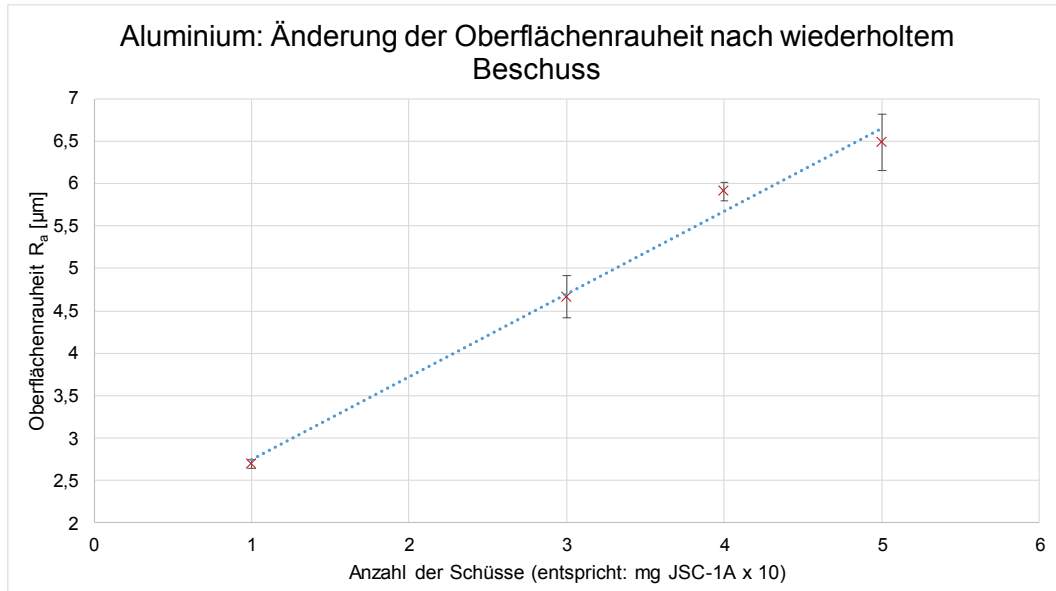


Abb. 42: Änderung der Oberflächenrauheit durch wiederholten Beschuss

2.7.2.2 Verschleißverhalten von optischen Medien

Wie in Kapitel 2.7.1 dargelegt, wurden die folgenden drei optischen Medien, Glas, Acrylglas (PMMA) und Polycarbonat (Makrolon®) für die Untersuchung von senkrechten Einschlägen von JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 360 m/s verwendet. Für die Charakterisierung des

auftretenden Verschleißes dieser technischen Oberflächen wurde die Änderung der optischen Transmission gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Folgenden dargestellt.

Änderung der Transmission von Glasproben

Abb. 43 (links) zeigt, dass Glas eine relative hohe optische Transmission für Wellenlängen zwischen 400 nm und 800 nm besitzt. Wobei die Transmission hin zu größeren Wellenlängen leicht abfällt. Des Weiteren zeigt der Graph, dass die untersuchten Glasproben Wellenlängen unterhalb von 300 nm nahezu vollständig absorbieren. Aus diesem Grund und aufgrund der besseren Vergleichbarkeit mit den beiden optischen Kunststoffen wurde die Änderung der optischen Eigenschaften nur für Wellenlängen zwischen 400 nm und 800 nm näher betrachtet. Dieser Wellenlängenbereich liegt hauptsächlich im Bereich des sichtbaren Lichtes.

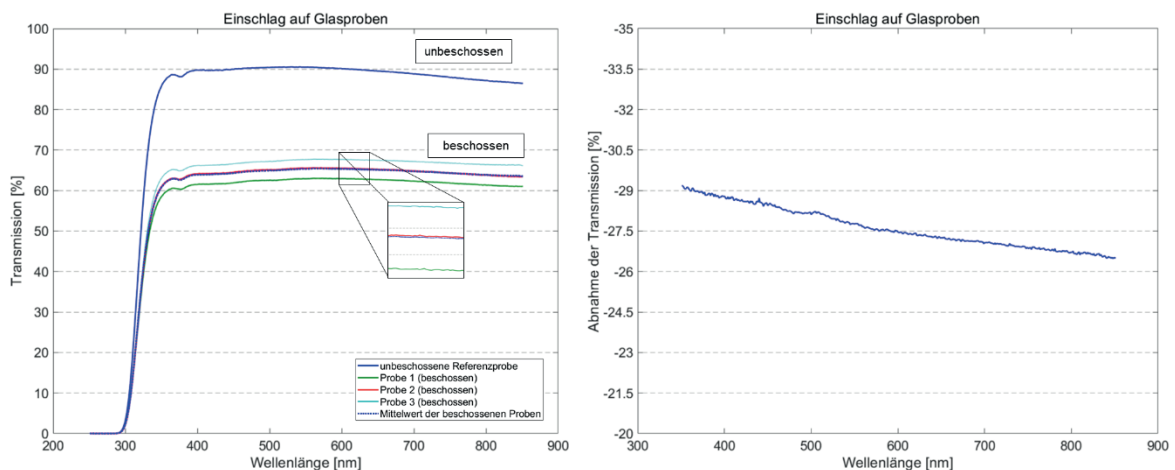


Abb. 43: Transmission (links) und relativer Verlust von Transmission (rechts) für Glasproben

Abb. 43 (links) zeigt des Weiteren die verbleibende optische Transmission von drei Glasproben nach dem Beschuss. Die gestrichelte Linie steht hierbei für den Mittelwert der optischen Transmission der drei Proben. Ein kleiner Bereich des Graphen ist zudem vergrößert dargestellt, um eine bessere Unterscheidung zwischen dem Mittelwert und den Messwerten einer Probe zu ermöglichen. In Abb. 43 (links) ist zu erkennen, dass die verbleibende Transmission im Mittel auf ungefähr 65% absinkt und relativ konstant über den Bereich des sichtbaren Lichtes bleibt. Auch der starke Abfall der Transmission bei ungefähr 350 nm und das lokale Minimum bei ungefähr 400 nm sind in den Graphen der beschossenen Proben vorhanden. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass die

durch den Beschuss hervorgerufene Änderung der Transmission im untersuchten Wellenlängenbereich nicht von der Wellenlänge abhängt. Diese Aussage wird weiterhin durch den Graphen rechts in Abb. 43 gestützt. Dieser Graph zeigt die relative gemittelte Abnahme der Transmission der Glasproben nach dem Beschuss in Prozent. Im untersuchten Wellenlängenbereich sinkt die Abnahme der Transmission lediglich um ungefähr 2% hin zu größeren Wellenlängen ab und ist damit im Verlauf relativ konstant. Abb. 43 (rechts) zeigt ferner, dass die relative Abnahme der Transmission etwas unter 30% liegt. Dies ist ein verhältnismäßig geringer Wert im Vergleich zu den in [14] ermittelten Werten für Acrylglas. In dieser Arbeit [14] wird die gemittelte Abnahme im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm mit 67% angegeben, was einer relativen Abnahme von mehr als 60% entspricht. Ein Grund hierfür könnte sein, dass bei den Glasproben Teile der Oberfläche herausgeschlagen werden, was lediglich zu einer Streuung des Lichtes führt, wohingegen bei den untersuchten Acrylglasproben in [14] ein Eindringen der Partikel in die duktile Oberfläche und damit eine Bedeckung und direkte Behinderung des Lichtwegs nicht ausgeschlossen werden kann. Dieser Effekt könnte zudem durch die signifikant größere Menge an einschlagendem Material in [14] verstärkt werden.

Änderung der Transmission von Acrylglasproben (PMMA)

Zusätzlich zu den Glasproben wurden zwei optische Kunststoffe hinsichtlich ihres Verschleißverhalten beim Beschuss mit Mondanalogmaterial untersucht. Als erstes soll Acrylglas (PMMA) näher betrachtet werden. Die Auswahl von PMMA wurde getroffen, da Acrylglas bereits zuvor in Studien [14], [24] verwendet wurde, die sich mit dem Verschleißverhalten durch Mondanalogmaterial beschäftigen. Die linke Seite von Abb. 44 zeigt, dass die unbeschossene Probe eine relativ konstante Transmission von ungefähr 92% im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 800 nm aufweist. Für Wellenlängen kleiner 400 nm bricht die Transmission rapide ein. Dieses Verhalten der unbeschossenen Proben deckt sich auch mit zuvor durchgeführten Studien zum Verschleiß durch Mondanalogmaterial [14]. In der vorliegenden Arbeit beschränken sich die im Folgenden dargestellten Ergebnisse auf diesen Bereich konstanter Transmission zwischen 400 nm und 800 nm.

Die drei durchgezogenen Linien in Abb. 44 (links) zeigen die verbleibende Transmission für die drei verwendeten Proben nach dem Beschuss mit ungefähr 10 mg JSC-1A. Die gestrichelte Linie gibt den Mittelwert der drei Proben über den gemessenen Wellenlängenbereich an. Die Ergebnisse zeigen, dass nur ein geringer Unterschied

zwischen den drei Messungen auftritt, was für eine vergleichsweise hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse spricht. Aus diesem Grund wird in den späteren Analysen und Darstellungen nur der Mittelwert weiter betrachtet. Die gemittelte verbleibende Transmission der Acrylglasproben ist mit ungefähr 50% deutlich höher als im Vergleich zu den in [14] angegebenen Testergebnissen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass in der zuvor durchgeführten Studie [14] die Proben mit einigen Gramm des Mondanalogmaterials beschossen wurden, wohingegen in der vorliegenden Arbeit nur ungefähr zehn Milligramm des Mondanalogmaterials JSC-1A verwendet wurden. Des Weiteren verwendeten Mpagazehe et al. [14] eine feinere Fraktion des Mondanalogmaterials (JSC-1AF). Insgesamt mehr und feinere Partikel könnten zu einer gleichmäßigeren Beschädigung der Probe führen. Dadurch ergeben sich möglicherweise keine beziehungsweise weniger Stellen auf der Probe, die nicht durch den Beschuss betroffen sind und an denen Licht die Probe ungehindert passieren kann.

Abb. 44 (rechts) zeigt die gemittelte relative, auf die Transmission der unbeschossenen Probe bezogene, Reduzierung der Transmission der Acrylglasproben im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 800 nm. Der Graph zeigt, dass die Abnahme der relativen Transmission hin zu größeren Wellenlängen nur ungefähr 4% beträgt, was einer mittleren Reduzierung von weniger als 1% pro 100 nm entspricht. Aufgrund dieses relativ konstanten Verlaufs kann angenommen werden, dass die Reduzierung der Transmission im Bereich sichtbaren Lichtes nicht von der jeweiligen Wellenlänge abhängt. Allerdings ist zu erwähnen, dass wie in Abb. 44 (links) zu erkennen die verbleibende Transmission der beschossenen Proben leicht in Richtung kleinerer Wellenlängen abnimmt, was für die unbeschossenen Proben nicht auftritt. Des Weiteren ist zu entnehmen, dass alle fünf Graphen denselben Verlauf aufweisen.

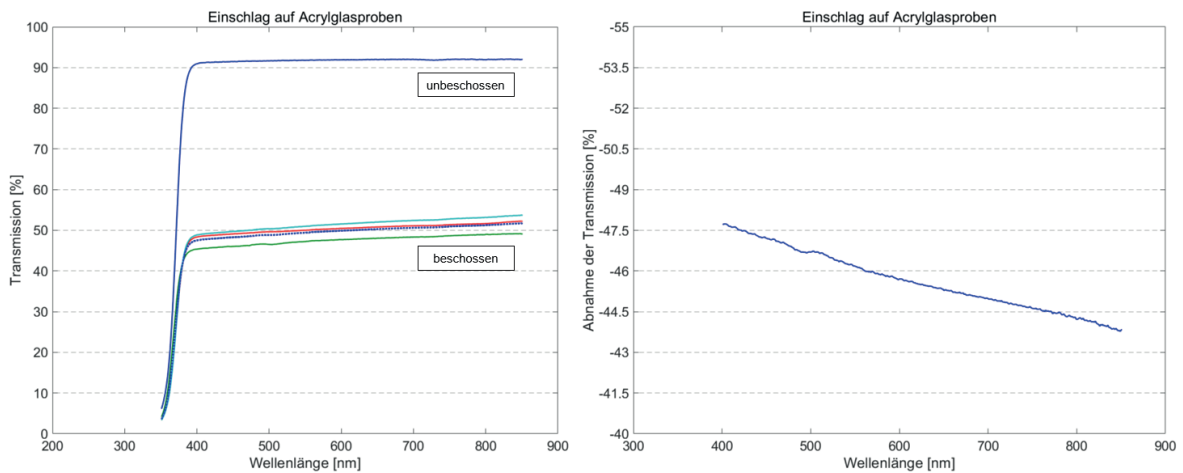


Abb. 44: Transmission (links) und relativer Verlust von Transmission (rechts) für Acrylglasproben

Änderung der Transmission von Polycarbonatproben (Makrolon®)

Das letzte in diesen Teilversuchen untersuchte Material ist Polycarbonat (Makrolon®). Abb. 45 (links) zeigt, dass die Transmission der gereinigten unbeschossenen Makrolon®-Proben im Bereich des sichtbaren Lichtes und im Nahinfrarotbereich (400 nm - 800 nm) relativ konstant bei einem Wert etwas unter 90% liegt. Die Transmission sinkt leicht hin zu kleineren Wellenlängen, liegt aber in einem sehr ähnlichen Bereich wie die beiden zuvor untersuchten optischen Materialien. Ähnlich wie bei Acrylglas bricht die Transmission drastisch für Wellenlängen unter 400 nm ein, was bedeutet, dass dieses Material im UV-Bereich nahezu undurchlässig ist. Aus diesem Grund werden auch hier nur Wellenlängen näher betrachtet, die hauptsächlich im sichtbaren Bereich liegen.

Die Ergebnisse für die Messung der verbleibenden Transmission nach dem Beschuss sind ebenfalls in Abb. 45 (links) dargestellt. In der Abbildung repräsentieren die drei durchgezogenen Linien je eine untersuchte Probe. Die gestrichelte Linie gibt den Mittelwert der drei Messungen an. Es zeigt sich, dass die verbleibende mittlere Transmission durch den Beschuss deutlich reduziert wird. Sie geht im untersuchten Bereich (400 nm - 800 nm) auf Werte von unter 40% zurück. Alle drei Messungen weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf und der Unterschied zwischen den drei Messungen beträgt weniger als 7%. Dies deutet auf eine relativ gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der drei Messungen hin. Der Vergleich mit den unbeschossenen Makrolon®-Proben zeigt, dass der Trend abnehmender Transmission hin zu kleineren Wellenlängen auch in den beschossenen Proben wiedergefunden werden kann. Allerdings unterscheidet sich die Form des Graphen der beschossenen Proben insbesondere im Bereich zwischen ungefähr 500 nm und 650 nm

leicht von den unbeschossenen Proben. Im rechten Graphen in Abb. 45 ist die mittlere relative Abnahme der Transmission in Prozent dargestellt. Es zeigt sich, dass diese Abweichung nicht allzu groß ist. Die relative gemittelte Abnahme der Transmission steigt im Bereich zwischen 500 nm und 650 nm lediglich um circa 2% an, wohingegen die gesamte Zunahme im untersuchten Bereich (400 nm - 800 nm) bei unter 6% hin zu kleineren Wellenlängen liegt. Die bedeutet weiterhin, dass kein nennenswerter Einfluss der Wellenlänge auf die Abnahme der Transmission im untersuchten Bereich (400 nm - 800 nm) gefunden werden kann.

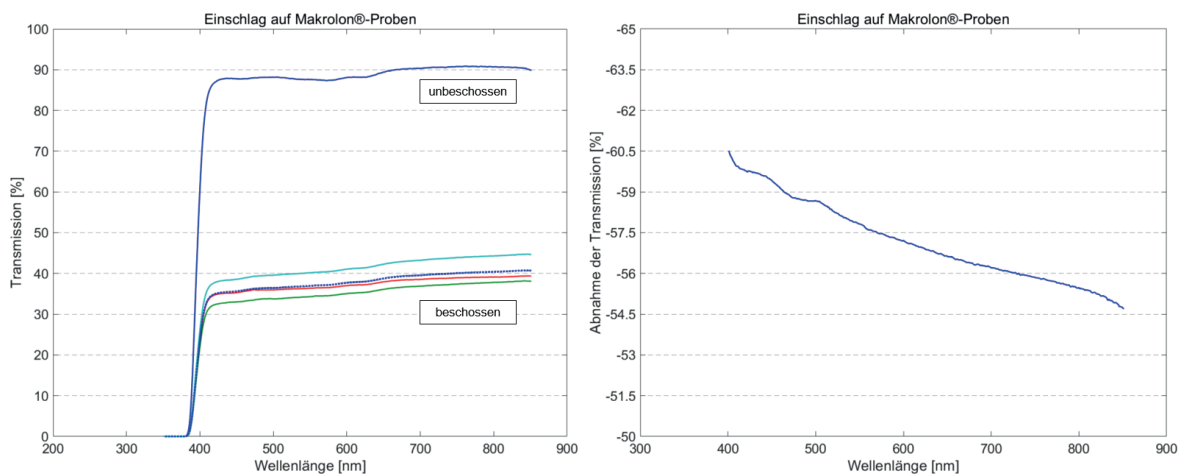


Abb. 45: Transmission (links) und relativer Verlust von Transmission (rechts) für Makrolon®-Proben

Diskussion – Verschleißverhalten von optischen Medien

Die drei untersuchten optischen Materialien weisen ähnliche, relativ konstante Werte von ungefähr 90% für die optische Transmission im Wellenlängenbereich von 400 nm - 800 nm auf. Des Weiteren zeigen alle drei Materialien einen deutlichen Einbruch der Transmission im UV-Bereich für Wellenlängen kleiner als 400 nm oder darunter. Aufgrund der relativ ähnlichen Transmission im Bereich des sichtbaren Lichtes und im Nahinfrarotbereich können die drei Materialien relativ einfach verglichen werden. Wie zuvor gezeigt, konnte keine nennenswerte Abhängigkeit zwischen Wellenlänge und Abnahme der Transmission der beschossenen Proben in diesem Bereich gefunden werden. Allerdings zeigen alle drei Materialien einen leichten Anstieg der relativen Abnahme der Transmission hin zu kleineren Wellenlängen. Der Anstieg der relativen Abnahme der Transmission liegt hierbei zwischen ungefähr 2% und 6%. Ein möglicher Grund könnte die Zunahme von Streuung für kleinere Wellenlängen sein.

Für die Glasproben ergibt sich mit Abstand die geringste Abnahme der Transmission durch den Beschuss. Dieses Material ist hart, allerdings auch spröde. Aus diesem Grund sorgen die Partikeleinschläge hauptsächlich für ein Herausschlagen von Oberflächenmaterial, wobei allerdings auch Partikel des verwendeten Mondanalogmaterials in den Schadstellen gefunden werden können. Damit wird ein gewisser Anteil an eingestrahlem Licht durch die anhaftenden Partikel direkt abgehalten, wohingegen allerdings der Großteil des auftreffenden Lichtes lediglich durch die beschädigte Oberfläche gestreut wird. Acrylglas zeichnet sich im Vergleich zu Glas durch eine größere Abnahme der verbleibenden Transmission aus. Der Grund dafür ist, dass Acrylglas eine geringere Härte besitzt und zudem duktiler als Glas ist. Die Mikroskopaufnahmen in Abb. 46 zeigen, dass im Vergleich zu Glas kein muschelförmiges Abplatzen der Oberfläche stattfindet, wohingegen eine große Menge an kleinen Partikelfragmenten in der Oberfläche der Acrylglasproben haftet. Diese Oberflächenveränderung hat einen signifikant höheren Einfluss auf die Transmission als die muschelförmigen Schädigungen der Glasproben. Dies kann auch qualitativ in Abb. 46 gesehen werden. Das Material mit der größten Verschlechterung der optischen Eigenschaften nach dem Beschuss ist Makrolon®. Es ist ebenfalls ein duktiler Material, besitzt aber im Vergleich zu Acrylglas eine geringere Härte. Abb. 46 zeigt, dass der Schädigung des Materials derselbe Prozess zu Grunde liegt wie für Acrylglas. Allerdings sind die beschädigten Flächen größer und mehr Partikel verbleiben in der Oberfläche.

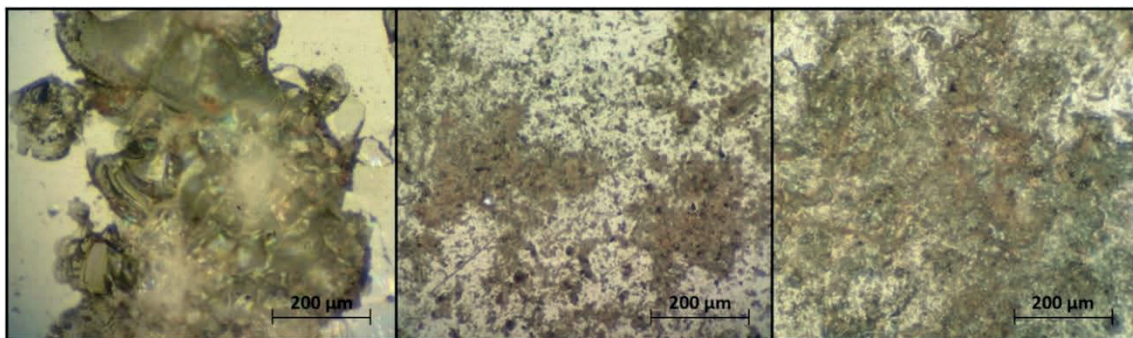


Abb. 46: Mikroskopaufnahmen von Einschlägen auf Glas- (links), Acrylglas- (Mitte) und Makrolon®-Proben (rechts)

Abb. 47 zeigt den Vergleich der Abnahme der gemittelten Transmission der drei untersuchten Materialien im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 800 nm. Wie bereits zuvor gezeigt, ist Glas das am wenigsten von den Einschlägen betroffene Material. Glas verliert nur ungefähr 25% seiner Transmission, wohingegen der Effekt bei den Makrolon®-Proben mehr als doppelt so groß ist. Die Änderung der Transmission von Acrylglas liegt zwischen diesen beiden Werten. Der Vergleich der drei untersuchten

Materialien zeigt, dass der dominante Schädigungseffekt für Glas das Herausschlagen von Oberflächenmaterial ist, wohingegen die optischen Eigenschaften duktiler transparenter Kunststoffe primär durch ein Anhaften beziehungsweise die Einlagerung von einschlagenden Partikeln geschädigt werden. Aufgrund des Blockierens des Lichtwegs durch anhaftende Partikel zeichnen sich die untersuchten optischen Kunststoffe durch eine geringere verbleibende Transmission aus als die Glasproben, da bei Glas die Transmission zum größten Teil durch Streuung reduziert wird.

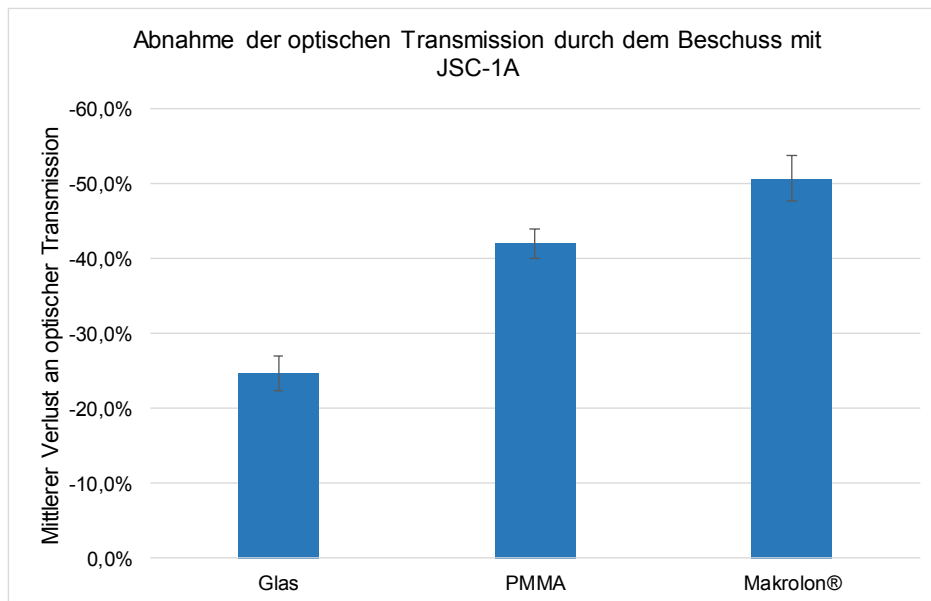


Abb. 47: Vergleich der absoluten mittleren Abnahme der Transmission zwischen 400 nm und 800 nm

2.7.3 Fazit der Einschlaguntersuchungen bei 360 m/s

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die senkrechten Einschläge des Mondanalogmaterials JSC-1A bei ungefähr 360 m/s zu einer signifikanten Degradation der makroskopischen Oberflächeneigenschaften von metallischen und optischen Werkstoffen führen. Der Beschuss mit ungefähr 10 mg des Mondanalogmaterials resultiert im Mittel über alle untersuchten Aluminiumproben in einer Steigerung der Oberflächenrauheit um mehr als das 10-fache. Die Untersuchung der optischen Materialien zeigt, dass der Beschuss mit JSC-1A auf Glas im Vergleich zu den beiden transparenten Kunststoffen den geringsten Einfluss auf die Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften hat. Die Reduzierung der optischen Transmission beträgt im Mittel bei den Glasproben im Bereich zwischen 400 nm und 800 nm nur ungefähr 25%. Die beiden Kunststoffe degradieren signifikant stärker, wobei der Verlust an optischer Performance im gleichen

Wellenlängenbereich bei Makrolon® mit etwas über 50% am größten ist. Im Hinblick auf den Mechanismus der Schädigung der Probenoberfläche zeigt der Vergleich der Materialien, dass es bei den spröden Glasoberflächen hauptsächlich zu einem muschelförmigen Absplittern der Oberfläche kommt, wohingegen bei den drei duktilen Materialien ein Einlagern und Anhaften der einschlagenden Partikel dominiert.

2.8 Einschläge bei 360 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln²⁰

Für diesen Teil der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Experimente zur Untersuchung der Auswirkungen des Einschlags des Mondanalogmaterials JSC-1A unter verschiedenen Einschlagwinkeln wurde ein Korngrößenbereich zwischen 250 µm - 350 µm gewählt. Der verwendete Korngrößenbereich wurde hierzu wie bereits zuvor direkt aus dem Originalmaterial durch Sieben gewonnen. Die Einschlaggeschwindigkeit sowie der zugehörige Korngrößenbereich basieren auf den in Kapitel 2.4.2 dargelegten Annahmen. In diesem Teilversuch wurden die Partikel auf eine Geschwindigkeit von ungefähr 360 m/s beschleunigt. Dafür wurde ebenfalls der in Kapitel 2.1 beschriebene elektromagnetische Wirbelstrombeschleuniger im Betriebsmodus mit dem 60 µF-Kondensator verwendet.

2.8.1 Probenvorbereitung und gemessene Verschleißgrößen

In der vorliegenden Arbeit wurden für die Untersuchungen der Auswirkungen von Einschlägen des Mondanalogmaterials JSC-1A unter verschiedenen Einschlagwinkeln (Definition der Winkel nach Abb. 34) die drei Testmaterialien Aluminium, Glas und Makrolon® verwendet. Der Beschuss wurde hierbei mit ungefähr je 10 mg gesiebten JSC-1A-Partikeln (250 µm – 350 µm) durchgeführt. Hierbei wurden insgesamt sechs verschiedene Einschlagwinkel in gleichen Schritten zu je 15° zwischen 0° (senkrecht zur Oberfläche) und 75° (streifend) betrachtet. Ähnlich wie in den zuvor durchgeführten Untersuchungen für Einschläge bei ungefähr 200 m/s wurden für die Proben zwei unterschiedliche Größen gewählt. Die Versuche bis zu einem Einschlagwinkel von 45° wurden mit quadratischen Proben mit einer Kantenlänge von 50 mm durchgeführt. Für die beiden flacheren Einschlagwinkel 60° und 75° wurden rechteckige Proben (50 x 60 mm²) verwendet. Das für diese Versuche notwendige Anstellen der Probe sorgt dafür, dass die Fläche, die durch die Einschläge betroffen ist, von einer annähernd kreisförmigen Fläche zu

²⁰ Dieses Kapitel ist eine aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [87].

einem zunehmend schmalen Band wird. Durch eine in Beschussrichtung längere Probe kann somit sichergestellt werden, dass alle Partikel auf der Probe einschlagen. Für die Probendicke wurde für alle Proben, wie bereits bei den Versuchen zuvor, 3 mm gewählt. Für eine gute Vergleichbarkeit mit den in Kapitel 2.7 durchgeführten senkrechten Einschlägen bei ungefähr 360 m/s wurden auch hier die Aluminiumproben poliert, um eine vergleichbare Oberflächengüte und Oberflächenrauheit zu gewährleisten. Die Reinigung der AlMg3-Proben erfolgte nach dem Poliervorgang mit Isopropanol. Die optischen Probenmaterialien wurden unverändert vom Händler übernommen und lediglich vor den Versuchen mit destilliertem Wasser gereinigt.

Zusätzlich zu den in den vorigen Kapitel (2.5 - 2.7) mittels Mikroskopaufnahmen durchgeführten qualitativen Untersuchungen der Auswirkungen des Einschlags von Mondanalogmaterial, sollen in diesem Kapitel auch quantitative Untersuchungen durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser Untersuchungen sollen auch quantitative Aussagen darüber ermöglicht werden inwieweit sich Mondanalogmaterial auf den Proben ablagert beziehungsweise die Oberflächen erodiert werden. Dazu wurde die Masse der einzelnen Proben vor und nach dem Beschuss mit ungefähr 10 mg JSC-1A mit einer Analysewaage (Ohaus, Discovery, DV215CD) bestimmt. Zur Reduzierung der Messfehler wurde für jede Probe jeweils der Mittelwert aus drei unterschiedlichen Messungen verwendet. Die Masse der Proben nach dem Beschuss wurde ohne eine weitere Reinigung der Proben ermittelt. Dadurch fließt die Masse der anhaftenden Partikel direkt in die gemessene Gesamtmassenänderung mit ein. Diese Messungen ermöglichen eine Aussage darüber, inwieweit erosive oder An- beziehungsweise Einlagerungsprozesse von Partikeln dominieren. Des Weiteren wurden wie zuvor die Änderung der Oberflächenrauheit der Aluminiumproben mit einem Laserinterferometer (Rodenstock RM600) und die Änderung der optischen Transmission der optischen Medien mit einem Spektrophotometer (Perkin Elmer UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19) gemessen, um die Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften zu charakterisieren. Auch hierzu wurden die Proben nach dem Beschuss nicht gereinigt. Eine Zusammenfassung der verwendeten Probenmaterialien mit den zugehörigen gemessenen Verschleißgrößen ist in Tab. 8 dargestellt.

Tab. 8: Probenmaterialien und gemessene Verschleißgrößen

Untersuchtes Material	Gemessene Größen			Makroskopische Oberflächenveränderung
	Einschlagwinkel [°]	Massenänderung [mg; %]	Oberflächenrauheit [R _a]	
AlMg3	Einschlagwinkel [°]	Massenänderung [mg; %]	Oberflächenrauheit [R _a]	Veränderung der Oberflächentopologie
Glas	Einschlagwinkel [°]	Massenänderung [mg; %]	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften
Polycarbonat (Makrolon®)	Einschlagwinkel [°]	Massenänderung [mg; %]	Transmission [%]	Veränderung der optischen Eigenschaften

2.8.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen des Einschlags von ungefähr 10 mg JSC-1A (250 µm – 350 µm) bei ungefähr 360 m/s auf AlMg3, Glas und Makrolon® beschrieben. Hierzu werden die unterschiedlichen Probenmaterialien jeweils getrennt betrachtet. Als erstes wird dazu die Massenänderung der Proben durch den Beschuss betrachtet. Daran schließt sich jeweils die Untersuchung der aus dem Partikeleinschlag resultierenden Änderungen der makroskopischen Oberflächeneigenschaften an. In jedem Abschnitt werden zuerst die Ergebnisse präsentiert und anschließend direkt diskutiert.

2.8.2.1 Untersuchung von Aluminiumproben

Massenänderung durch Einschlag auf Aluminium

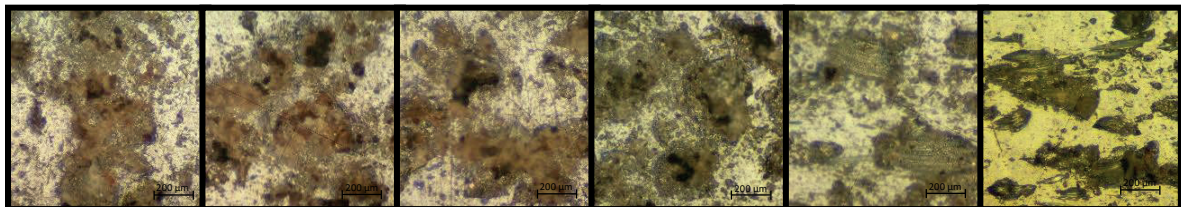


Abb. 48: Mikroskopaufnahmen von Aluminiumproben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal, 15°, 30°, 45° 60°, 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A

Resultate: In diesem Abschnitt soll die Massenänderung der Aluminiumproben durch den Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A bei verschiedenen Einschlagwinkeln untersucht werden. Die aus dem Beschuss resultierende absolute und relative Massenänderung der Proben ist in Abb. 49 dargestellt. Die relative Massenänderung ist hierbei als die absolute Massenänderung der Probe bezogen auf die Partikelmasse der einschlagenden Partikel definiert. Diese Größe ermöglicht es verschiedene Proben direkt miteinander zu vergleichen, auch wenn die Masse der einschlagenden Partikel (ungefähr 10 mg) leicht variiert. Die dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die größte Massenänderung der Proben bei steilen Einschlagwinkeln

auffritt. Zur Unterstützung der folgenden Diskussion und um spätere Rückschlüsse auf die zuvor vorgestellten quantitativen Ergebnisse zu ermöglichen sind in Abb. 48 zusätzlich exemplarisch Mikroskopaufnahmen der beschossenen Probenoberflächen dargestellt.

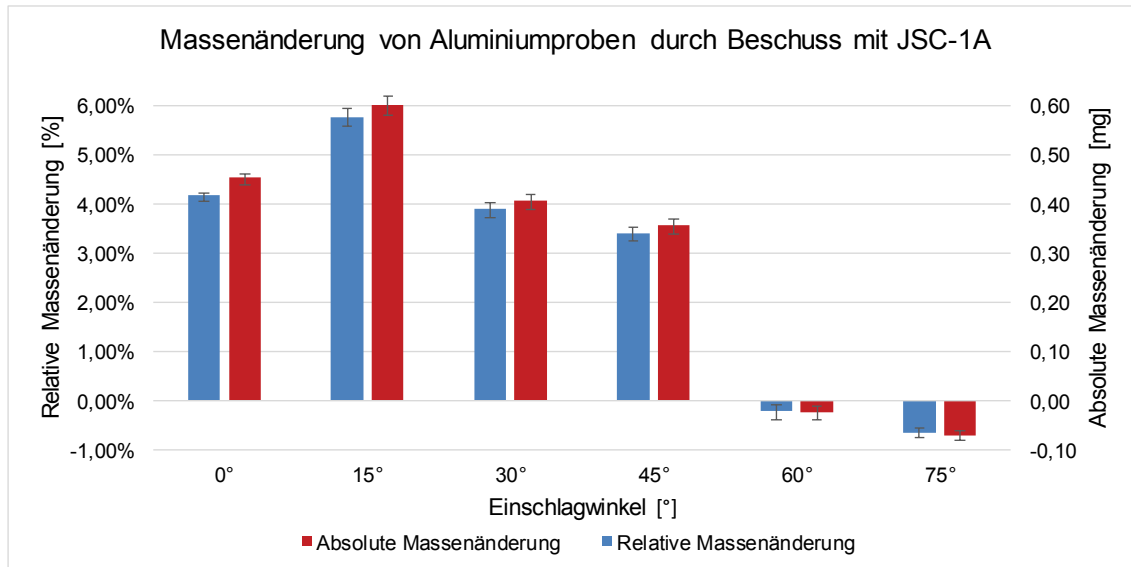


Abb. 49: Massenänderung von Aluminiumproben nach Beschuss (0° = normal, 75° = streifend)

Diskussion: Abb. 49 zeigt, dass der Einschlag des Mondanalogmaterials für sämtliche Einschlagwinkel kleiner 60° zu einer Steigerung der Gesamtmasse der Proben führt. Daraus lässt sich ableiten, dass es für diese Einschlagwinkel zu einer Ablagerung der einschlagenden Projektilfragmente auf der Probenoberfläche kommt. Es wird mehr Material ab- beziehungsweise eingelagert als durch erosive Vorgänge abgetragen wird. Die stärkste Ablagerung an Material findet bei einem Einschlagwinkel von 15° statt. Hier erreicht die relative Massenzunahme mit ungefähr 6% ihren mit Abstand größten Wert. Bei diesem Einschlagwinkel können die scharfkantigen JSC-1A-Partikel demnach am besten in die Oberfläche eindringen und in den daraus resultierenden Schadstellen haften. Dieser Umstand kann auch anhand der Mikroskopaufnahmen in Abb. 48 belegt werden. Diese Aufnahme zeigt, dass die Probenoberfläche großflächig mit Projektilfragmenten bedeckt ist. Beim Beschuss senkrecht zur Oberfläche bleiben weniger Partikel auf der Oberfläche der Aluminiumproben haften. Die relative Massenänderung sinkt auf einen Wert von ungefähr 4% ab. Auch hin zu größeren Einschlagwinkeln bis zu 45° sinken die Gewichtszunahme und damit die Masse an abgelagerten Partikeln deutlich im Vergleich zu den Einschlägen bei 15° ab. Als mögliche Erklärung hierfür kann angeführt werden, dass mit steigendem Einschlagwinkel auch die Geschwindigkeitskomponente parallel zur Probenoberfläche

zunimmt und die Projektile zunehmend an den Schadstellen abgleiten und nicht haften. Die relative Massenänderung liegt hier bei ähnlichen wenn auch etwas geringeren Werten als für Einschläge senkrecht zur Oberfläche. Diese Zusammenhänge werden ebenfalls von den Mikroskopaufnahmen in Abb. 48 gestützt. Ein Massenverlust findet erst ab einem Einschlagwinkel von 60° statt, wobei der Maximalwert der Massenabnahme bei 75° erreicht wird. Dies kann auch anhand der Mikroskopaufnahmen in Abb. 48 gezeigt werden. Für die beiden streifenden Einschlagwinkel 60° und 75° verbleiben nur geringe Mengen an Projektilfragmenten auf der Probenoberfläche und im Gegensatz zu den steileren Einschlagwinkeln sind deutliche Kratzer und Riefen auf der Materialoberfläche zu erkennen. Somit kann abschließend festgehalten werden, dass für Einschlagwinkel kleiner 60° das Anhaften beziehungsweise die Ablagerung von Projektilfragmenten den dominierenden Schädigungsprozess darstellt und erst für größere, streifende Einschlagwinkel erosive Effekte dominieren. Anhand des Vergleichs der Werte der Massenzunahme und -abnahme kann weiterhin gefolgert werden, dass insgesamt für die untersuchten duktilen Aluminiumoberflächen die Ablagerung von Projektilfragmenten dominiert. Dies deckt sich mit den qualitativen Erkenntnissen der Einschläge bei 200 m/s.

Änderung der Oberflächenrauheit durch Einschlag bei Aluminium

Resultate: Abb. 50 zeigt die Oberflächenrauheit der AlMg3-Proben vor und nach dem Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A für die verschiedenen untersuchten Einschlagwinkel (0° = normal zur Probenoberfläche, 75° = streifend). Es ist zu erkennen, dass die Werte der Oberflächenrauheit mit steigendem Einschlagwinkel hin zu streifenden Einschlägen kontinuierlich abnehmen. Die angegebenen Werte der Oberflächenrauheit der beschossenen Proben bei Einschlagwinkeln kleiner 60° sowie die Werte der Oberflächenrauheit der unbeschossenen Proben errechnen sich hierbei aus dem Mittelwert zweier senkrecht zueinander durchgeführten Messungen. Für die Berechnung der Einschläge bei 60° und 75° ist der Mittelwert aus zwei parallelen Messungen angegeben, da bei diesen beiden Einschlagwinkeln anders als bei den steileren Einschlagwinkeln die mit Einschlägen bedeckte Fläche nicht mehr annähernd kreisförmig ist, sondern die Einschläge über ein schmales Band in Schussrichtung verteilt sind. Durch die parallelen Messungen soll die Vergleichbarkeit mit den anderen Messungen erhöht werden, da so sichergestellt werden kann, dass nicht eine große Strecke mit in die Berechnung der Oberflächenrauheit eingeht auf der keine Einschläge stattgefunden haben. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass wie bereits zuvor bei den beschossenen Proben die ISO 4288 (04/98)

absichtlich nicht vollständig eingehalten wurde. Auch hier wurde der Cut-off grundsätzlich unabhängig vom jeweils gemessenen R_a -Wert auf 2,5 festgelegt. Diese Beschränkung wurde wie bereits zuvor durchgeführt, um die Messstrecke für die Oberflächenrauheit über alle Proben gleich zu halten. Da die Fläche auf der Einschläge stattfinden nur einen gewissen Teil der Probe bedecken, kann dadurch verhindert werden, dass zum Beispiel bei einem größeren Cut-off, weite Teile der Messstrecke nicht von Einschlägen betroffen sind, wodurch eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse eingeschränkt würde.

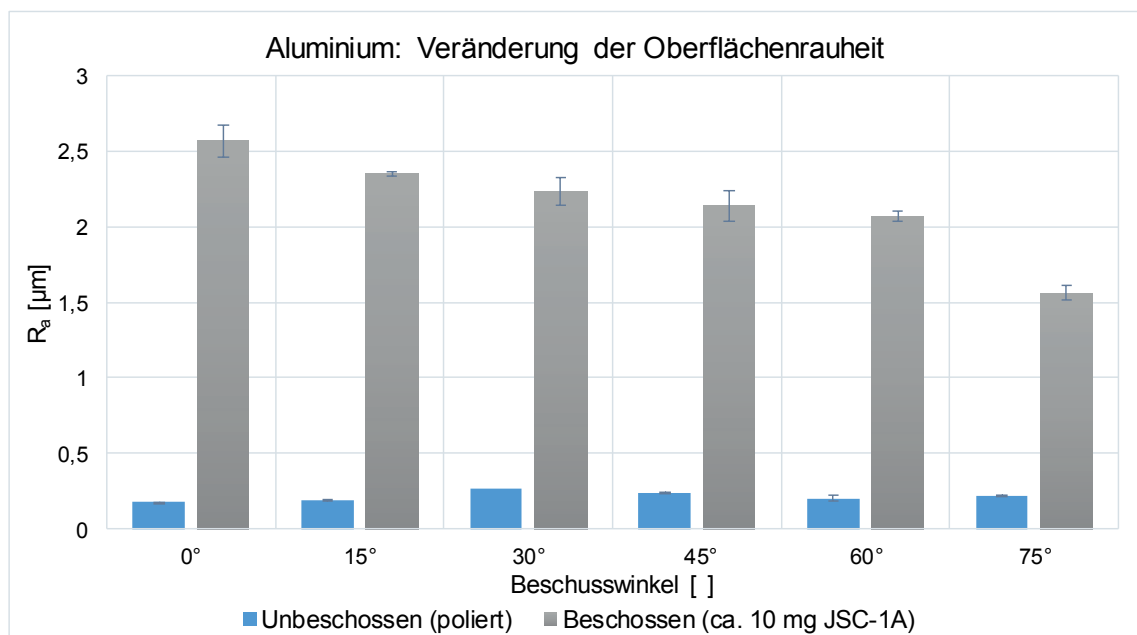


Abb. 50: Veränderung der Oberflächenrauheit von Aluminium nach dem Beschuss mit JSC-1A (0° = normal, 75° = streifend)

Diskussion: Abb. 50 zeigt, dass die Oberflächenrauheit nach dem Beschuss mit JSC-1A-Partikeln für Einschlagwinkel kleiner 75° um mehr als das 10-fache größer ist als die Oberflächenrauheit der unbeschossenen Proben. Des Weiteren zeigt das Balkendiagramm, dass die Oberflächenrauheit der beschossenen Proben kontinuierlich in Richtung größerer und damit flacherer Einschlagwinkel abnimmt. Dabei reduziert sich der Wert der Oberflächenrauheit der beschossenen Proben im Bereich zwischen 0° (senkrechter Einschlag) und 60° über den gesamten Winkelbereich um lediglich ungefähr 20%. Erst zwischen den beiden flachen Einschlagwinkeln 60° und 75° tritt eine deutlich stärkere Abnahme des R_a -Wertes auf. Die Abnahme des R_a -Wertes ist zwischen diesen beiden Einschlagwinkeln (60° und 75°) mit ungefähr 25% größer als die gesamte Abnahme über den restlichen Winkelbereich. Dieser deutliche Sprung kann damit erklärt werden, dass bei einem Einschlagwinkel von 75° die Mehrzahl der einschlagenden Projektile aufgrund

des hohen Anstellwinkels an der Probenoberfläche abgleiten, was zu weit verteilten Riefen und Kratzern führt. Dies kann auch anhand der exemplarischen Mikroskopaufnahmen in Abb. 48 verdeutlicht werden, die größere Bereiche auf der Probenoberfläche zeigen, die nicht oder nahezu nicht von den Einschlägen betroffen beziehungsweise durch sie beschädigt sind. Dies sorgt insgesamt für einen geringeren Anstieg des R_a -Wertes im Vergleich zu den kleineren und steileren Einschlagwinkeln. Allerdings konnte anhand der in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen kein direkter Zusammenhang zwischen Massenänderung und der Änderung der Oberflächenrauheit der Aluminiumproben gefunden werden. Dies kann damit erklärt werden, dass die Änderung der Oberflächenrauheit nicht nur durch Projektilfragmente, die an der Oberfläche und den Schadstellen haften und somit in Erhebungen resultieren, beeinflusst wird, sondern auch Oberflächenschädigungen an denen keine Projektilfragmente haften, wie Riefen oder Einkerbungen einen signifikanten Einfluss auf die Änderung des R_a -Wertes haben.

2.8.2.2 Untersuchung von optischen Materialien

Massenänderung durch Einschlag bei Glasproben

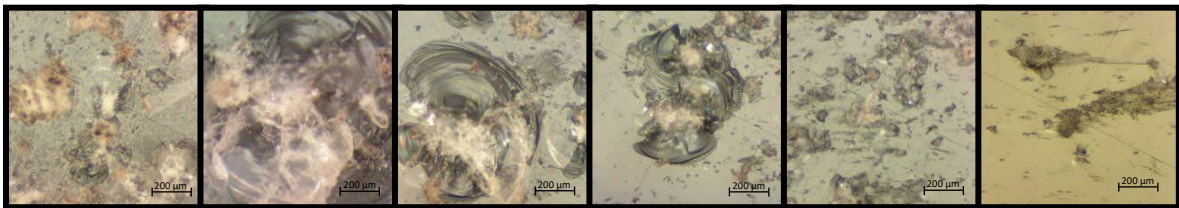


Abb. 51: Mikroskopaufnahmen von Glasproben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal, 15° , 30° , 45° , 60° , 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A

Resultate: In diesem Abschnitt soll die durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln hervorgerufene Massenänderung von Glasproben unter verschiedenen Einschlagwinkeln (0° = normal, 75° = streifend) untersucht werden. Abb. 52 zeigt hierzu die absolute und relative Massenänderung der Proben durch den Beschuss mit ungefähr 10 mg JSC-1A. Die relative Massenänderung ist dabei genauso wie zuvor (Kapitel 2.8.2.1) als die absolute Massenänderung bezogen auf die Masse der einschlagenden Partikel definiert. Dadurch können verschiedene Versuche leichter verglichen werden auch wenn die einschlagende Masse an JSC-1A-Partikeln leicht variiert. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es durch den Beschuss hauptsächlich zu einer negativen Massenänderung kommt, also mehr Material abgetragen als eingelagert wird, wobei der mit Abstand größte Effekt bei einem Einschlagwinkel von 15° auftritt. Für die nachfolgende Diskussion sowie den späteren Vergleich mit den zuvor vorgestellten quantitativen Ergebnissen wurden zusätzlich auch für

diese Untersuchung exemplarisch Mikroskopaufnahmen der beschossenen Probenoberflächen in Abb. 51 dargestellt.

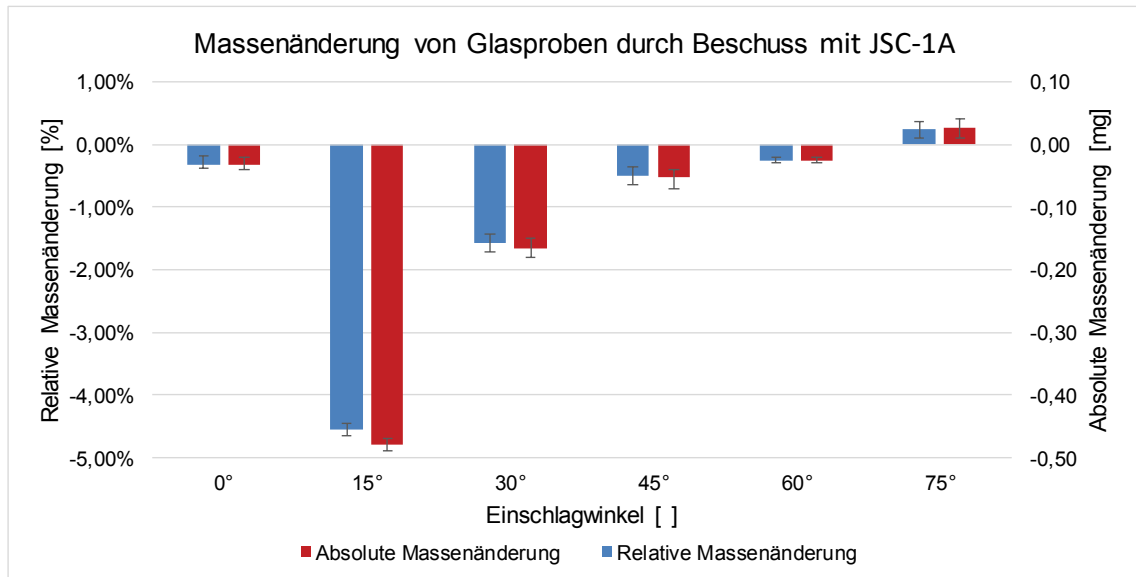


Abb. 52: Massenänderung von Glasproben nach Beschuss mit JSC-1A (0° = normal, 75° = streifend)

Diskussion: Abb. 52 zeigt, dass der Einschlag von ungefähr 10 mg JSC-1A für alle Beschusswinkel kleiner als 75° zu einem Massenverlust der Glasproben führt. Wie bereits in den vorigen Kapiteln gezeigt, führt der Beschuss von Glasproben mit JSC-1A-Partikeln zu einem muschelförmigen Abplatzen der Probenoberfläche. Als Grund für das Abplatzen der Oberfläche kann auch hier die Sprödigkeit der Glasproben angeführt werden. Dies lässt sich auch anhand der exemplarischen Mikroskopaufnahmen in Abb. 51 zeigen. Abb. 52 ist zu entnehmen, dass der Beschuss senkrecht zur Oberfläche der Glasproben nur zu einem relativ geringen Massenverlust führt. Den Mikroskopaufnahmen in Abb. 51 ist zu entnehmen, dass bei diesem Beschusswinkel eine Vielzahl der Projektilfragmente an und in den durch den Beschuss entstehenden Schadstellen haftet. Der Massenverlust durch Erosion und die Massenzunahme durch den Partikeleintrag sind annähernd gleich. Bei einem Beschusswinkel von 15° steigt der Massenverlust um ungefähr das 15-fache im Vergleich zu den Einschlägen senkrecht zur Oberfläche an. In der Mikroskopaufnahme ist nahezu der gesamte Bildbereich durch eine großflächige Beschädigung bedeckt und es können nur minimale Spuren an eingelagertem Material identifiziert werden. Es treten somit signifikant stärkere erosive Effekte auf und die einschlagenden Projektile werden mit den aus der Glasoberfläche herausgeschlagenen Bruchstücken weggeschleudert, wodurch ein Anhaften der Projektilfragmente deutlich erschwert wird. Abb. 52 zeigt, dass die

Massenänderung hin zu größeren, flacheren Einschlagwinkeln wieder absinkt. Auch in den Mikroskopaufnahmen ist ein abnehmender Trend hinsichtlich der Ausprägung der muschelförmigen Schädigungen zu erkennen. Des Weiteren zeigen die Aufnahmen in Abb. 51, dass ab einem Beschusswinkel von 60° keine größeren muschelförmigen Schädigungen mehr zu erkennen sind und diese in kleinere Kratz- und Schleiferscheinung übergehen. Bei einem Einschlagwinkel von 75° sind nahezu ausschließlich längliche Kratzer auf der Glasoberfläche zu erkennen. Der Beschuss führt bei diesem Einschlagwinkel sogar zu einer leichten Massenzunahme. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass bei diesem Winkel nur noch kleinere Schädigungen auf der Oberfläche auftreten, allerdings trotzdem eine geringe Menge der scharfkantigen JSC-1A-Partikel auf der Oberfläche haftet, was in Summe zu einer leichten Massenzunahme führt. Aufgrund der Sprödigkeit der Glasoberflächen werden die auftretenden Verschleißeffekte durch erosive Effekte dominiert. Bei kleineren, steileren Einschlagwinkeln treten hierbei hauptsächlich muschelförmige Schädigungen auf, die hin zu größeren Einschlagwinkeln abnehmen und letztlich bei sehr flachen Winkeln in Kratz- und Schleiferscheinungen übergehen. Dies deckt sich auch mit den qualitativen Erkenntnissen der Einschläge bei 200 m/s.

Änderung der Transmission durch Einschlag bei Glasproben

Resultate: Abb. 53 zeigt die Transmission der Glasproben vor und nach dem Beschuss mit ungefähr 10 mg JSC-1A für verschiedene Einschlagwinkel (0° = normal, 75° = streifend). Bei den Werten der beschossenen Proben wurde versucht die geringste auftretende Resttransmission zu ermitteln. Dadurch wird der Worst-Case Fall betrachtet, da speziell bei optischen Systemen, wie zum Beispiel Kameras oder Teleskopoptiken bereits geringe Degradationen der Optik zu einer signifikant schlechteren Leistung der Systeme führen kann. Auch hier soll sich, wie zuvor zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf den Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 800 nm, was ungefähr dem Bereich des sichtbaren Lichtes entspricht, beschränkt werden, da die Transmission hier näherungsweise konstant verläuft. Abb. 53 zeigt, dass die verbleibende Resttransmission für Einschläge senkrecht zur Oberfläche und für einen Beschusswinkel von 15° die geringsten Werte annimmt. Bei diesen Beschusswinkeln sinkt die gemittelte verbleibende Transmission im betrachteten Wellenlängenbereich (400 nm und 800 nm) von einem Wert von ungefähr 90% für unbeschossene Proben auf etwas unter 65% ab. Für beide Beschusswinkel ergeben sich hierbei sehr ähnliche Werte. Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus dem vorigen Kapitel (Kapitel 2.7), die eine Standardabweichung im Bereich von 2,4% aufweisen, liegt der

Unterschied der Werte im Bereich der Messungenauigkeit. Hin zu flacheren Einschlagwinkeln steigt die verbleibende Transmission an, wobei für die beiden Beschusswinkel 30° und 45° ebenfalls sehr ähnliche Werte von ungefähr 70% gemittelt über den Bereich des sichtbaren Lichtes gemessen wurden.

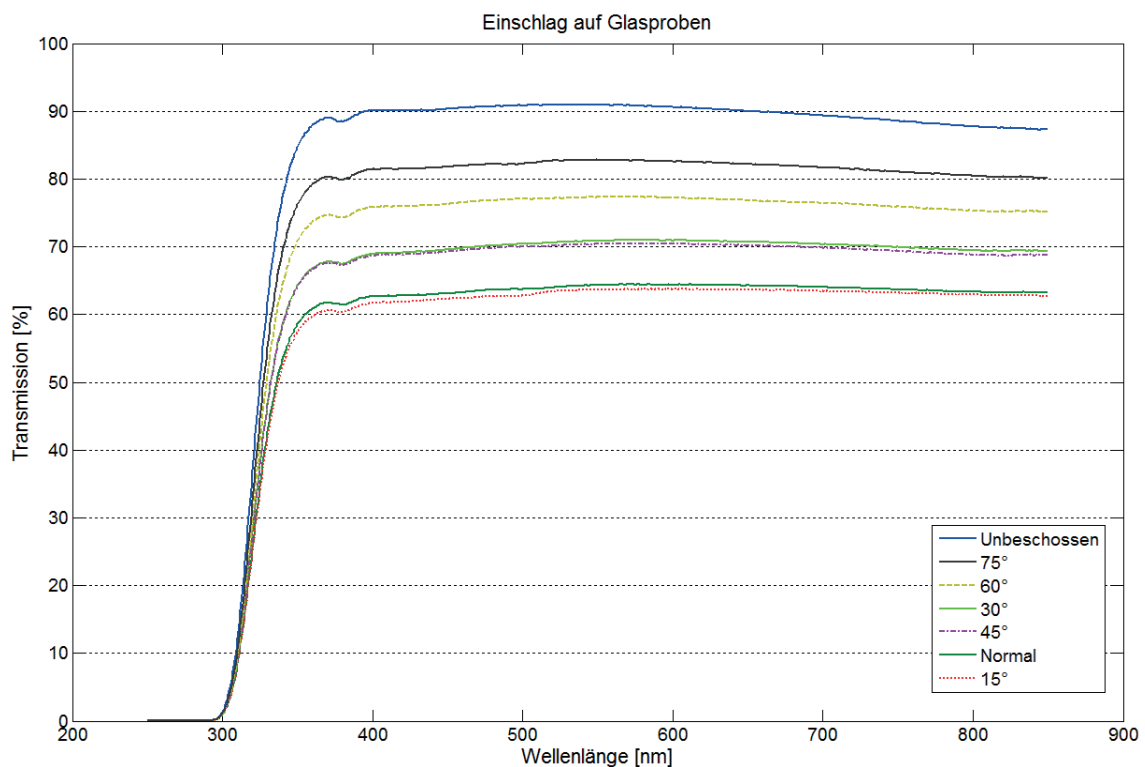


Abb. 53: Wellenlängenabhängige Transmission der Glasproben für verschiedene Beschusswinkel

Diskussion: Die sehr ähnlichen Werte der verbleibenden Transmission bei Beschusswinkeln von 0° und 15° deuten darauf hin, dass die in Abb. 51 gezeigten großflächigen Beschädigungen bei 15° ungefähr den gleichen Einfluss auf die Änderung der Transmission haben wie das verstärkte Anhaften der Projektilfragmente bei Einschlägen senkrecht zur Oberfläche. Als mögliche Erklärung kann dazu angeführt werden, dass an den flächigeren Schädigungen bei einem Beschusswinkel von 15° das einfallende Licht stärker gestreut wird als bei den Einschlägen senkrecht zur Oberfläche, allerdings durch das verstärkte Anhaften der Projektilfragmente bei 0° der Durchgang des Lichtes direkt behindert wird. Die Mikroskopaufnahmen in Abb. 51 zeigen, dass hin zu größeren und damit flacheren Einschlagwinkeln die durch den Beschuss betroffenen Stellen kleiner werden. Dies schlägt sich auch in den Werten der verbleibenden Transmission in Abb. 53 nieder. Da mehr einfallendes Licht ungehindert passieren kann steigt die verbleibende Transmission

an. Der Maximalwert der verbleibenden Transmission wird mit ungefähr 80% gemittelt über den betrachteten Wellenlängenbereich bei einem Beschusswinkel von 75° erreicht. Obwohl wie in Abb. 52 gezeigt, bei diesem Beschusswinkel mehr Material abgelagert als erodiert wird, haben hier die anhaftenden Partikel nur einen untergeordneten Einfluss auf den Verlust an optischer Performance. Anders als bei den Einschlägen senkrecht zur Oberfläche treten hier nur vereinzelte weit verteilte Schadstellen auf an denen die Projektilfragmente haften. Daher existieren, wie in Abb. 51 gezeigt, große Bereiche auf der Probenoberfläche bei denen das einfallende Licht ungehindert passieren kann. Der Verlauf der einzelnen Graphen zeigt auch hier, dass die verbleibende Transmission im betrachteten Wellenlängenbereich nicht signifikant von der jeweils eingestrahlt Wellenlänge des Lichtes abhängt. Die verschiedenen Graphen zeigen weiterhin einen ähnlichen Verlauf. Allerdings konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Massenänderung der Glasproben und der Transmissionsänderung gefunden werden.

Massenänderung von Makrolon®-Proben

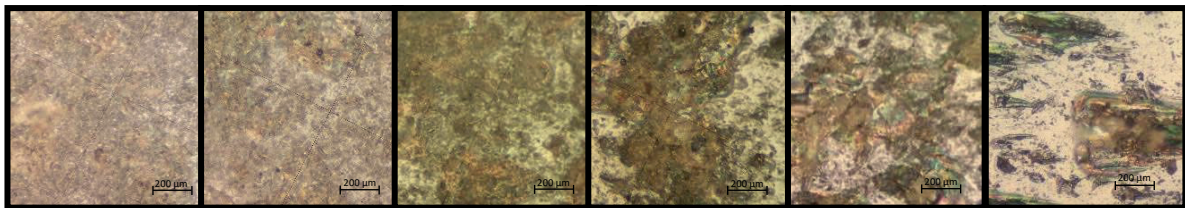


Abb. 54: Mikroskopaufnahmen von Makrolon®-Proben unter verschiedenen Beschusswinkeln (von links: 0° = normal, 15° , 30° , 45° , 60° , 75° (streifend)) nach Beschuss mit JSC-1A

Resultate: In diesem Abschnitt soll als zweiter Vertreter der optischen Materialien Makrolon® hinsichtlich der auftretenden Massenänderung durch den Beschuss mit ungefähr 10 mg JSC-1A bei verschiedenen Einschlagwinkeln (0° = senkrecht zur Probenoberfläche, 75° = streifend) untersucht werden. Für diese Untersuchungen wurde ebenfalls die absolute und relative Massenänderung der Proben verwendet. Hierbei berechnet sich die relative Massenänderung nach dem gleichen Schema wie zuvor aus der absoluten Massenänderung der Proben bezogen auf die einschlagende Masse des Mondanalogmaterials. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass es für sämtliche untersuchten Einschlagwinkel zu einer Massenzunahme der Proben kommt. Das bedeutet, dass durch den Beschuss mit JSC-1A bei den untersuchten Bedingungen grundsätzlich Mondanalogmaterial in der duktilen Oberfläche der Makrolon®-Proben eingelagert wird. Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, dass die Massenzunahme aufgrund der

eingelagerten Projektilfragmente hin zu größeren und damit flacheren Einschlagwinkeln abnimmt. Auch in diesem Abschnitt sind, um die anschließende Diskussion zu unterstützen, in Abb. 54 zusätzlich exemplarische Mikroskopaufnahmen der beschossenen Makrolon®-Oberflächen dargestellt.

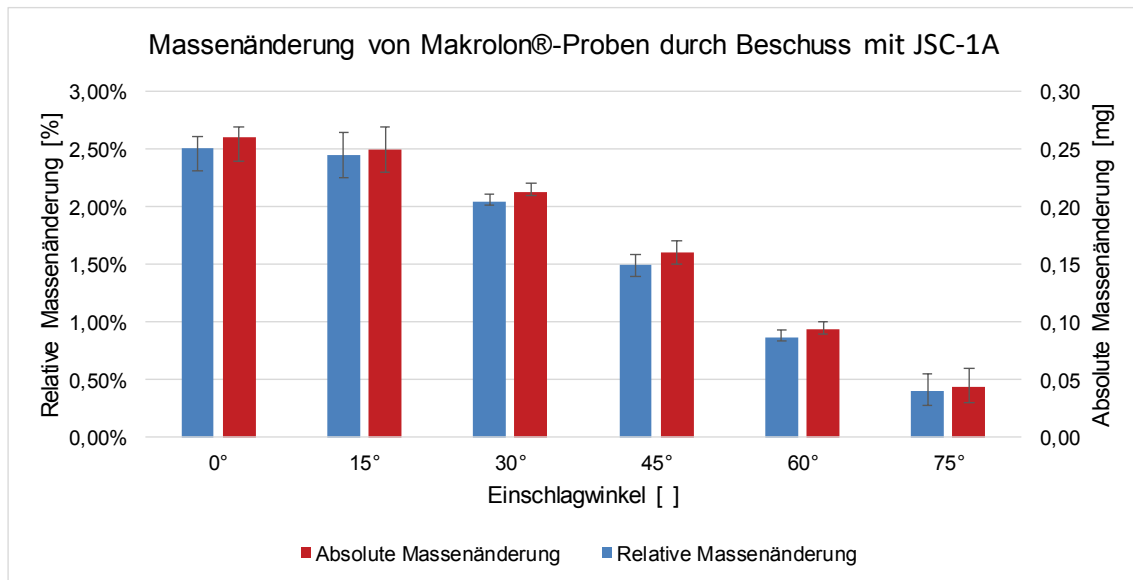


Abb. 55: Massenänderung von Makrolon®-Proben nach Beschuss (0° = normal, 75° = streifend)

Diskussion: Die aus dem Beschuss mit JSC-1A-Partikeln für alle Einschlagwinkel resultierende Massensteigerung der Proben zeigt, dass Projektilfragmente des Mondanalogmaterials in der Probenoberfläche eingelagert werden. Dieser Effekt wurde bereits bei den qualitativen Untersuchungen der Einschläge bei 200 m/s beobachtet. Als Grund für die Einlagerung kann angeführt werden, dass die scharfkantigen JSC-1A-Partikel in die duktile Oberfläche der Makrolon®-Proben eindringen und an den beschädigten Oberflächen der Proben haften. Aus Abb. 55 ist zu entnehmen, dass die maximale Massenzunahme mit einem Wert von ungefähr 2,5% bei Einschlagwinkeln von 0° und 15° auftritt und in diesem Bereich nahezu konstant ist. Hin zu flacheren Einschlagwinkeln nimmt die Massenzunahme kontinuierlich ab und erreicht mit einem Wert von knapp unter 0,5% bei einem Einschlagwinkel von 75° ihr Minimum. Dieser Zusammenhang kann auch anhand der exemplarischen Mikroskopaufnahmen in Abb. 54 belegt werden. Die Aufnahmen zeigen deutlich, dass die Oberfläche der Makrolon®-Proben für die beiden Einschlagwinkel 0° und 15° nahezu vollständig mit Fragmenten des Mondanalogmaterials bedeckt ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass bei größeren Einschlagwinkeln die Ablagerungen weniger flächig auftreten. Signifikante Kratz- und Schleiferscheinungen treten hierbei erst ab einem

Einschlagwinkel von 75° auf. Allerdings sind auch bei diesem Einschlagwinkel größere Flächen zu erkennen an denen Projektilfragmente anhaften. Im Gegensatz zu den untersuchten Glasproben treten beim Beschuss von Makrolon® keine muschelförmigen Schädigungen auf, die auf ein Herausschlagen von Oberflächenmaterial zurückzuführen sind. Das Anhaften beziehungsweise die Einlagerung von Projektilfragmenten stellt für Makrolon®-Proben den dominierenden Schädigungseffekt dar. Dies deckt sich auch mit den qualitativen Ergebnissen für die Einschläge bei 200 m/s.

Änderung der Transmission durch Einschlag bei Makrolon®-Proben

Resultate: Abb. 56 zeigt die optische Transmission der untersuchten Makrolon®-Proben vor und nach dem Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A bei ungefähr 360 m/s bei unterschiedlichen Einschlagwinkeln. Die dargestellten Graphen stellen dabei den Worst-Case Fall der verbleibenden optischen Transmission der beschossenen Proben sowie den Verlauf der Transmission einer unbeschossenen gereinigten Probe dar. Dazu wurde versucht die geringste verbleibende Resttransmission der jeweiligen Proben zu ermitteln. Dies wurde aus denselben wie bereits zuvor beschriebenen Gründen getan. Auch hier beschränken sich die für die weitere Betrachtung verwendeten Ergebnisse zur besseren Vergleichbarkeit auf den Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 800 nm. Dieser Wellenlängenbereich entspricht ungefähr dem Bereich des sichtbaren Lichtes und die optische Transmission verläuft hier näherungsweise konstant. Abb. 56 ist zu entnehmen, dass der größte Verlust an optischer Transmission für Einschläge senkrecht zur Makrolon®-Oberfläche auftritt. Die verbleibende Transmission sinkt hier im Mittel über den betrachteten Bereich auf etwas unter 45% ab. Für die Einschläge unter 15° ergeben sich etwas höhere Werte. Für die verbleibende Transmission bei 30° , 45° und 60° ergeben sich sehr ähnliche Verläufe und Werte. Die Abweichung befindet sich noch im Bereich der Messungenauigkeit. Die verbleibende Resttransmission ist damit für alle drei untersuchten Einschlagwinkel mit ungefähr 60% gemittelt über den betrachteten Wellenlängenbereich deutlich höher als für die Einschläge unter 15° und senkrecht zur Probenoberfläche. Der geringste Einfluss auf die Änderung der optischen Transmission ist bei einem Einschlagwinkel von 75° zu verzeichnen.

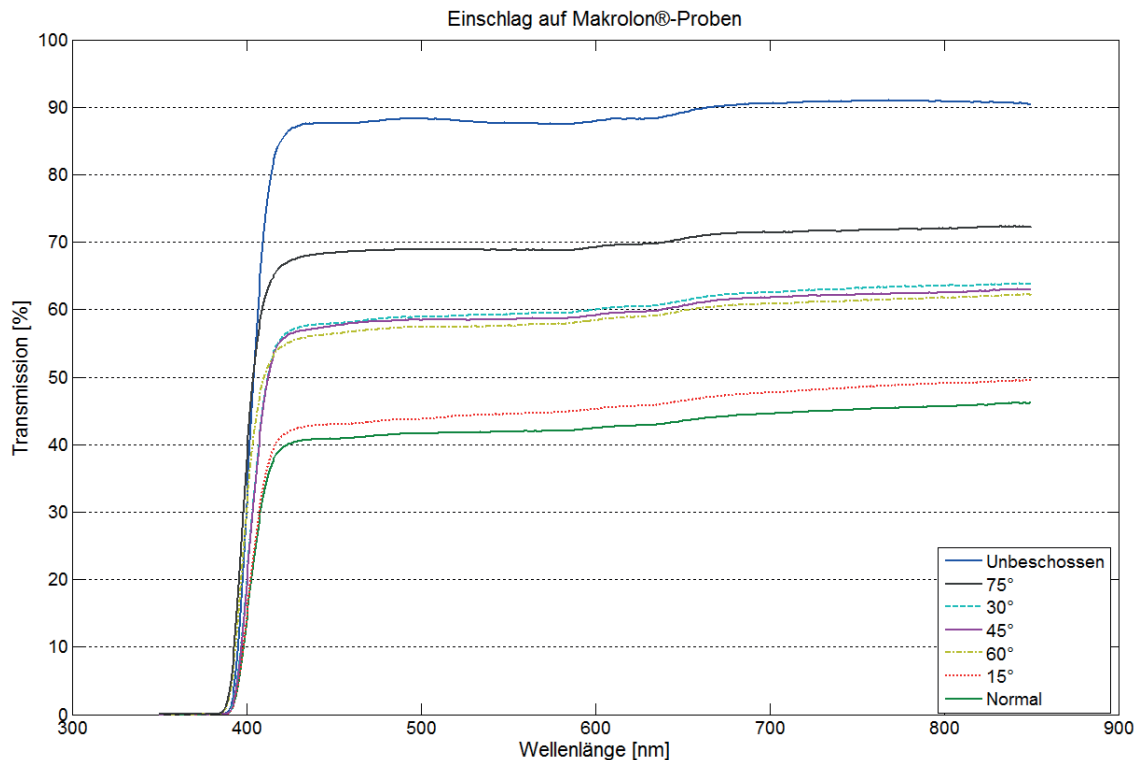


Abb. 56: Wellenlängenabhängige Transmission der Makrolon®-Proben für verschiedene Beschusswinkel

Diskussion: Die Ergebnisse der Einschläge senkrecht zur Oberfläche und unter 15° zeigen, dass die Bedeckung der Probenoberfläche durch die Projektilfragmente zu einer deutlichen Reduzierung der verbleibenden Transmission führt, da durch die anhaftenden Partikel der Lichtdurchgang blockiert wird. Hierbei kann eine gute Korrelation zwischen der Massenzunahme der Proben und der Verringerung der Transmission gefunden werden, da wie bereits in Abb. 55 gezeigt für beide Einschlagwinkel die Massenzunahme ebenfalls deutlich höhere Werte im Vergleich zu den anderen Einschlagwinkeln annimmt. Dieser Zusammenhang lässt sich allerdings nicht auf die Einschlagwinkel zwischen 30° und 60° übertragen. Hier ergeben sich für die verbleibende Transmission nahezu identische Werte, obwohl die Massenzunahme der Proben signifikant hin zu größeren und damit flacheren Einschlagwinkeln abnimmt. Mögliche Erklärungen hierfür sind, dass zum einem bei der Änderung der Masse die gesamte Probe betrachtet wird, wohingegen bei der Transmissionsmessung nur ein Ausschnitt der Probe betrachtet wird. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass lokal eine starke Bedeckung der Probe stattfindet, die durch die Worst-Case Messung erfasst wird, wobei insgesamt auf der Probe im Vergleich weniger Projektilfragmente abgelagert werden. Zum anderen führen auch erosive Schädigungen durch die Streuung des einfallenden Lichtes zu einer Reduzierung der Transmission senken

aber gleichzeitig auch die Massenzunahme. Erst ab einem Einschlagwinkel von 75° kommt es zu einer weiteren signifikanten Steigerung der Resttransmission. Die optische Transmission steigt hier gemittelt über den betrachteten Wellenlängenbereich auf ungefähr 70% an. Aufgrund des flachen Auftreffens der JSC-1A-Partikel entstehen hauptsächlich Kratzer sowie riefenartigen Schädigungen und es haftet bei diesem Einschlagwinkel nur noch eine vergleichsweise geringe Menge an Projektilfragmenten an der Probenoberfläche. Dadurch entstehen größere Flächen, an denen keine Bedeckung stattfindet und das einfallende Licht wird schwächer am Durchgang durch die Probe gehindert. Der Vergleich dieser Werte mit den Werten der im vorigen Abschnitt untersuchten Glasproben zeigt, dass die verbleibende optische Transmission der Makrolon®-Proben für Einschläge bei 75° nur ungefähr 5-10% höher ist als die schlechtesten Werte für die optische Transmission der Glasproben. Dadurch kann gezeigt werden, dass das Anhaften beziehungsweise die Einlagerung von Projektilfragmenten in der Probenoberfläche einen signifikant größeren Einfluss auf die Änderung der optischen Transmission hat als das durch erosive Vorgänge hervorgerufene Herausschlagen von Oberflächenmaterial. Durch die Bedeckung der Oberfläche mit Projektilfragmenten wird der Lichtdurchgang effizienter behindert. Trotz der unterschiedlichen dominierenden Effekte ist allerdings ebenso wie bei den zuvor betrachteten Glasproben zu erkennen, dass sich kein signifikanter Unterschied im Verlauf der Graphen durch den Beschuss mit JSC-1A-Partikeln ergibt. Abschließend muss jedoch festgehalten werden, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der Massenänderung der Makrolon®-Proben und der verbleibenden optischen Transmission über das gesamte untersuchte Winkelspektrum gefunden werden konnte.

2.8.3 Fazit der Einschläge bei 360 m/s unter verschiedenen Einschlagwinkeln

Die Ergebnisse dieses Abschnittes belegen, dass der Einschlag von Mondstaubpartikeln (in der Untersuchung durch das Mondanalogmaterial JSC-1A repräsentiert) bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 360 m/s, welche während Mondladungen auftreten kann, zu einer signifikanten Degradation von technischen Oberflächen führen kann. Die in diesem Kapitel beobachtete Oberflächendegradation tritt dabei bereits bei einer vergleichsweise geringen Menge (10 mg) an einschlagendem Mondanalogmaterial auf. So führten die Einschläge auf die untersuchten Aluminiumoberflächen im Mittel über alle untersuchten Einschlagwinkel zu einer Steigerung der gemessenen Oberflächenrauheit um den Faktor 10. Die Untersuchungen der beiden optischen Medien Glas und Makrolon® zeigt ebenfalls eine signifikante Änderung der optischen Transmission der Proben durch den Beschuss mit

Mondanalogmaterial, wobei die Auswirkungen auf die Makrolon®-Proben dabei ungefähr doppelt so groß sind wie bei den untersuchten Glasproben. Die Messung der Massenänderung der drei Probenmaterialien zeigt, dass bei duktilen Materialien hauptsächlich die Einlagerung beziehungsweise das Anhaften von Projektilfragmenten dominiert, wohingegen es bei den spröden Glasoberflächen hauptsächlich zu Erosion durch ein muschelförmiges Absplittern von Oberflächenmaterial kommt. Allerdings konnte auch bei den Glasproben ein Anhaften von Projektilfragmenten nachgewiesen werden. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften für alle Materialien hin zu größeren Einschlagwinkeln abnimmt. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Massenänderung der Proben und der Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften konnte allerdings für keines der drei untersuchten Probenmaterialien gefunden werden. Dies begründet sich damit, dass diese Eigenschaften sowohl durch die Einlagerung von Projektilfragmenten wie auch durch Schädigungen, die durch erosive Vorgänge hervorgerufen werden, degradieren. Im Regelfall treten diese Schadensarten gleichzeitig auf, wenn auch in unterschiedlich starker Ausprägung. Somit könnten sich zum Beispiel im Extremfall erosive und anlagernde Effekte genau ausgleichen, wodurch keine Massenänderung gemessen würde, die makroskopischen Oberflächeneigenschaften würden sich aber dennoch signifikant ändern.

2.9 Vergleich der Einschlaguntersuchungen²¹

Dieser Abschnitt behandelt den Vergleich der Auswirkungen des Einschlags des Mondanalogmaterials JSC-1A auf Aluminium-, Glas- und Makrolon®-Proben für zwei unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten (200 m/s und 360 m/s) und verschiedene Einschlagwinkel (0° bis 75°). Der Vergleich verwendet die zuvor dargestellten Ergebnisse der Einschläge unter verschiedenen Einschlagwinkeln. Wie bereits dargelegt, wurden für alle Untersuchungen ungefähr 10 mg des Mondanalogmaterials JSC-1A verwendet. Die Proben wurden mit dem in Kapitel 2.1 beschriebenen elektromagnetischen Beschleuniger beschossen.

²¹ Dieses Kapitel ist eine aktualisierte Version der vom Autor bereits veröffentlichten Publikation [89].

2.9.1 Vergleich von Aluminiumproben

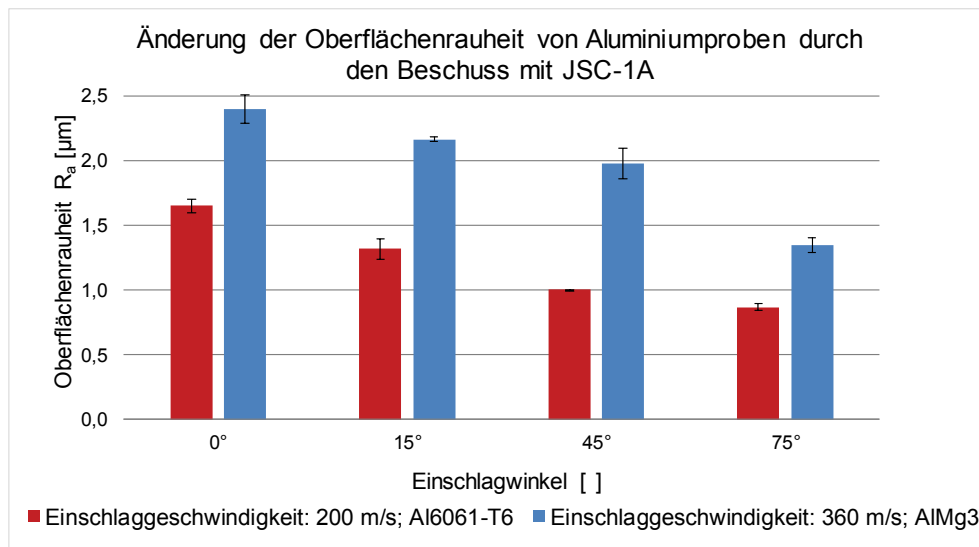


Abb. 57: Vergleich der Aluminiumproben für unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel

Abb. 57 zeigt die Änderung der Oberflächenrauheit für die beiden untersuchten Aluminiumlegierungen AlMg3 und Al6061-T6. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass bei ungefähr gleicher Masse an einschlagenden Partikeln des Mondanalogmaterials die höhere Einschlaggeschwindigkeit unabhängig vom jeweiligen Einschlagwinkel zu einem größeren Anstieg der Oberflächenrauheit führt, obwohl die mittlere kinetische Energie dieser Partikel kleiner im Vergleich zu den JSC-1A-Partikeln bei ungefähr 200 m/s ist. Hierfür können mehrere Erklärungsmöglichkeiten angeführt werden. Als erstes ist zu erwähnen, dass die gemessene Oberflächenrauheit der unbeschossenen Al6061-T6-Proben im Mittel ungefähr dreimal so hoch ist wie die der polierten AlMg3-Proben, was zu einem geringeren Wert der absoluten Steigerung der Oberflächenrauheit führen könnte. Zusätzlich ist die Oberflächenhärte der AlMg3-Proben geringer im Vergleich zu den Al6061-T6-Proben. Es ist daher anzunehmen, dass die geringere Oberflächenhärte eine stärkere Deformation der Probenoberfläche durch den Partikeleinschlag begünstigt sowie das Einlagern von Projekttilfragmenten erleichtert, wodurch in beiden Fällen die Oberflächenrauheit im Vergleich zu den härteren Proben stärker zunimmt. Des Weiteren wurde, wie eingangs erwähnt, für beide Versuchsreihen die Masse der einschlagenden Partikel konstant gehalten (ungefähr 10 mg JSC-1A). Daher ist die Anzahl der einschlagenden Partikel für den Korngrößenbereich zwischen 450 μm und 560 μm signifikant kleiner im Vergleich zum Korngrößenbereich zwischen 250 μm und 350 μm . Damit ist anzunehmen, dass auf den Al6061-T6-Proben eine größere Fläche von den Einschlägen unberührt bleibt, da die Fläche,

über welche die Einschläge verteilt sind, für beide Probenmaterialien ungefähr gleich ist. Die unberührte Probenoberfläche weist im Vergleich zu den beschossenen Proben für beide Einschlaggeschwindigkeiten einen signifikant niedrigeren R_a -Wert auf. Dadurch könnte ebenfalls der geringere Anstieg der Oberflächenrauheit erklärt werden, da in die Messungen der beschossenen Proben somit für die Al6061-T6-Proben eine größere Strecke an unberührter beziehungsweise nur geringfügig beschädigter Oberfläche einfließt. Hinsichtlich des Verlaufs der Steigerung der Oberflächenrauheit zeigen beide Probenreihen ein ähnliches Verhalten. Die Zunahme der Oberflächenrauheit sinkt in beiden Fällen unabhängig von Probenmaterial und Einschlaggeschwindigkeit kontinuierlich mit steigendem Einschlagwinkel.

2.9.2 Vergleich von Glasproben

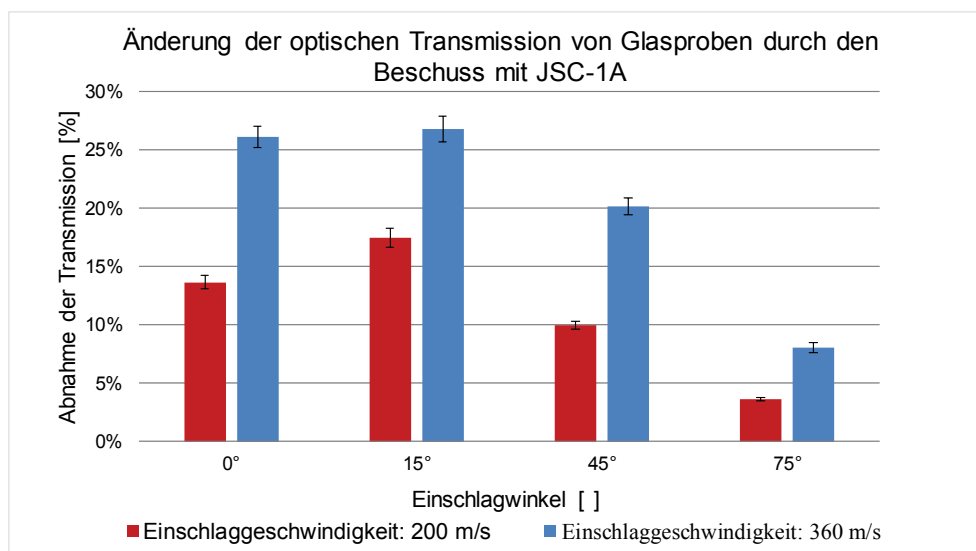


Abb. 58: Vergleich der Glasproben für unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel

Abb. 58 zeigt die gemittelte Abnahme der optischen Transmission der untersuchten Glasproben für Wellenlängenbereiche zwischen 400 nm und 800 nm durch den Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A bei den beiden Einschlaggeschwindigkeiten 200 m/s (450 μm - 560 μm) und 360 m/s (250 μm - 350 μm). Hierbei ergibt sich für beide Einschlaggeschwindigkeiten ein ähnlicher Verlauf der Reduzierung der optischen Transmission. In beiden Versuchsreihen erreicht die Reduzierung der optischen Transmission bei einem Einschlagwinkel von 15° ihr Maximum und sinkt dann deutlich hin zu größeren, flacheren Einschlagwinkeln ab. Hinsichtlich der Absolutwerte der Transmissionsänderung zeigen die Glasproben ein ähnliches Verhalten wie die zuvor

betrachteten Aluminiumproben. Auch hier führen die Einschläge bei 360 m/s zu einer stärkeren Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften im Vergleich zur Probenreihe bei 200 m/s. Da bei diesen Untersuchungen allerdings für beide Versuchsreihen das gleiche Probenmaterial verwendet wurde, kann hier der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenhärte als mögliche Erklärung ausgeschlossen werden, da nur marginale fertigungsbedingte Unterschiede zu erwarten sind. Jedoch kann auch hier als eine mögliche Erklärung die unterschiedliche Anzahl einschlagender Projektile angeführt werden. Bei beiden Versuchsreihen wurden ungefähr 10 mg JSC-1A verwendet. Da die von den Einschlägen betroffene Fläche bei beiden Untersuchungen für die jeweiligen Winkel in etwa gleich ist, trifft aufgrund des unterschiedlichen Korngrößenbereichs bei den beiden Versuchsreihen bei 360 m/s eine höhere Anzahl an Partikeln pro Einheitsfläche auf die Probenoberfläche auf. Während die Einschläge bei 200 m/s aufgrund der höheren kinetischen Energie der Partikel größere Einzelschädigungen erzeugen, bleibt aufgrund der geringeren Partikelanzahl insgesamt eine größere Fläche im Vergleich zu flächigeren Einschlägen bei 360 m/s unberührt. Aus diesem Grund kann im Vergleich zu den Einschlägen bei 360 m/s mehr Licht die Probe ungehindert durchqueren, wodurch die geringere Abnahme der Transmission erklärt werden könnte.

2.9.3 Vergleich von Makrolon®-Proben

Abb. 59 stellt die durch den Beschuss mit Partikeln des Mondanalogmaterials JSC-1A auftretende Abnahme der optischen Transmission der Makrolon®-Proben für verschiedene Einschlagwinkel bei den beiden Einschlaggeschwindigkeiten 200 m/s und 360 m/s dar. Beide Versuchsreihen zeigen einen verhältnismäßig ähnlichen Trend hinsichtlich des winkelabhängigen Verlaufs der Abnahme der optischen Transmission. Für beide Einschlaggeschwindigkeiten erreicht der Wert der Reduzierung der optischen Transmission für senkrechte Einschläge sein Maximum und sinkt hin zu flacheren Einschlagwinkeln kontinuierlich ab, wobei die Einschläge bei 200 m/s einen stärker linearen Verlauf aufweisen. Der Vergleich der Werte der optischen Transmission beider Versuchsreihen zeigt, dass wie bereits bei den beiden Materialien zuvor, die Einschläge bei 360 m/s einen größeren Einfluss auf die Änderung der gemessenen Werte haben. Die Werte für Einschläge bei 360 m/s sind im Mittel über alle Einschlagwinkel ungefähr 2,6-mal größer als die Werte für Einschläge bei 200 m/s. Auch hier kann wie bei den Glasproben ausgeschlossen werden, dass dies auf Unterschiede der Oberflächenhärte zwischen den Versuchsreihen zurückzuführen ist, da in beiden Fällen das gleiche Probenmaterial verwendet wurde.

Allerdings kann auch hier als mögliche Erklärung die unterschiedliche Anzahl einschlagender Partikel bei den jeweiligen Versuchsreihen angeführt werden, da wieder zwei unterschiedliche Korngrößenbereiche verwendet wurden, die Gesamtmasse der einschlagenden Partikel jedoch bei beiden Versuchsreihen gleich ist. Die größere Anzahl an Partikeln erzeugt bei den Versuchen bei 360 m/s eine dichtere Bedeckung der Oberfläche, wodurch der Durchgang des einfallenden Lichtes effektiver behindert wird als bei den größeren aber stärker verteilten Partikeln.

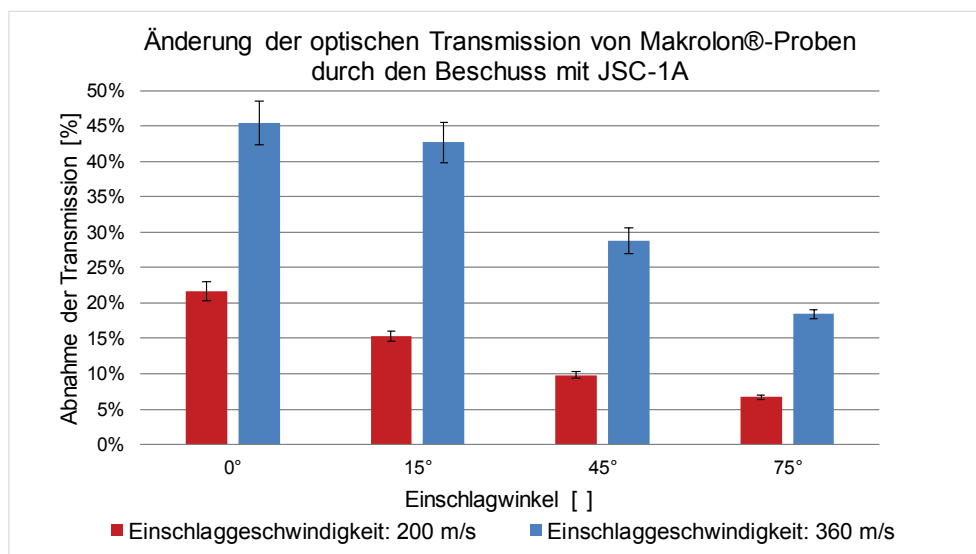


Abb. 59: Vergleich der Makrolon®-Proben für unterschiedliche Einschlaggeschwindigkeiten und Einschlagwinkel

2.10 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Abschnitt fasst die durch die zuvor beschriebenen Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnisse noch einmal kompakt zusammen und gibt zusätzlich einen Ausblick für zukünftige weitere Forschungsmöglichkeiten auf dem Gebiet der Einschläge von lunarem Regolith bedingt durch Landemanöver.

2.10.1 Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist es die Auswirkungen des Einschlags von lunaren Regolithpartikeln, die während Landevorgängen aufgewirbelt werden, auf technische Oberflächen unter Laborbedingungen zu charakterisieren. Für die Untersuchungen wurde dazu das Mondanalogmaterial JSC-1A in verschiedenen Korngrößenbereichen verwendet, um die unter realen Bedingungen vorkommenden Regolithpartikel im Labor zu simulieren. Für die Erreichung repräsentativer

Einschlaggeschwindigkeiten wurde der am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik entwickelte elektromagnetische Beschleuniger eingesetzt. Für die experimentellen Untersuchungen wurden die Probenmaterialien Glas, Makrolon®, PMMA und zwei Aluminiumlegierungen ausgewählt. Die Degradation der Materialien wurde dabei durch die Änderung von makroskopischen Oberflächeneigenschaften charakterisiert. Bei den optischen Materialien wurde hierzu die optische Transmission und bei den Aluminiumlegierungen die Oberflächenrauheit als Messgrößen genutzt. Die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen zu Einschlägen von lunarem Regolith auf diese technischen Oberflächen zeigen, dass bereits geringe Menge an einschlagenden Partikeln, im Falle dieser Studie ungefähr 10 mg pro Experiment, zu einer signifikanten Degradation der Oberflächeneigenschaften der untersuchten Proben führt.

Zusätzlich zu den Untersuchungen hinsichtlich der Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften wurden Mikroskopaufnahmen verwendet, um den dominierenden Schädigungsprozess der Oberflächen durch den Beschuss mit Mondanalogmaterial zu identifizieren. Dabei hat sich gezeigt, dass bei duktilen Oberflächen ein irreversibles Anhaften der Projektilfragmente dominiert. Bei den spröden Glasoberflächen wurde ebenfalls teils ein Anhaften festgestellt, allerdings dominieren hier erosive Effekte. Diese Aussage kann auch anhand von Messungen der Massenänderung bei einer Einschlaggeschwindigkeit von 360 m/s untermauert werden. Im Folgenden sind die Kernaussagen der Untersuchungen zum Einschlag des Mondanalogmaterials JSC-1A auf technischen Oberflächen noch einmal zusammengefasst:

- Eine signifikante Degradation der Oberflächeneigenschaften tritt bereits bei moderaten Einschlaggeschwindigkeiten von bis zu 360 m/s und geringen Mengen an einschlagenden Partikeln auf.
- Der Beschuss der Aluminiumlegierungen führt teilweise zu einer Änderung der Oberflächenrauheit (R_a) um mehr als den Faktor acht.
- Die makroskopischen Eigenschaften optischer Kunststoffe unterliegen aufgrund der Einlagerung von Projektilfragmenten einer stärkeren Degradation als Glasproben. Die optische Transmission reduziert sich für Makrolon® teilweise um mehr als 45%, wohingegen Glas maximal bei etwas mehr als 25% Reduzierung liegt.
- Der dominierende Schädigungsprozess für duktile Werkstoffe durch den Beschuss mit JSC-1A ist die irreversible Einlagerung von Projektilfragmenten.

- Der dominierende Schädigungsprozess für den spröden Werkstoff Glas durch den Beschuss mit JSC-1A ist ein muschelförmiges Abplatzen der Oberfläche, wobei es auch hier zusätzlich zu lokalen irreversiblen Einlagerungen von Projektilfragmenten kommt.
- Unabhängig vom verwendeten Probenmaterial führen steile Einschlagwinkel zu einer stärkeren Degradation der makroskopischen Oberflächeneigenschaften.
- Unabhängig vom verwendeten Probenmaterial führen die Einschläge bei ungefähr 200 m/s trotz höherer kinetischer Energie der Einzelprojekte im Vergleich zu den Einschlägen bei 360 m/s aufgrund der geringeren Anzahl an einschlagenden Projektilen und damit punktuelleren Schädigungen der Oberflächen zu einer geringeren Degradation der makroskopischen Oberflächeneigenschaften.

2.10.2 Ausblick²²

Die Ergebnisse der in dieser Studie durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass der Einschlag von lunaren Regolithpartikeln zu signifikanten Schädigungen von technischen Oberflächen führen kann. Dazu wurden sowohl duktile wie spröde Materialien bei verschiedenen Einschlaggeschwindigkeiten mit einer definierten Menge des Mondanalogmaterials JSC-1A beschossen. Zusätzlich zu den durch diese Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen bieten sich weitere Forschungsthemen im Bereich der durch lunare Landevorgänge hervorgerufenen Partikeleinschläge und damit einhergehenden Schädigungen von technischen Oberflächen und Systemen an.

Ein Ansatzpunkt für weitere experimentelle Untersuchungen ist die Ausweitung der Materialauswahl. Insbesondere die Untersuchung der Auswirkung der Einschläge auf Faserverbundwerkstoffe stellt hierbei ein vielversprechendes Forschungsfeld dar. Hierbei wäre zu klären ob beziehungsweise ab welcher kinetischen Energie es zu einer möglichen Delamination der Werkstoffe kommt und in welcher Weise die Materialeigenschaften dadurch negativ beeinflusst werden.

In der vorliegenden Studie wurden primär verhältnismäßig große Partikel bei moderaten Einschlaggeschwindigkeiten bis zu 360 m/s untersucht, da die erreichbare

²² Dieses Kapitel ist in dieser Form nicht in den oben angegebenen Veröffentlichungen enthalten.

Einschlaggeschwindigkeit durch den verwendeten elektromagnetischen Beschleuniger begrenzt ist. Durch den Einsatz anderer Beschleunigungstechnologien könnten auch kleinere Partikel bei repräsentativen Geschwindigkeiten untersucht werden. Unabhängig vom verwendeten Werkstoff konnte gezeigt werden, dass es zu einer irreversiblen Einlagerung der Projektilfragmente kommt, wobei insbesondere bei den duktilen Werkstoffen das Anhaften der Partikel einen signifikanten Einfluss auf die Änderung der makroskopischen Oberflächeneigenschaften hat. Interessant wäre dabei zu klären, ob das Anhaften der Partikel auch bei höheren Einschlaggeschwindigkeiten auftritt, da wie anfangs gezeigt, aufgrund der kleineren Partikeldurchmesser die kinetische Energie der Projektile sinkt. Dadurch ergibt sich auch die Fragestellung nach einer kinetischen „Grenzenergie“ ab der je nach Werkstoff kein signifikantes irreversibles Anhaften der Projektilfragmente mehr auftritt. Die Frage nach der Identifizierung einer minimalen kinetischen Energie kann natürlich auch für die Schädigung spröder Werkstoffe gestellt werden.

Ein weiterer möglicher Untersuchungsgegenstand, der in dieser Arbeit aufgrund des eingesetzten elektromagnetischen Beschleunigers nicht betrachtet werden konnte, ist der Einschlag eines Stroms aus beschleunigten Partikeln. Während der Endphase des Landevorgangs nähert sich der Lander der Mondoberfläche langsam an. Ab einer gewissen Höhe über Grund werden dabei aufgrund der retrograden Raketentriebwerke Partikel des Mondbodens beschleunigt. Es ist davon auszugehen, dass damit die Zeitspanne, über die Partikel auf Oberflächen auftreffen, deutlich größer ist, als bei den zuvor dargelegten Versuchsreihen. In diesen Versuchen treffen die Partikel in einer dichten Wolke nahezu gleichzeitig auf die untersuchten Oberflächen auf. Durch das Auftreffen eines Partikelstroms könnte es einerseits zu einer stärkeren Degradation der Oberflächen kommen, da durch zeitlich früher einschlagende Partikel die Oberflächen bereits vorgeschädigt sind und somit durch die nachfolgenden Partikel stärker beschädigt werden. Da die Versuche aber auch gezeigt haben, dass nur ein geringer Anteil an Projektilfragmenten an den Oberflächen haftet und somit ein großer Anteil an Projektilen beziehungsweise Projektilfragmenten von der Oberfläche abprallen, könnten andererseits diese rückgestreuten Partikel mit den nachfolgenden Partikeln interagieren, wodurch eine Art Abschirmeffekt auftritt. Durch die Analyse eines kontinuierlichen Partikelstroms könnte somit geklärt werden, welcher der Effekte zum Tragen kommt. Unterstützend könnten hierbei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wertvolle Einblicke ermöglichen. Grundlegende Untersuchungen hierzu wurden bereits von Mpagazehe et al. [14] für verhältnismäßig kleine Partikel bei niedrigen Einschlaggeschwindigkeiten durchgeführt.

Ein weiterer Aspekt, der sich im Hinblick auf die beiden zuvor dargestellten weiterführenden Untersuchungsmöglichkeiten ergibt, ist die kombinierte Betrachtung beider Fälle. Während einer realen Mondladung tritt nicht nur ein Strom an Partikeln auf. Die verschiedenen Partikel werden auch je nach Durchmesser auf unterschiedliche Geschwindigkeiten beschleunigt [17]. Neben den unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Partikel sollte hierbei auch die mengenmäßige Verteilung der verschiedenen Durchmesser berücksichtigt werden. Auch hier könnte es aufgrund möglicher Vorschädigungen durch den Einschlag größerer Partikel dazu kommen, dass Partikel mit geringer kinetischer Energie, die in Einzeluntersuchungen zu keinen nennenswerten Schädigungen führen, durch die Schwächung des Materials in der Lage sind zusätzliche signifikante Oberflächenveränderungen hervorzurufen. Zudem könnte auch die irreversible Anlagerung dieser Partikel an durch den Einschlag größerer Partikel generierten Schadstellen begünstigt beziehungsweise erst ermöglicht werden. Andererseits könnten kleinere Partikel, da sie aller Wahrscheinlichkeit nach in größerer Zahl auftreten [11], auch bei einem nicht irreversiblen Anhaften zu einer kurzzeitigen Bedeckung der Oberfläche führen und damit eine Art Schutzschicht bilden, wodurch die Schadwirkung anderer Partikel abgeschwächt wird. Solche Experimente dürften jedoch mit einem herkömmlichen Beschleuniger nur schwer realisierbar sein. Eine denkbare Möglichkeit wäre ein Raketentriebwerk im Labormaßstab einzusetzen, um gleichzeitig verschiedene Geschwindigkeiten und einen vergleichsweise kontinuierlichen Partikelstrom zu erzeugen, oder mehrere Beschleuniger parallel einzusetzen. Wobei eine Kalibrierung hinsichtlich erreichter Geschwindigkeit der Partikel eine große Herausforderung darstellt und ohne Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vermutlich nahezu nicht durchführbar ist.

Durch die Untersuchung des Einschlags von Mondanalogmaterial auf technischen Oberflächen wurde ein solider Grundstock für das Verständnis der jeweiligen Auswirkungen und Schadmechanismen geschaffen. Die Studie zeigt, dass bereits geringe Mengen einschlagender Partikel zu signifikanten Schädigungen führen können und sensibilisiert für diese Thematik. Darüber hinaus stellt sich jedoch die Frage wie sich der Einschlag von Regolithpartikeln auf technische Komponenten oder Gesamtsysteme auswirkt. Aus dieser Fragestellung ergibt sich eine Vielzahl denkbarer Forschungsmöglichkeiten. Ein Grundstein in diese Richtung wurde bereits durch Mpagazehe et al. [21] mit der Untersuchung der Leistungsverringerung eines durch Einschlag degradierten Solarkonzentrators gelegt. Darüber hinaus wäre auch die Betrachtung einer Degradation von Solarzellen oder Radiatoren durch den direkten Partikeleinschlag für zukünftige Missionen von Bedeutung. Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen wäre insbesondere ein wiederholter

Beschuss zur Nachstellung mehrerer Start- und Landevorgänge von Interesse. Speziell bei den duktilen Werkstoffen hat sich gezeigt, dass es zu einer Ablagerung von Projektilfragmenten kommt. Dies könnte insbesondere bei Radiatoren zur Bildung einer leistungsvermindernden Schicht aus Regolith führen. Ein weiterer Aspekt wäre die Betrachtung von Kamerasystemen, da diese vermutlich auf allen zukünftigen Missionen eingesetzt werden und die zuvor durchgeführten Experimente gezeigt haben, dass bereits geringe Mengen einschlagender Partikel zu einer signifikanten Verschlechterung optischer Eigenschaften führen. Hierbei wäre insbesondere zu untersuchen, inwieweit die Degradation der Optiken durch Bildkorrekturen ausgeglichen werden können. Speziell im Hinblick auf zukünftige bemannte Missionen wäre auch die Betrachtung von Dichtungssystemen von Relevanz. Bereits während der Apollo-Missionen hat sich gezeigt, dass Dichtungen stark durch lunares Regolith in Mitleidenschaft gezogen werden [8]. Daher wäre es von Interesse zu untersuchen inwieweit beschleunigte Partikel in der Lage sind in aktuelle Dichtungssysteme einzudringen oder diese nachhaltig zu schädigen.

3 Abrasiver Verschleiß von technischen Oberflächen²³

Dieses Kapitel behandelt den abrasiven Verschleiß verschiedener technischer Oberflächen durch das Mondanalogmaterial JSC-1A bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Zudem kommen weitere Abrasivmedien zur Anwendung, um einen Vergleich hinsichtlich des auftretenden Verschleißes zu ermöglichen.

Für die dazu durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden zuerst in Kapitel 3.1 die Grundlagen zum Verständnis des abrasiven Verschleißes und hierbei insbesondere des untersuchten Dreikörper-Abrasivverschleißes geschaffen. Im Anschluss daran wird in Kapitel 3.2 der für die experimentellen Versuche im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und eingesetzte Reibradteststand beschrieben. Im Hauptteil (Abschnitt 3.3) des Kapitels werden die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen vorgestellt und diskutiert. Hierzu werden zuerst die verschiedenen verwendeten Probenmaterialien und Abrasivmedien behandelt und die Ermittlung der Verschleißgrößen erläutert. Im Anschluss daran wird auf die durch Vorversuche gewonnenen Erkenntnisse sowie auf die Versuchsergebnisse mit Glasperlen als Abrasivmedium eingegangen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse können Restriktionen hinsichtlich des Versuchsaufbaus sowie die Gründe für den Ausschluss von Glasperlen als Abrasivmedien in weiteren Versuchen erläutert werden. Bei der Beschreibung der Hauptuntersuchungen wird der durch unterschiedliche Abrasivmedien auftretende abrasive Dreikörper-Verschleiß verschiedener Aluminiumlegierungen und Polymere bei unterschiedlichen Versuchs- und Umgebungsbedingungen charakterisiert. Direkt an die jeweiligen Beschreibungen anschließend werden die Ergebnisse diskutiert. Zum Abschluss wird in Abschnitt 3.4 eine Zusammenfassung der Erkenntnisse präsentiert und ein Ausblick für weitere Forschungsthemen gegeben.

²³ Dieses Kapitel basiert zum großen Teil auf einer erweiterten und überarbeiteten Version der durch den Autor betreuten Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93]. Aus der Bachelorarbeit entnommene Teile sind als solche im Folgenden kenntlich gemacht.

3.1 Grundlagen zum Abrasivverschleiß

Dieser Abschnitt behandelt sowohl die Grundlagen zum Verständnis des Abrasivverschleißes wie auch bereits von anderen Autoren durchgeführte Experimente, die sich mit dem Verschleiß durch extraterrestrische Bodenmaterialien beziehungsweise deren Analogmaterialien beschäftigen.

Bereits während der Apollo-Missionen hat sich gezeigt, dass sich eine Vielzahl von negativen Einflüssen und Beeinträchtigungen der Astronauten und verwendeten Systeme auf abrasiven Verschleiß durch lunares Oberflächenmaterial zurückführen lassen. Hierdurch traten im Vergleich zu anderen Schadwirkungen durch lunares Oberflächenmaterial mitunter die schwerwiegendsten Probleme auf [9]. Einige Beispiele für durch Abrasivverschleiß hervorgerufenen Schädigungen sind nach [9]: das Durchscheuern verschiedener Raumanzugteile sowie deren Thermalisolation und Mikrometeoritenschutz, Beeinträchtigungen des Sichtfeldes durch ein Zerkratzen des Visiers und das Verkratzen von Anzeigen und Instrumenten des Lunar Roving Vehicles, wodurch das Ablesen stark beeinträchtigt wurde.

Die Relevanz von Untersuchungen zum abrasiven Verschleiß durch Mondmaterial wird dadurch unterstrichen, dass die Bedeutung von Abrasivverschleiß durch die Wissenschaftsgemeinde als „hoch“ eingestuft wird und die abrasiven Eigenschaften von Mondmaterial zu den fünf relevantesten physikalischen Eigenschaften gezählt werden [48]. Nach Kobrick et al. [48] lassen sich hierbei zwei generelle Verschleißarten unterscheiden. Zweikörper-Verschleiß tritt auf, wenn Mondmaterial in direktem Kontakt mit Oberflächen oder Systemen, wie zum Beispiel Raumanzügen steht. Wohingegen es zu Dreikörper-Verschleiß kommt, wenn sich Mondmaterial zwischen sich bewegenden Oberflächen befindet. In seiner Arbeit betrachtet Kobrick [24] beide Phänomene und führt hierzu experimentelle Untersuchungen unter Laborbedingungen durch. Auftretender Zweikörper-Verschleiß durch Mondmaterial wurde hierbei durch in Epoxid eingebettete unregelmäßig geformte Materialien wie zum Beispiel Anorthosit, Olivin oder Spinell mit Hilfe von Ritztests (Revetest® Ritzprüfer) dargestellt und untersucht. Nach Aussage des Autors [24] stößt der für solche Untersuchungen verwendete ASTM International (ASTM) Standard, G 171 [49] zur Charakterisierung von Zwei-Körper-Verschleiß an seine Grenzen, da hierbei lediglich die Breite des erzeugten Kratzers betrachtet wird. Kobrick [24] verweist dazu darauf, dass die 3D-Geometrie der Beschädigung nicht betrachtet wird, wodurch zwei Messprofile die

gleichen Abrasiveigenschaften haben, obwohl sie sich zum Beispiel hinsichtlich der Eindringtiefe deutlich unterscheiden. Als Lösung für dieses Problem wird die Verwendung moderner Profilometer zur Bestimmung der 3D-Geometrie der Beschädigung vorgeschlagen. Des Weiteren zeigt sich, dass aufgrund der Brüchigkeit der verwendeten Materialien sekundäre und tertiäre Schädigungen auftreten können und damit ein Standard-Kratztest versagt [24], [48]. Dies unterstreicht die Komplexität von Verschleißuntersuchungen. Für die experimentellen Untersuchungen zum Drei-Körper-Verschleiß wurde von Kobrick [24] ein Versuchsaufbau verwendet, der sich an das ASTM B611 Konzept anlehnt. Die Versuche wurden hierzu unter Laborbedingungen durchgeführt. Nach Aussage des Autors [24] können reale Verschleißbedingungen durch Dreikörper-Verschleißuntersuchungen besser dargestellt werden, als dies mit einzelnen Kratztests möglich ist. In den durchgeführten Untersuchungen wurde dazu der Verschleiß verschiedener Metalllegierungen und PMMA durch unterschiedliche Verschleißmedien, insbesondere auch durch die Mondanalogmaterialien NU-LHT-2M und JSC-1A, charakterisiert.

Die Relevanz des Verständnisses von abrasivem Verschleiß für extraterrestrische Missionen kann auch am Beispiel der Pathfinder Mission dargelegt werden. Bei dieser Mission wurde der abrasive Verschleiß verschiedener Materialien in situ auf der Marsoberfläche mit Hilfe des Wheel Abrasion Experiments (WAE) untersucht. Hierzu wurden dünne Streifen verschiedener Metalle auf einem der Räder des Mars Pathfinder Rovers (Sojourner) angebracht. Durch Messung der Änderung der Reflektivität der Metalle sollte der durch den Kontakt mit Marsstaub auftretende Abrasivverschleiß der Metalle charakterisiert werden. Hierzu wurden ein Zentimeter breite Streifen aus Aluminium, Platin und Nickel in fünf verschiedenen Dicken zwischen 200 Å und 1000 Å verwendet [50]. Für die Durchführung der Experimente wurde der Rover durch seine verbleibenden fünf Räder stationär gehalten während das für die Untersuchungen verwendete Rad je zwei Umdrehungen rückwärts lief. Basierend auf dem so erzeugten Abrasivverschleiß der Metallstreifen und der damit verbundenen Änderung der Reflektivität sollte die Härte und das Abrasivverschleißvermögen des Marsbodens charakterisiert werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Aluminiumproben am stärksten degradierten und das auf dem Mars vorkommende Bodenmaterial eine vergleichbare Härte wie Platin aufweist. Zusätzlich wird darauf verwiesen, dass der vor Ort auftretende Verschleiß der Metallproben vergleichbar ist mit den Daten, die aus Laborexperimenten mit Hilfe von Marsanalogmaterial gewonnen wurden [51]. Dies ist ein zusätzlicher Indikator, dass experimentelle

Untersuchungen mit geeigneten Analogmaterialien wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Missionen liefern können.

Nach Budinski [52] kann ein Materialabtrag von Festkörpern und damit Verschleiß durch drei elementare Prozesse hervorgerufen werden: Material kann aus der Oberfläche mechanisch herausgebrochen werden, Materialabtrag kann durch Auflösen der Oberfläche entstehen und die Oberfläche kann aufgeschmolzen oder verdampft werden. Auch hier ist eine Kombination dieser elementaren Prozesse bei einer Vielzahl von Verschleißerscheinungen möglich.

Allgemein betrachtet ist Verschleiß das Ergebnis von Abrasion, Adhäsion, Ermüdung und Korrosion, die in unterschiedlichen Kombinationen auf Materialien und Systeme einwirken [53] und somit hervorgerufen durch mechanische Prozesse zu einem fortschreitenden Materialverlust beziehungsweise Materialabtrag der Oberflächen beteiligter Festkörper führen [54]. Die Einteilung der einem Verschleiß von Oberflächen zugrunde liegenden Mechanismen in die vier Hauptverschleißmechanismen Abrasion, Adhäsion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen ist nach heutigem Stand gängige Praxis und wird von einer Vielzahl von Autoren vorgenommen [53], [54], [55], [56], [57].

Diese vier Mechanismen unterscheiden sich in ihrer Wirkweise. Verschleiß durch Adhäsion wird durch die Ausbildung und anschließende Trennung atomarer Haftbrücken außerhalb der ursprünglichen Bindungsebene hervorgerufen. Typische Verschleißerscheinungen sind unter anderem Fressen, Materialübertrag sowie Riefen und Risse im Material. Abrasion wird durch das Eindringen eines Gegenkörpers in einen anderen Festkörper (Grundkörper) hervorgerufen, wobei je nach Materialkombination Verformungs- und Zerspanungsprozesse sowie ein Herausbrechen von Material dominieren. Typische hierbei auftretende Verschleißerscheinungen sind unter anderem Späne, Riefen, Kratzer und Mulden. Durch wechselnde Beanspruchung von Oberflächen können Anrisse im Material erzeugt werden, die sich bei anhaltender Beanspruchung weiter ausbreiten und zu Materialabtrag führen, wodurch es zu Verschleiß durch Oberflächenzerrüttung kommt. Für diesen Verschleißmechanismus typische Erscheinungsformen sind unter anderem Grübchen und Risse. Als tribochemische Reaktionen werden chemische Reaktionen bezeichnet, die infolge tribologischer Beanspruchungen auftreten und zur Ausbildung von Reaktionsschichten auf den Materialoberflächen führen. Für tribochemische Reaktionen

typische Verschleißerscheinung sind unter anderem Schichtbildung durch Reaktionsprodukte sowie Oxidation [54], [55].

Abrasivverschleiß betrifft alle beweglichen Bauteile und Dichtungsflächen [48]. Abrasivverschleiß wird durch die Interaktion zwischen Oberflächen und harten Partikeln ausgelöst, die nahezu überall zu finden sind. Beispielsweise als Staubpartikel in der Umgebung oder abgelagert auf Systemen und Werkzeugen. Damit ist sie die am weitesten verbreitete sowie kostenintensivste Art von Verschleiß [53], [58]. Dies unterstreicht ein weiteres Mal die Relevanz der Untersuchungen zum abrasiven Verschleiß. Da sich in der vorliegenden Arbeit primär auf die Untersuchung der Auswirkungen von Abrasivverschleiß, genauer Dreikörper-Abrasivverschleiß, konzentriert wurde, soll im Folgenden diese Verschleißart sowie der Verschleißmechanismus der Abrasion noch genauer betrachtet und beleuchtet werden, denn Abrasion zählt neben Oberflächenzerrüttung zu den vorherrschenden Verschleißmechanismen beim Dreikörper-Abrasivverschleiß [55].

Abrasion wird durch das Eindringen und Gleiten von Rauheitsspitzen eines harten Verschleißpartners sowie durch das Eindringen und Gleiten von Partikeln in beziehungsweise über die weichere Oberfläche des Grundkörpers ausgelöst. Bei den Partikeln kann es sich entweder um Fremdpartikel oder um durch den Verschleiß entstandene Verschleißpartikel handeln [52], [55]. Wie zuvor bereits erwähnt, dominieren je nach Materialkombination unterschiedliche Mikroprozesse den Mechanismus des abrasiven Verschleißes. Handelt es sich beim Grundkörper um einen duktilen Festkörper, treten hauptsächlich Mikroverformungsprozesse durch Mikropflügen sowie Mikrozerspanungsprozesse auf [55], [57]. Unter dem Prozess des Mikropflügens ist das Eindringen des Gegenkörpers und die daraus resultierende plastische Verformung des Grundkörpers zu verstehen. Der Grundkörper wird dabei an den Rändern der entstehenden Furche sowie vor dem eindringenden Gegenkörper aufgeworfen. Prinzipiell würde es hierbei bei einem einmaligen Durchlaufen des Mikroprozesses noch zu keinem Materialabtrag kommen. Der entstehende Materialabtrag wird durch eine Vielzahl von parallel und oder nacheinander ablaufender Mikropflügeprozesse hervorgerufen, die sich gegenseitig beeinflussen und somit zu Mikroermüdung führen. Mikrospanen ist der Prozess des Herauslösen von Material des Grundkörpers infolge des Eindringens des Gegenkörpers in Form eines Spans. Somit wäre, im idealen Fall des Mikrospanens, das durch den Span herausgelöste Volumen gleich dem Volumen der entstehenden Furche. Welcher der beiden Prozesse dominiert, hängt vom Angriffswinkel des eindringenden Gegenkörpers ab. Mit

steigendem Angriffswinkel dominiert hierbei Mikrospanen, wodurch es gleichzeitig zu einem steigenden Verschleiß kommt. Mikrobrechen tritt hauptsächlich bei spröden Grundkörpern auf, sobald aufgrund der eingebrachten Spannungen die kritische Belastungsgrenze des Materials überschritten wird. Hierbei kommt es aufgrund des Herausbrechens von Material aus dem Grundkörper, infolge von Rissbildung und Rissausbreitung, zu erhöhtem Verschleiß [57]. Die bei abrasivem Verschleiß tatsächlich auftretende Höhe des Verschleißbetrages, einer direkten Verschleißmessgröße zur Angabe der Massen-, Volumen-, Flächen- oder Längenänderung des Grundkörpers [54], wird dabei durch das jeweilige tribologische System bestimmt [55]. Ein tribologisches System definiert sich dabei nach [54] als Gesamtheit aller an der tribologischen Beanspruchung beteiligten Komponenten, den für die tribologische Beanspruchung charakteristischen Größen und Vorgängen sowie den Eigenschaften der Komponenten und den aus der tribologischen Beanspruchung resultierenden Veränderungen der Eigenschaften. Nach [55] wird der resultierende Verschleißbetrag bei Abrasion maßgeblich von der Länge des Gleitweges des Abrasivstoffes bestimmt. Längere Gleitwege erzeugen hierbei höhere Verschleißbeträge. Damit führen Abrasivstoffe, die in gebundener Form vorliegen, im Vergleich zu losem Abrasivmaterial zu höheren Verschleißbeträgen, da der Gleitweg bei losem Abrasivmaterial durch Rollbewegungen des Materials signifikant verkürzt wird.

Karl Sommer et al. [55] unterscheiden zwei generelle Formen des Abrasivverschleißes: Zweikörper-Abrasivverschleiß und Dreikörper-Abrasivverschleiß. Wobei die Autoren anführen, dass der Begriff Abrasivverschleiß hierbei weniger als Verschleißmechanismus, sondern eher im Sinne einer Verschleißart zu verstehen ist. Der Unterschied zwischen beiden Verschleißarten besteht darin, dass beim Zweikörper-Abrasivverschleiß der Gegenkörper als gebundenes Korn oder frei, als loses Korn, auf den Grundkörper einwirkt, wohingegen sich beim Dreikörper-Abrasivverschleiß das Verschleißmaterial in einem Spalt zwischen Grund- und Gegenkörper befindet. Beim Zweikörper-Abrasivverschleiß kann der Verschleiß sowohl durch eine reine Gleitbewegung wie auch durch eine Gleit- und Rollbewegung des Abrasivmaterials hervorgerufen werden. Nach Karl Sommer et al. [55] werden beide Fälle dem Abrasiv-Gleitverschleiß zugeordnet. Eine reine Gleitbewegung tritt auf, wenn das Abrasivmaterial als gebundenes Korn vorliegt. Liegt das Abrasivmaterial hingegen als loses oder freies Korn vor, so können sowohl Roll- wie Gleitbewegungen der Partikel des Abrasivmaterials auftreten. Wobei nach Karl Sommer et al. [55] der Übergang vom Abrasiv-Gleitverschleiß zur Erosion fließend ist. Beim Dreikörper-Abrasivverschleiß tritt grundsätzlich eine Mischung aus Gleit- und Rollbewegung der Partikel des Abrasivmaterial

auf. Daher treten nach Karl Sommer et al. [55] sowohl beim Dreikörper-Abrasivverschleiß und Abrasiv-Gleitverschleiß ähnliche Verschleißerscheinungsformen auf. Zu den Verschleißerscheinungsformen, die beim Dreikörper-Abrasivverschleiß auftreten können, zählen laut Karl Sommer et al. [55] Riefen, Mulden, Riffel, Einbettungen, die durch Einlagerung des harten Abrasivmaterials in die weicheren Verschleißpartner hervorgerufen werden, Schubrisse aufgrund von Adhäsion durch lokal auftretenden direkten Kontakt von Grund- und Gegenkörper bei einem Fehlen des Verschleißmaterials sowie Profiländerungen der Verschleißpartner. Laut Archard [59] ist Dreikörper-Abrasivverschleiß die in der (Ingenieur-)Praxis am häufigsten vorkommende Verschleißart. Er entsteht sowohl durch von außen in technische Systeme eingetragene Fremdpartikel wie durch im System selbst erzeugte Verschleißpartikel, die aus Oberflächenbeschädigungen vorangegangener Verschleißprozesse resultieren. Die Aussage von Archard [59] unterstreicht ein weiteres Mal die Relevanz der im nächsten Kapitel durchgeführten Untersuchungen, wobei hier primär der Verschleiß durch von außen eingebrachte Partikel untersucht wird.

Für die Messung des auftretenden Verschleißes wird neben den zuvor bereits erwähnten direkten Verschleißgrößen laut Czichos et al. [56] als Referenzgröße für den Verschleiß oftmals der Verschleißkoeffizient verwendet, der sich aus dem Verschleißvolumen dividiert durch das Produkt aus Normalkraft und (Verschleiß-) Weg berechnet. Die Grenze für den Übergang von schwerem zu mildem Verschleiß liegt dabei bei $10^{-6} [\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})]$ [56]. Anders als bei dem von Archard [59] eingeführten Verschleißkoeffizienten geht hierbei die Härte des weicheren Verschleißpartners nicht in die Berechnung mit ein. Der Verschleißkoeffizient ist jedoch nicht im Sinne einer Materialkenngröße der einzelnen Werkstoffe zu verstehen, sondern bezieht sich auf das gesamte am Verschleißprozess beteiligte tribologische System [56].

3.2 Der Reibradteststand²⁴

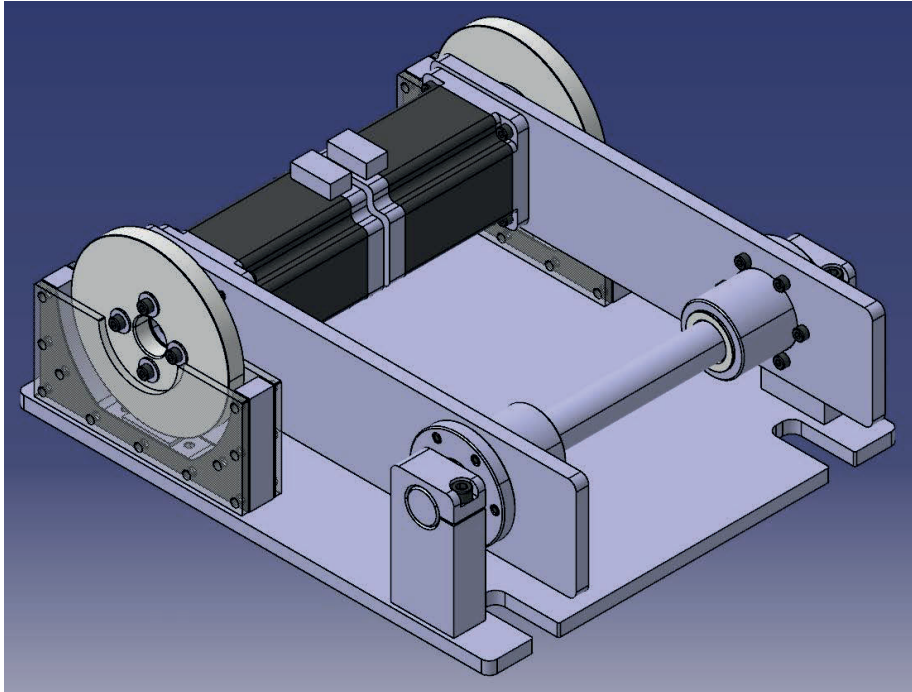


Abb. 60: CAD-Modell des Reibradteststandes

Abb. 60 zeigt das CAD-Modell des für die Verschleißuntersuchungen von technischen Oberflächen verwendeten Reibradteststandes des Lehrstuhls für Raumfahrttechnik. Der Entwurf des Teststandes ist vom ASTM G65-16 Testverfahren [60] abgeleitet. Bei diesem Verfahren wird ein Strom aus Abrasivmaterial aus einem Reservoir zwischen Proben und Reibrad gefördert und anschließend wieder aufgefangen. Da der in dieser Arbeit verwendete Teststand auch in der am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik vorhandenen Thermalvakuumkammer betrieben wird, konnte dieser Aufbau aus baulichen Gründen nicht angewendet werden. Der hier verwendete Teststand verfügt deshalb über ein Reservoir für das Abrasivmaterial, das gleichzeitig als Probenkammer dient (vgl. Abb. 62). Der Aufbau ähnelt damit dem von Kobrick [24] in seiner Arbeit zum abrasiven Verschleiß verwendeten Testaufbau.

²⁴ Die Beschreibung des Testaufbaus basiert auf dem in der durch den Autor betreuten Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93] verwendeten Versuchstand. Dieser wurde Frau Kopic für ihre Arbeit zur Verfügung gestellt. Die Beschreibung des Teststandes basiert des Weiteren auf einer überarbeiteten Version, der bereits durch den Autor veröffentlichten Teststandbeschreibung in der Publikation [94]. Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuchsparameter sind aus der Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93] entnommen. Abbildung 60 ist aus der Arbeit von Frau Kopic [93] entnommen und wurde ihr für ihre Arbeit vom Betreuer zur Verfügung gestellt und ist ebenfalls in [94] zu finden. Die weiteren Abbildungen sind nicht aus der Bachelorarbeit entnommen.

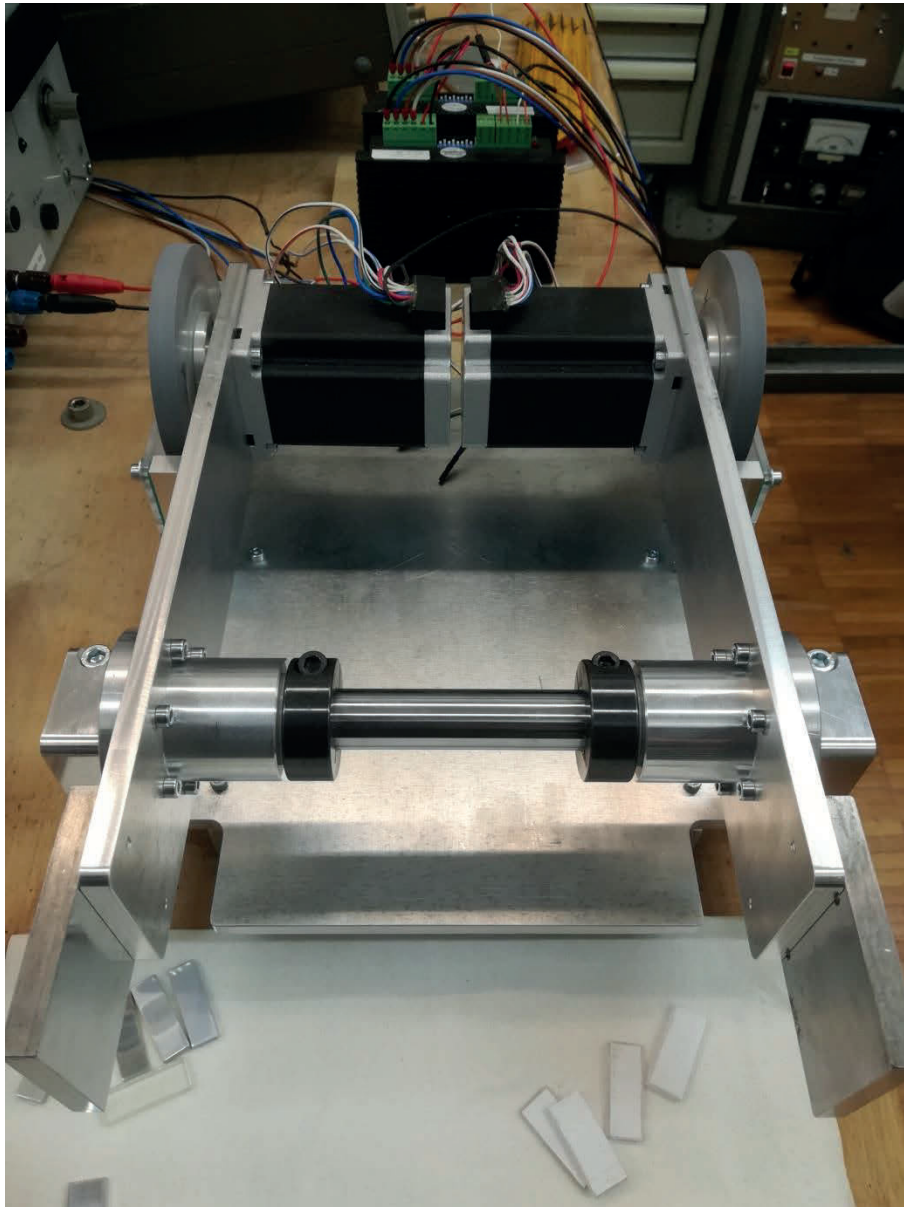


Abb. 61: Der Reibradtteststand mit Aluminium-Reibrädern

Der in dieser Arbeit verwendete Reibradtteststand besitzt einen achsensymmetrischen Aufbau, wodurch zwei Proben gleichzeitig untersucht werden können. Dadurch wird einerseits die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verbessert, insbesondere beim Einsatz unter Thermalvakuumbedingungen, andererseits reduziert sich durch die parallele Durchführung der Versuche die Belegungszeit der Thermalvakuumkammer. Abb. 61 zeigt den Aufbau des Teststandes. Der Antrieb der Reibräder erfolgt dabei je über einen Nanotec Schrittmotor. Reibrad und Motor sind dabei jeweils über einen Hebelarm mit dem hinteren Teil des Teststandes verbunden. In Abb. 61 unten sind je zwei Aussparungen für die Hebelarme zu erkennen. Dadurch können sie nach hinten weggeklappt werden, was ein einfaches

Entnehmen der Probe aus der Probenkammer ermöglicht. Zusätzlich besteht die Möglichkeit weitere Gewichte an den Hebelarmen anzubringen, um die auf die Probe wirkende Normalkraft zu variieren. Hierauf wurde allerdings im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Der Reibradtteststand ist so konzipiert, dass er ohne dauerhafte Umbauten sowohl unter Laborbedingung als auch in der Thermalvakuumkammer des Lehrstuhls für Raumfahrttechnik in einem Temperaturbereich zwischen $+50^{\circ}\text{C}$ und -55°C betrieben werden kann. Speziell für den Betrieb in der Thermalvakuumkammer ist es unerlässlich ein Austreten des Abrasivmaterials auf ein Minimum zu reduzieren beziehungsweise komplett zu vermeiden, um einerseits Verschmutzungen und Schädigungen der Innenwände zu vermeiden und andererseits ein mögliches Einsaugen der Partikel in die Vakuumpumpen der Anlage zu verhindern. Hierzu wurden die Außenwände der Probenkammer des Reibradtteststandes, wie in Abb. 62 zu sehen, vollständig mit einer Dichtung versehen. Zusätzlich verfügt die Probenkammer über einen abnehmbaren Deckel, der den Austritt von während der Testdurchführung potentiell hochgeschleuderten Partikeln des Abrasivmaterials verhindert. Trotz der Abdeckung ist die Probenkammer nicht luftdicht verschlossen, um den Betrieb unter Vakuumbedingungen nicht zu beeinflussen.

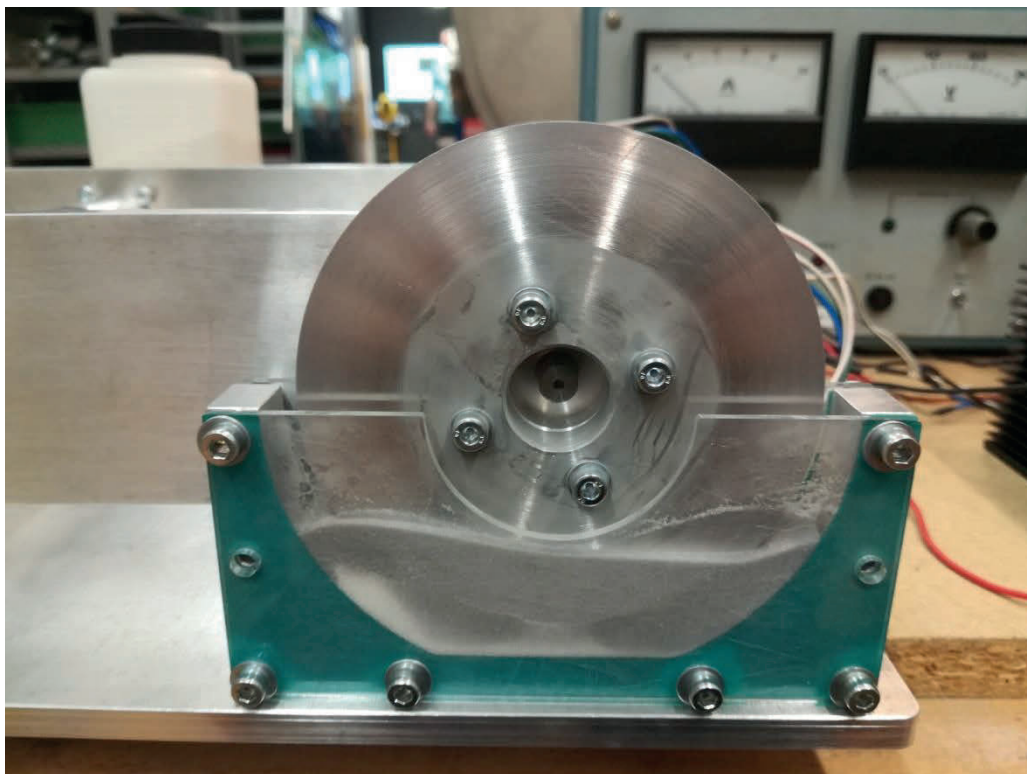


Abb. 62: Seitenansicht einer Probenkammer mit Abrasivmaterial gefüllt (ohne Deckel)

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde der Reibradtteststand in zwei unterschiedlichen Konfigurationen betrieben. In der ursprünglichen Konfiguration wurden als Reibräder POM(Polyoxymethylen)-Reibräder mit einem Durchmesser von 10 cm verwendet. Während der Versuche hat sich allerdings gezeigt, dass sich Abrieb der POM-Räder an der Probenoberfläche anlagert, wodurch sich die Ermittlung des auftretenden Verschleißes erschwert beziehungsweise nicht reproduzierbar durchgeführt werden konnte (siehe hierzu Kapitel 3.3.2). Aus diesem Grund wurden für den Großteil der Versuche Aluminium-Reibräder mit denselben Abmessungen verwendet. Der sonstige Aufbau des Reibradtteststandes ist für beide Konfigurationen gleich. Da das Gewicht der Reibräder direkt die aufgebrachte Normalkraft beeinflusst, ergibt sich somit für die beiden Reibradvarianten eine unterschiedliche Normalkraft. Bei der Verwendung der POM-Reibräder wirken 15,9 N auf jeder Seite, wohingegen bei der Verwendung der Aluminium-Reibräder je 17,5 N wirken.

Bereits während der Kalibrierungsversuche hat sich gezeigt, dass es beim Betrieb der Reibräder mit einer definierten Drehrichtung zu einem „Freischaufeln“ der Probe kommt. Das Abrasivmaterial wird in Drehrichtung der Räder weggefördert und häuft sich auf dieser Seite der Probenkammer an. Um sicher zu stellen, dass während der gesamten Testzeit Abrasivmaterial zwischen Reibrad und Probe gelangt, wurde für die im Folgenden beschriebenen Versuche eine zyklisch wechselnde Drehrichtung der Reibräder gewählt. Somit wird das Anhäufen von Abrasivmaterial an einer Seite der Probenkammer verhindert. Für sämtliche Versuche wurde dabei eine konstante Geschwindigkeit von 29 Umdrehungen pro Minute gewählt. Um etwaige Effekte durch unterschiedliche Drehzahlen auszuschließen, wurde lediglich die Dauer der Testläufe variiert. In Tab. 9 sind die den Reibradtteststand betreffenden Versuchsparameter noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tab. 9: Versuchsparameter des Reibradtteststandes

Versuchsparameter	Wert	
Reibraddurchmesser [cm]	10	
Umdrehungen pro Minute [1/min]	29	
Versuchsdauern [min]	15	48
Gesamtzahl Umdrehungen [-]	435	1392
Normalkraft (POM-Reibrad) [N]	15,9	
Normalkraft (Aluminium-Reibrad) [N]	17,5	

3.3 Abrasivverschleiß verschiedener technischer Oberflächen

Dieser Abschnitt behandelt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Abrasivverschleiß verschiedener technischer Oberflächen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen mit unterschiedlichen Abrasivmedien. Dazu werden zuerst die verwendeten Proben- und Abrasivmedien sowie die gemessenen Verschleißgrößen beschrieben. Daran anschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Vorversuchen dargelegt und sich daraus ergebende Einschränkungen erläutert. Im Hauptteil werden die Versuchsergebnisse präsentiert und diskutiert.

3.3.1 Verwendete Materialien und gemessene Verschleißgrößen²⁵

Für sämtliche in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuche mit dem Reibradteststand wurden rechteckige Proben (12 mm x 30 mm) mit einer Probendicke von ungefähr 3 mm verwendet. Für die im Folgenden beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden die beiden Aluminiumlegierungen AlMg3 und Al6061-T6 sowie die drei Polymere Polycarbonat (Makrolon®), POM (Polyoxymethylen) und PEEK (Polyetheretherketon) als Probenmaterialien verwendet. Die beiden Polymere POM und PEEK wurden insbesondere ausgewählt, da sie für die Untersuchung des abrasiven Verschleißes von Kunststoffzahnradern (siehe Kapitel 4) verwendet wurden. Diese Wahl wird auch dadurch unterstützt, dass Polymere eine Vielzahl von positiven Eigenschaften besitzen, die sie für die Verwendung in der Raumfahrt attraktiv machen. Zu diesen gehören unter anderem ihre geringe Dichte, Elastizität, Korrosionsbeständigkeit, die Einsatzmöglichkeiten über ein weites Temperaturspektrum sowie die Verwendung als elektrische Isolatoren [61].

Als Abrasivmedien wurden das bereits in Kapitel 2.2 beschriebene Mondanalogmaterial JSC-1A sowie Quarzsand und Glasperlen als Vergleichsmedien verwendet. Für Quarzsand wurden zwei unterschiedliche Korngrößenbereiche von 100 µm - 300 µm und 100 µm - 500 µm untersucht. Auch für die Glasperlen wurden zwei unterschiedliche Größenbereiche verwendet. Glasperlen wurden mit Durchmessern von 100 µm - 200 µm und 200 µm – 300 µm für die Untersuchungen verwendet. Für jeden Versuch wurde hierbei neues Abrasivmaterial verwendet. Tab. 10 fasst die verwendeten Abrasivmedien sowie den verwendeten Größenbereich noch einmal zusammen.

²⁵ Dieses Kapitel basiert auf der durch den Autor betreuten Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93].

Tab. 10: Verwendete Abrasivmedien und Größenbereich

Abrasivmedium	Größenbereich	
JSC-1A	Standardverteilung	
Quarzsand	100 - 300 μm	100 - 500 μm
Glasperlen	100 - 200 μm	200 - 300 μm

Der Verschleiß der verwendeten Proben wurde durch deren Massenänderung charakterisiert. Hierzu wurde die Masse der Proben vor und nach der Durchführung der Versuche mit einer Analysewaage (Ohaus, Discovery, DV215CD) bestimmt. Die im folgenden Kapitel angegebenen Werte ergeben sich dabei, soweit nicht anders angegeben, aus dem Mittelwert zweier Proben, die unter gleichen Testbedingungen gleichzeitig mit dem Reibradteststand untersucht wurden. Die Fehlerbalken entsprechen dabei den beiden Einzelmessungen der jeweiligen Proben. Die Proben wurden hierzu vor und nach den Versuchen gereinigt.

3.3.2 Vorversuche mit POM-Reibrädern²⁶

In der ursprünglichen Konfiguration des Reibradteststandes sollten POM-Reibräder verwendet werden, da sowohl bei Kobrick [24] wie beim ASTM G65-16 Testverfahren [60] Reibräder aus Kunststoff bzw. Reibräder mit Reibflächen aus Kunststoff verwendet werden. Zudem ist POM ein vergleichsweise kostengünstiger Kunststoff, der auch die für die Thermalvakuumtests vorgegeben Randbedingungen erfüllt.

Abb. 63 zeigt die Massenänderung verschiedener Probenmaterialien bei der Verwendung von POM-Reibrädern. Die Ergebnisse sind jeweils für beide Reibräder des Teststandes separat in einem Diagramm dargestellt. Für die dargestellten Ergebnisse wurde das Mondanalogmaterial JSC-1A als Abrasivmedium verwendet. Es zeigt sich, dass es für die AlMg3-Proben zu einer sehr geringen Massenabnahme kommt. Auch bei den beiden anderen untersuchten Werkstoffen treten nur sehr geringe Massenänderungen auf. Wobei es bei einer der Al6061-T6-Proben sowie bei beiden Makrolon®-Proben zu einer, wenn auch teilweise sehr geringen, Massenzunahme kommt. Nach der Durchführung der Versuche weisen die POM-Reibräder deutliche riefenartige Verschleißerscheinungen auf. Zudem konnte bei der nachträglichen Untersuchung des für die Experimente verwendeten Verschleißmaterials ein deutlicher Abrieb des POM-Rades in Form von feinen Spänen im

²⁶ Die in diesem Teilkapitel dargelegten Ergebnisse der Vorversuche basieren auf den Versuchsdaten aus der durch den Autor betreuten Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93]. Jedoch sind nur die Ergebnisse für Al6061-T6 in der Arbeit von Frau Kopic verwendet worden.

Verschleißmaterial gefunden werden. Dies zeigt, dass an den POM-Reibrädern ein deutlicher Verschleiß durch die Versuche auftritt. Auch konnte auf den Proben eine dünne Schicht an POM-Abrieb gefunden werden. Bei den Aluminiumproben wurde versucht diese Schicht mit Säure zu lösen. Durch dieses Vorgehen konnten zwar die POM-Rückstände entfernt werden, allerdings wurde auch das Probenmaterial durch die Säure angegriffen, wodurch eine gravimetrische Bestimmung des Verschleißes nicht mehr möglich ist. Dies trifft insbesondere für die weiteren Experimente zu, in denen Kunststoffe als Probenmaterial verwendet werden sollen. Aus diesem Grund wurden die POM-Reibräder für die weiteren Experimente durch Aluminiumreibräder ersetzt, bei denen kein Verschleiß in dieser Form auftritt.

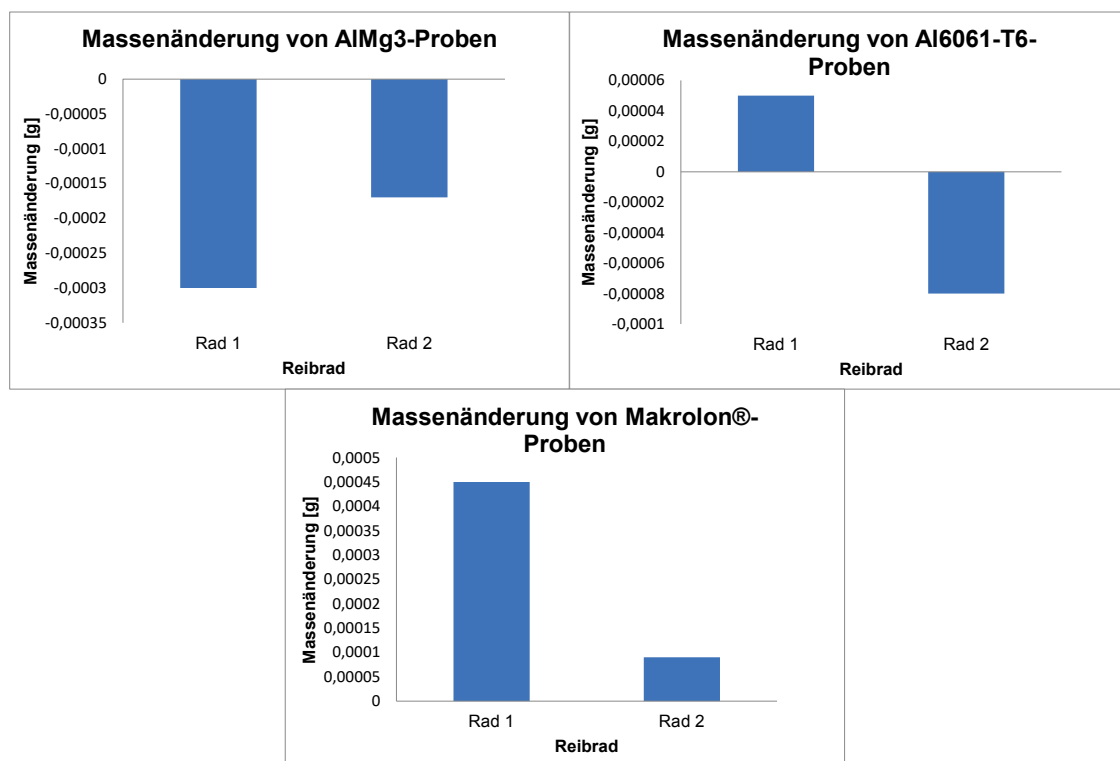


Abb. 63: Massenänderung verschiedener Probenmaterialien bei der Verwendung von POM-Reibrädern (Abrasivmaterial: JSC-1A)

3.3.3 Verwendung von Glasperlen als Abrasivmaterial²⁷

Für die Untersuchungen zum abrasiven Verschleiß verschiedener Materialien (AlMg3, Al6061-T6 und Makrolon®) durch Glasperlen wurde der Reibradteststand mit

²⁷ Für dieses Kapitel wurden die Versuchsdaten aus der durch den Autor betreuten Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93] verwendet. Die Interpretation der Versuchsergebnisse wurde nachträglich vom Autor dieser Arbeit durchgeführt und ist so nicht in der Bachelorarbeit zu finden.

Aluminiumreibrädern bei Laborbedingung betrieben. Die Versuchszeit beträgt dabei 48 Minuten, was insgesamt 1392 Umdrehungen entspricht. Für die Versuche wurden zwei Größenverteilungen von Glasperlen verwendet, 100 μm – 200 μm und 200 μm – 300 μm . Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 64 dargestellt. Mit Ausnahme der Al6061-T6-Proben zeigt sich für alle Proben eine deutliche Massenzunahme. Dies gilt insbesondere für die größere Fraktion der Glasperlen. Für die Al6061-T6-Proben tritt für die kleinere Fraktion der Glasperlen keine nennenswerte Massenänderung auf. Auch für die größere Fraktion liegt die Massenzunahme signifikant unter den beiden anderen Materialien.

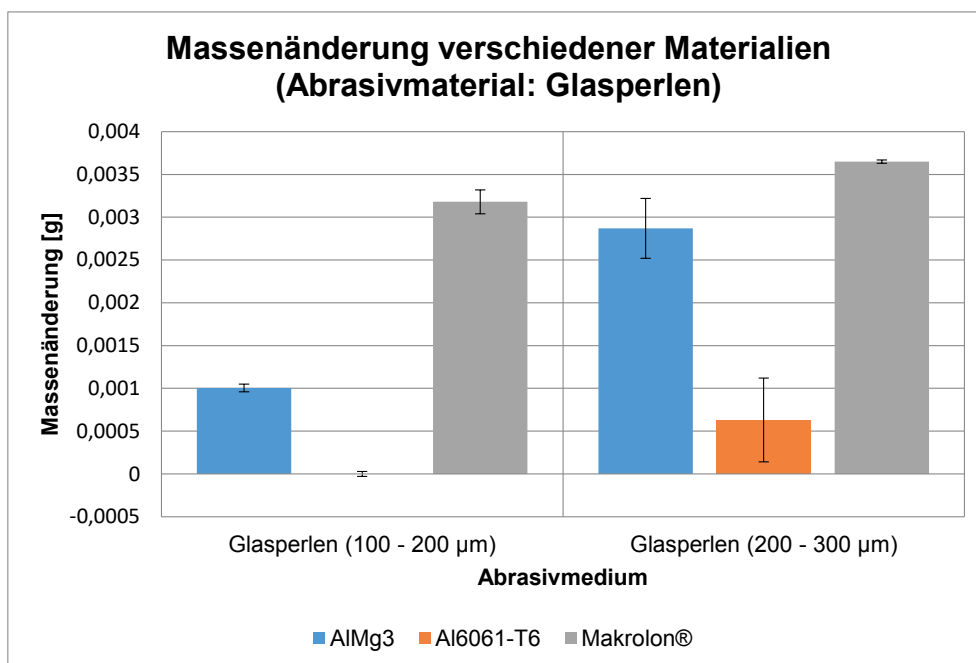


Abb. 64: Massenänderung verschiedener Materialien durch Glasperlen unterschiedlicher Größe

Da bei diesen Versuchen, im Gegensatz zu den POM-Reibrädern, weder deutliche Verschleißerscheinungen an den Reibrädern noch signifikante Verschleißrückstände der Reibräder im verbrauchten Verschleißmaterial gefunden werden konnten und die Massenzunahme der Proben, soweit entstanden, zudem deutlich höher ausfällt, wurde eine Anlagerung des Reibradmaterials als Grund für die Massenzunahme ausgeschlossen.

Somit liegt die Vermutung nahe, dass sich Teile des Abrasivmaterials an der Probenoberfläche abgelagert haben beziehungsweise in die Probenoberfläche eingearbeitet wurden. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden Mikroskopaufnahmen der Oberfläche der AlMg3-Proben nach den Versuchen gemacht sowie eine EDX-Untersuchung (energiedispersive Röntgenspektroskopie) der Proben durchgeführt. Die Ergebnisse dieser

Untersuchungen sind in Abb. 65 dargestellt. In der in Abb. 65 (oben) dargestellten Draufsicht der Proben sind keine signifikanten Einlagerungen oder Fremdkörper auf der Probenoberfläche zu erkennen. Die in Abb. 65 (unten) dargelegten Ergebnisse der EDX-Untersuchungen, die zur Analyse der nachweisbaren Elemente in der Probenoberfläche herangezogen wurden, zeigen hingegen ein deutlich anderes Bild. Man erkennt deutlich, dass neben den in der AlMg3-Legierung hauptsächlich vorkommenden Elementen Aluminium und Magnesium sowie Sauerstoff, dessen Vorhandensein auf eine für Aluminium typische Oxidschicht zurückzuführen ist, weitere Elemente signifikant vertreten sind. Die EDX-Analyse zeigt, dass zusätzlich zu den drei erwähnten Elementen auch Silizium, Natrium und Calcium nachgewiesen werden können, wodurch auf eine Ablagerung von Glas in der Probenoberfläche geschlossen werden kann. Basierend auf der EDX-Analyse kann somit angenommen werden, dass sich Abrasivmaterial in der Probenoberfläche einlagert, denn ein Eintrag der Elemente durch das verwendete Reibrad kann bei dem hier verwendeten Aluminiumreibrad ausgeschlossen werden.

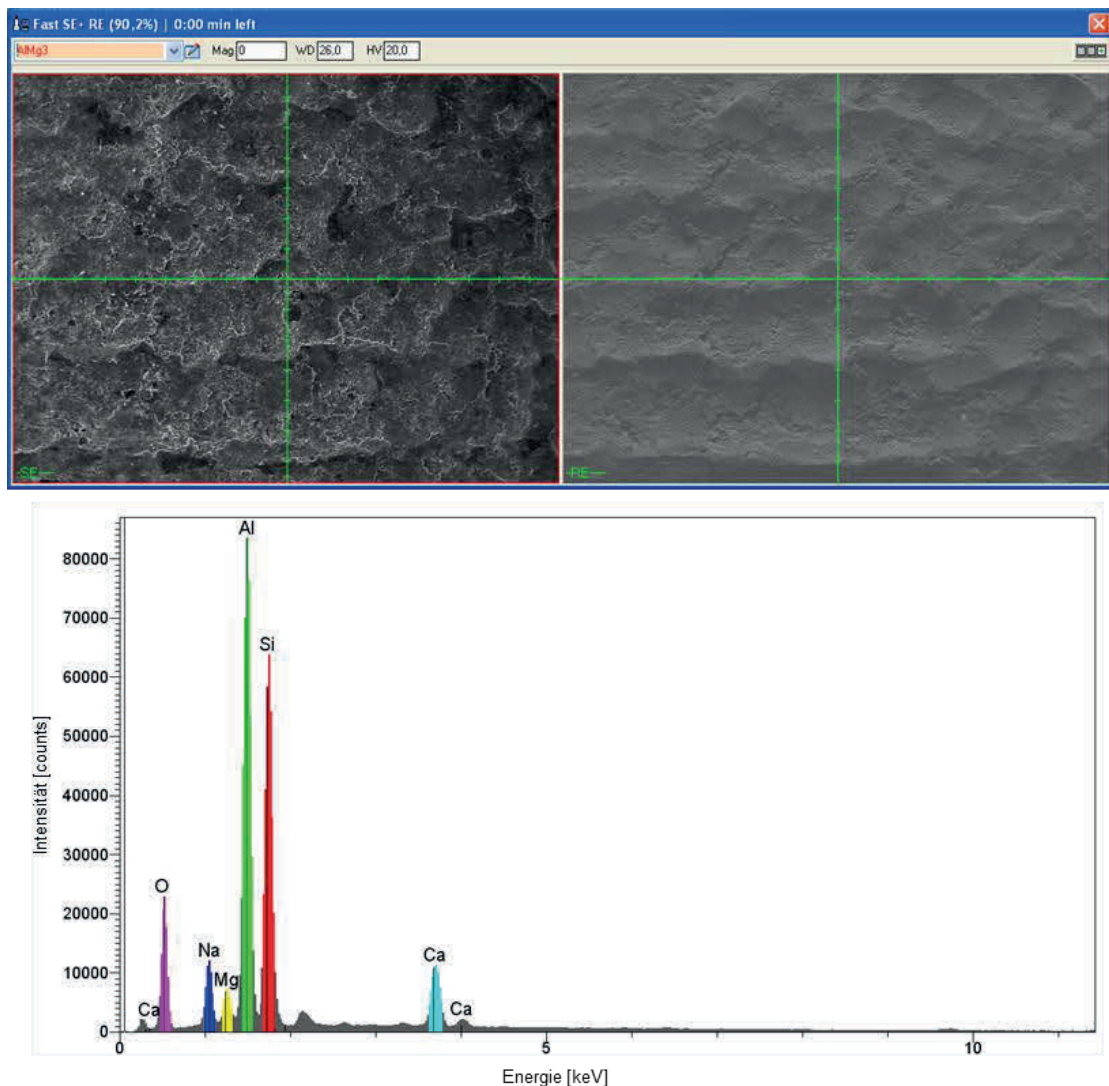
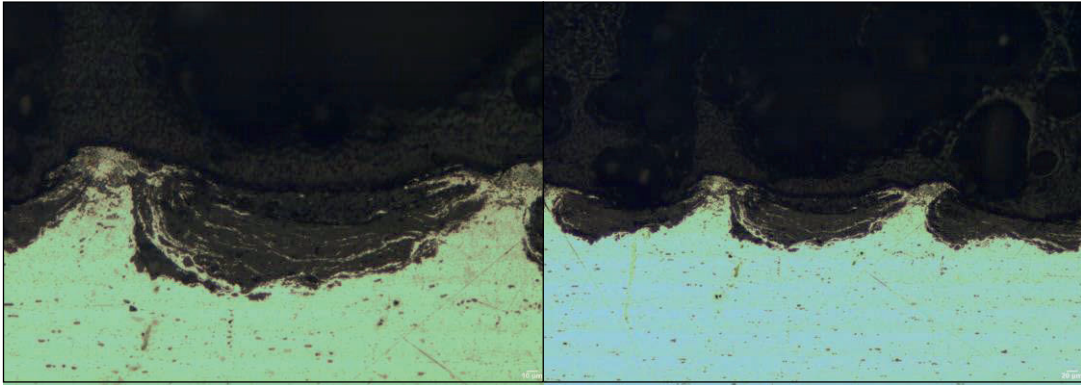


Abb. 65: Mikroskopaufnahmen (oben) und EDX Auswertung (unten) von AlMg3-Proben (Abrasivmaterial: Glasperlen)

Um die Diskrepanz zwischen den aus der Draufsicht gewonnenen Ergebnissen und der EDX-Analyse aufzulösen, wurden zusätzlich Mikroskopaufnahmen des Probenquerschnitts gemacht. Diese sind in Abb. 66 dargestellt. Es sind deutlich zwei unterschiedliche Bereiche der Probe zu erkennen, der großflächige helle Bereich des Probenmaterials und dunklere halbkreisförmige Einlagerungen. Des Weiteren ist zu sehen, dass Teile der halbkreisförmigen Bereiche von dünnen Strukturen des hellen Probenmaterials durchzogen sind, was auf eine tatsächliche Einlagerung des Abrasivmaterials schließen lässt. Die Abbildung zeigt ebenfalls anhand der halbkreisförmigen Einlagerungen, dass die durch die Glaskugeln entstehenden Furchen nahezu wieder vollständig mit Abrasivmaterial gefüllt sind. Dadurch lässt sich die verhältnismäßig gleichmäßige Oberflächenstruktur in Abb. 65 (oben) erklären, anhand derer keine signifikanten Fremdkörper festgestellt werden konnten.



*Abb. 66: Mikroskopaufnahmen des Probenquerschnitts von AlMg3-Proben
(Abrasivmaterial: Glasperlen)*

Durch die Einlagerung des Abrasivmaterials in die Oberfläche der Proben wird eine Bestimmung des tatsächlich auftretenden Verschleißes durch Glaskugeln mit Hilfe gravimetrischer Messungen nahezu unmöglich, da die Masse an eingelagertem Material den durch den abrasiven Verschleiß auftretenden Massenverlust vollständig überlagert. Aus diesem Grund wurde in den im Folgenden beschriebenen Hauptversuchen auf die Verwendung von Glaskugeln als Abrasivmaterial verzichtet.

3.3.4 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen und Diskussion²⁸

Dieser Abschnitt behandelt die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen zum Abrasivverschleiß verschiedener technischer Oberflächen durch das Mondanalogmaterial JSC-1A sowie Quarzsand verschiedener Korngrößen, der als Vergleichsmedium verwendet wurde.

²⁸ Dieses Kapitel ist eine überarbeitete Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse, basierend auf den Versuchsdaten, die in der durch den Autor betreuten Bachelorarbeit von Frau Inola Kopic [93] gewonnen wurden.

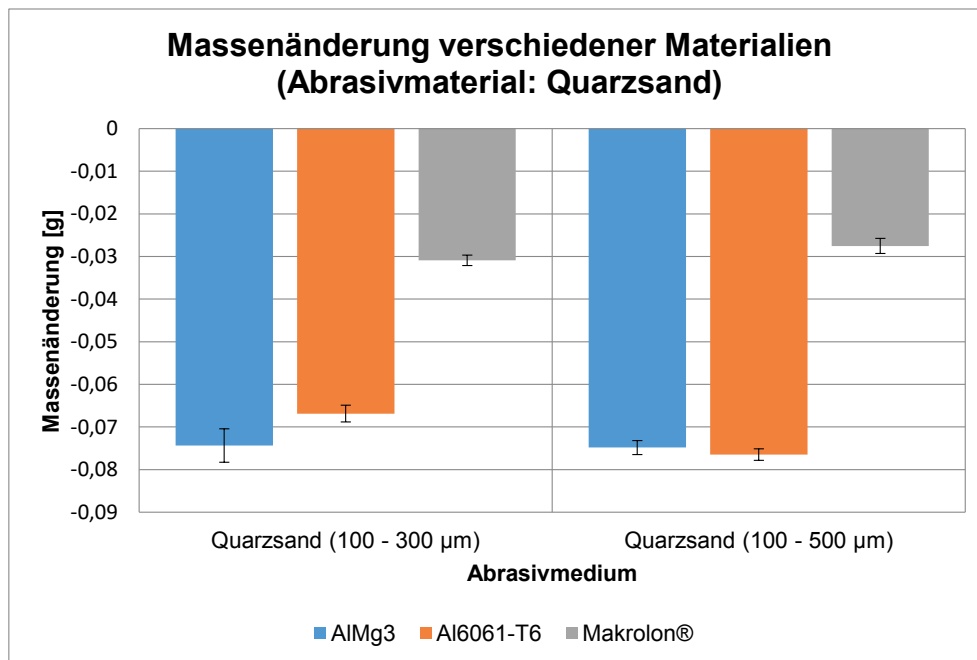


Abb. 67: Massenänderung verschiedener Materialien durch Quarzsand unterschiedlicher Korngröße

Abb. 67 zeigt die Massenabnahme von AlMg3, Al6061-T6 und Makrolon® in Folge des Abrasivverschleißes durch Quarzsand verschiedener Korngrößenbereiche unter Laborbedingungen. Die Messungen wurden jeweils nach 1392 Umdrehungen des Reibrades durchgeführt, was einer Versuchsdauer von circa 48 Minuten entspricht. Die dargestellte Massenabnahme entspricht dabei dem Mittelwert zweier parallel durchgeführter Versuche. Die Fehlerbalken sind jeweils den zugehörigen Messungen der Proben beider Reibräder zugeordnet. Hierbei zeigt sich, dass es keinen signifikanten Unterschied macht, unter welchem Reibrad sich die Probe befand. Auch hinsichtlich der unterschiedlichen Korngrößenbereiche des verwendeten Quarzsandes zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Massenabnahme der jeweiligen Probenmaterialien. Der Vergleich der unterschiedlichen Materialien untereinander zeigt, dass die durchgeführten Versuche für die beiden Aluminiumlegierungen grundsätzlich zu einem signifikant höheren Verschleiß führen, als dies für Makrolon® der Fall ist. Bei allen drei Materialien handelt es sich um duktile Werkstoffe, jedoch besitzt Makrolon® eine deutlich geringere Oberflächenhärte als die beiden Aluminiumlegierungen. Damit ergibt sich eine mögliche Erklärung für die geringere Massenabnahme von Makrolon®. Die Partikel des Abrasivmediums dringen in das weichere Makrolon® ein und werden dort eingelagert, wodurch sich der Verschleiß des weicheren Körpers deutlich reduziert. Dieses Verhalten wird auch in [55] für Metallpaarungen unterschiedlicher Härte beschrieben.

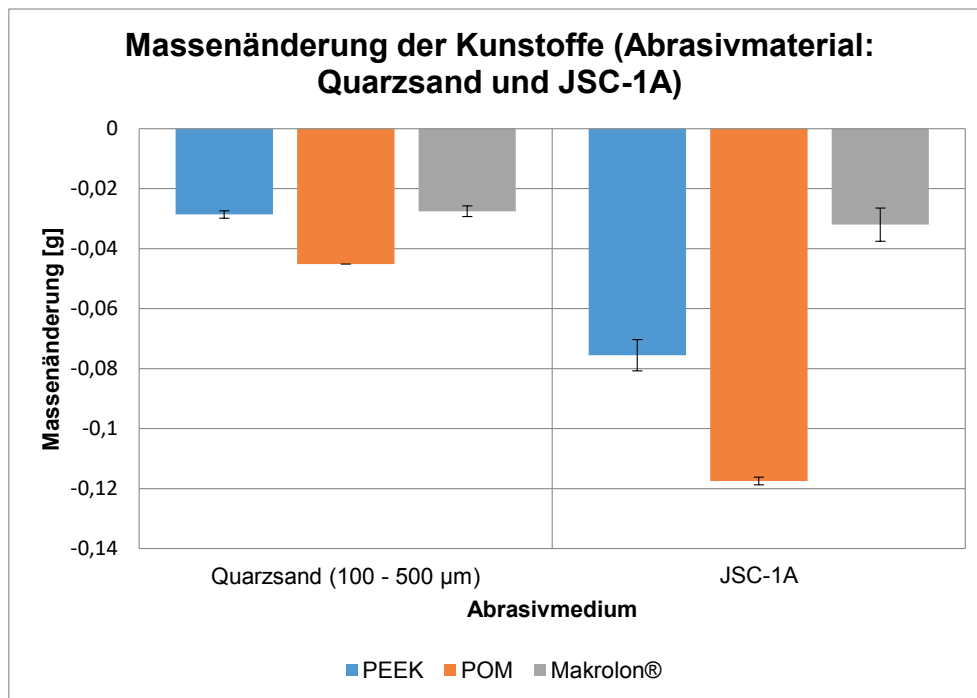


Abb. 68: Massenänderung verschiedener Kunststoffe durch Quarzsand und JSC-1A

In Abb. 68 ist die verschleißbedingte Massenänderung verschiedener technischer Kunststoffe (POM, PEEK und Makrolon®) durch die Einwirkung von Quarzsand und dem Mondanalogmaterial JSC-1A dargestellt. Die Versuche wurden wie zuvor bei Laborbedingungen durchgeführt. Auch die Versuchsdauer wurde konstant gehalten. Für die Darstellung der Ergebnisse in Abb. 68 gelten dieselben Zusammenhänge wie zuvor. Die Ergebnisse für Quarzsand zeigen, dass es für die POM-Proben zu einem höheren Verschleiß im Vergleich zu den PEEK-Proben kommt. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Harsha [62]. Auch hier zeigte PEEK im Vergleich mit anderen Thermoplasten für Quarzsand den geringsten Verschleiß. Für Makrolon® ergibt sich, sowohl bei Quarzsand wie bei JSC-1A, der insgesamt geringste Massenverlust, wobei er für Quarzsand ungefähr gleich dem von PEEK ist. Anders als bei den beiden anderen Polymeren kommt es bei Makrolon® zu keiner signifikanten Steigerung des Massenverlustes bei der Verwendung von JSC-1A als Abrasive. Der Massenverlust liegt hier deutlich unter dem von PEEK und POM. Der geringe Massenverlust von Makrolon® ist unter mehreren Gesichtspunkten ungewöhnlich. Zum einen wäre, basierend auf den Erkenntnissen von Harsha [62], für Makrolon® ein höherer Verschleiß und somit ein höherer Massenverlust als für PEEK zu erwarten. Weiterhin handelt es sich bei Makrolon® um einen amorphen Kunststoff, welcher allgemein im Vergleich zu teilkristallinen Kunststoffen, wie PEEK und POM, zu stärkerem Verschleiß neigt [63]. Zudem sollte das scharfkantige Mondanalogmaterial, ähnlich wie bei

den beiden anderen Kunststoffen, zu einer gesteigerten Massenabnahme im Vergleich zu Quarzsand führen. Eine mögliche Erklärung für die verringerte Massenabnahme ist, dass sich Partikel des Abrasivmediums, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, in die Oberfläche des auch im Vergleich zu PEEK und POM weicheren Grundkörpers eingraben und dort einlagern, was zu einer Kompensation des eigentlich höher zu erwartenden Massenverlustes führt. Dies könnte auch die nur verhältnismäßig geringe Steigerung der Massenabnahme bei JSC-1A im Vergleich zu Quarzsand erklären. Die scharfkantigen Partikel können sich besser in die weiche Oberfläche eingraben. Dabei besteht die Möglichkeit, dass bei fortschreitender Beanspruchung diese spröden und stark unregelmäßig geformten Partikel zerbrechen und damit nicht mehr der gesamte Partikel herausgelöst wird. Dies würde zusätzlich die zuvor beschriebene Einlagerung des Abrasivmediums verstärken.

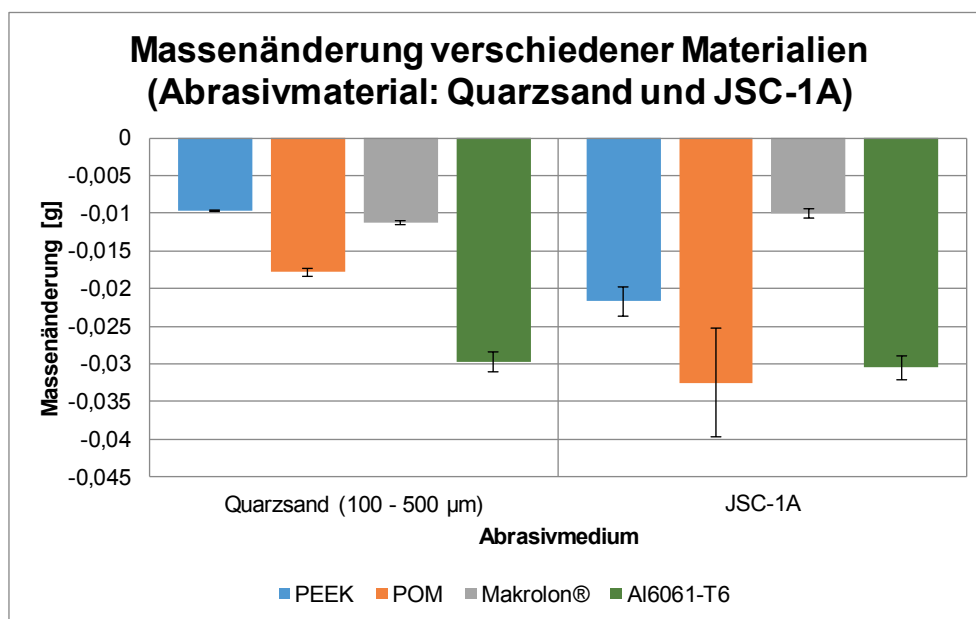


Abb. 69: Massenänderung verschiedener Materialien durch Quarzsand und JSC-1A

Abb. 69 zeigt die verschleißbedingte Massenabnahme der zuvor untersuchten Kunststoffe und von Al6061-T6 durch Quarzsand und JSC-1A unter Laborbedingungen. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurden die Versuche nach 435 Umdrehungen der Reibräder beendet, was einer Versuchsdauer von circa 15 Minuten entspricht. Die verkürzte Versuchszeit wurde im Hinblick auf die Belegungsdauern der Thermalvakuumkammer gewählt, die für die im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuche verwendet wurde. Die in Abb. 69 dargestellten Ergebnisse zeigen ein sehr ähnliches Bild wie die zuvor durchgeführten Versuche. Auch hier zeigen die drei Polymere bei Quarzsand einen

signifikant geringeren Verschleiß als die Aluminiumlegierung Al6061-T6. Für POM ist bei Quarzsand ebenfalls, im Vergleich mit den beiden anderen Kunststoffen, der größte Massenverlust zu verzeichnen. Für PEEK und Makrolon® ergeben sich mit Quarzsand wieder sehr ähnliche Massenabnahmen, wobei bei den hier dargestellten Resultaten der Massenverlust für PEEK etwas geringer ist. Für den Vergleich zwischen Quarzsand und JSC-1A als Abrasivmedium zeigt sich ebenfalls ein sehr ähnliches Verhalten der untersuchten Polymere. Bei PEEK und POM kommt es mit JSC-1A zu einer signifikanten Steigerung des Massenverlustes, wohingegen bei der Massenabnahme von Makrolon® wieder nahezu kaum ein Einfluss hinsichtlich des jeweils verwendeten Abrasivmediums feststellbar ist. JSC-1A führt hier sogar zu einem leichten Rückgang der Massenabnahme. Da sämtliche Versuchsparameter, mit Ausnahme der Versuchszeit, unverändert gehalten wurden, können für die untersuchten Polymere weiterhin die zuvor bereits beschriebenen Annahmen für die Erklärung des Verhaltens herangezogen werden. Im Hinblick auf das Verhalten von Al6061-T6 mit den beiden Verschleißmedien Quarzsand und JSC-1A beschreibt Kobrick [24] in seiner Arbeit ein sehr ähnliches Verhalten. Kobrick [24] berichtet von einem vergleichbaren auftretenden Verschleiß für Quarzsand und Mondanalogmaterial bei Al6061-T6 und PMMA, welches in dieser Studie nicht untersucht wurde. Dabei ist zu erwähnen, dass Kobrick [24] in seiner Arbeit neben den feinen Fraktionen von JSC-1A auch ein weiteres Mondanalogmaterial, NU-LHT-2M, untersucht hat.

Abb. 70 zeigt die Massenänderung der untersuchten Polymere PEEK, POM und Makrolon® sowie der Aluminiumlegierung Al6061-T6 unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Die Messung der Massenänderungen erfolgte dabei jeweils nach 435 Umdrehungen der Reibräder. Als Abrasivmedium wurde wieder das Mondanalogmaterial JSC-1A verwendet. Die Darstellung der Massenänderung und der Fehlerbalken im Diagramm entspricht dabei ebenfalls den bereits zuvor eingeführten Konventionen. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass es für sämtliche Kunststoffe, unabhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen, zu einer Massenabnahme kommt. PEEK und POM zeigen dabei die größte Massenabnahme unter Laborbedingungen. Im Vakuum sinkt die Massenabnahme für beide Polymere bei positiven Temperaturen signifikant ab. Hierbei erreicht die Massenabnahme für PEEK bei +50°C einen etwas höheren Wert im Vergleich zu +20°C, wohingegen sie für POM in etwa konstant bleibt. Bei negativen Temperaturen im Vakuum kommt es bei beiden Kunststoffen zu einem deutlichen Anstieg der Massenabnahme im Vergleich zu den anderen unter Vakuum gemessenen Werten. Für PEEK wird teilweise ein mehr als doppelt so hoher Wert erreicht. Auch bei Makrolon® kommt es unter Vakuumbedingungen bei

positiven Temperaturen zu einem Absinken der Massenabnahme im Vergleich zu den Ergebnissen unter Laborbedingungen, wobei der Wert bei +50°C annähernd dem Wert unter Laborbedingungen entspricht. Anders als bei den beiden anderen Kunststoffen findet jedoch bei -55°C unter Vakuum der größte Massenverlust statt. Im Vergleich untereinander erfährt POM grundsätzlich den mit Abstand größten Massenverlust, wohingegen Makrolon®, außer bei -55°C unter Vakuum, den geringsten Massenverlust aufweist. Hier ergeben sich für PEEK und Makrolon® annähernd die gleichen Werte.

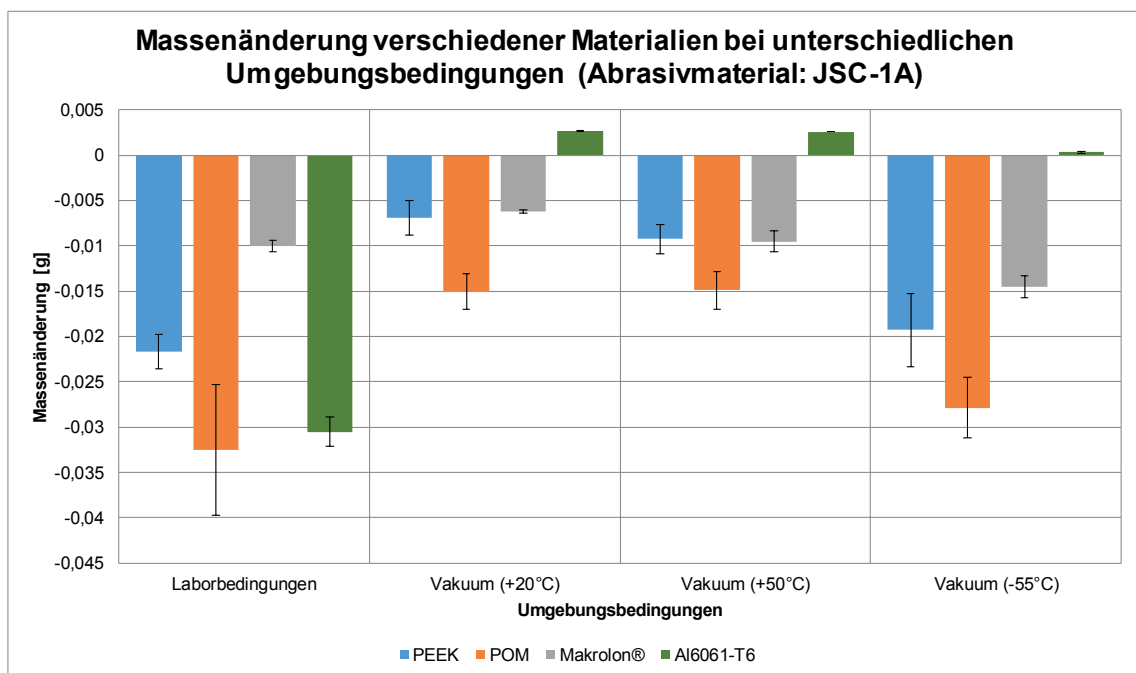


Abb. 70: Massenänderung verschiedener Materialien durch JSC-1A bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

Alle drei Kunststoffe zeigen einen annähernd ähnlichen Trend des Verschleißverhaltens für die verschiedenen untersuchten Umgebungsbedingungen. Einzige Ausnahme bildet POM bei +50°C unter Vakuum. Hier kommt es, anders als bei den beiden anderen Kunststoffen, zu keinem nennenswerten Anstieg der Massenabnahme im Vergleich zu +20°C unter Vakuumbedingungen. Die Reihung der Kunststoffe hinsichtlich Massenabnahme ist ebenfalls näherungsweise umgebungsunabhängig. Das Auftreten eines ähnlichen Trends hinsichtlich des Verschleißverhaltens unterschiedlicher Kunststoffe bei verschiedenen Umgebungsbedingungen wird auch von Purschke [64] berichtet.

Der Rückgang der Massenabnahme der PEEK-Proben bei gleicher Umgebungstemperatur unter Vakuumbedingungen korreliert mit den Erkenntnissen von [65] und [66]. McCook et al. [65] führen als mögliche Erklärung für einen geringeren Verschleiß unter

Vakuumbedingungen das Fehlen von Wasserdampf in der Atmosphäre an. Kunststoffe neigen aufgrund geringerer Festigkeit bei höheren Temperaturen zu stärkerem Verschleiß [56]. Dies zeigt auch der leichte Anstieg des Verschleißes zwischen +20°C und +50°C unter Vakuum. Mit sinkender Temperatur werden Kunststoffe zunehmend spröder [67], wodurch Mikrobrechen begünstigt wird. Darauf deutet auch der erhöhte Verschleiß aller drei Polymere bei -55°C unter Vakuumbedingungen hin.

Al6061-T6 zeigt unter Laborbedingungen eine signifikante Massenabnahme, die im Bereich von POM liegt. Für sämtliche Messungen unter Vakuum ergibt sich jedoch eine Massenzunahme, die für positive Temperaturen ungefähr gleich groß ist und für -55°C nachweisbar, jedoch nur in einem sehr geringen Maß vorhanden ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Massenzunahme somit unabhängig von der Umgebungstemperatur in allen Versuchen unter Vakuumbedingungen auftritt. Da alle sonstigen Versuchsparameter unverändert gehalten wurden, ist die Erklärung für dieses Verhalten mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Vakuumbedingungen begründet. Der Unterschied zu den Versuchen unter Laborbedingungen liegt somit in der Abwesenheit von Umgebungsluft beziehungsweise in der Abwesenheit von Sauerstoff. Unter Laborbedingungen sind metallische Oberflächen von einer Oxidschicht überzogen [56], [57], die neben anderen Schichten zur äußeren Grenzschicht gezählt wird [56]. Eine mögliche Erklärung für die Massenzunahme von Al6061-T6 unter Vakuumbedingungen ist somit, dass die harte und spröde Oxidschicht durch das Verschleißmedium abgetragen wird und sich, aufgrund des Fehlens von Sauerstoff, nicht wieder aufbauen kann. Der im Gegensatz zur Oxidschicht weichere Grundkörper ist somit, anders als unter Laborbedingungen, nach kürzester Zeit permanent und direkt dem Abrasivmedium ausgesetzt. Der weichere Grundkörper erleichtert somit das Eingraben und Einlagern der Mondanalogmaterialpartikel im Vergleich zu den Versuchen unter Laborbedingungen. Aufgrund dieser verstärkten Einlagerung von Partikeln und Partikelbruchstücken wird der Massenabtrag kompensiert und es kommt zu einer, wenn auch teilweise nur sehr geringen, Massenzunahme.

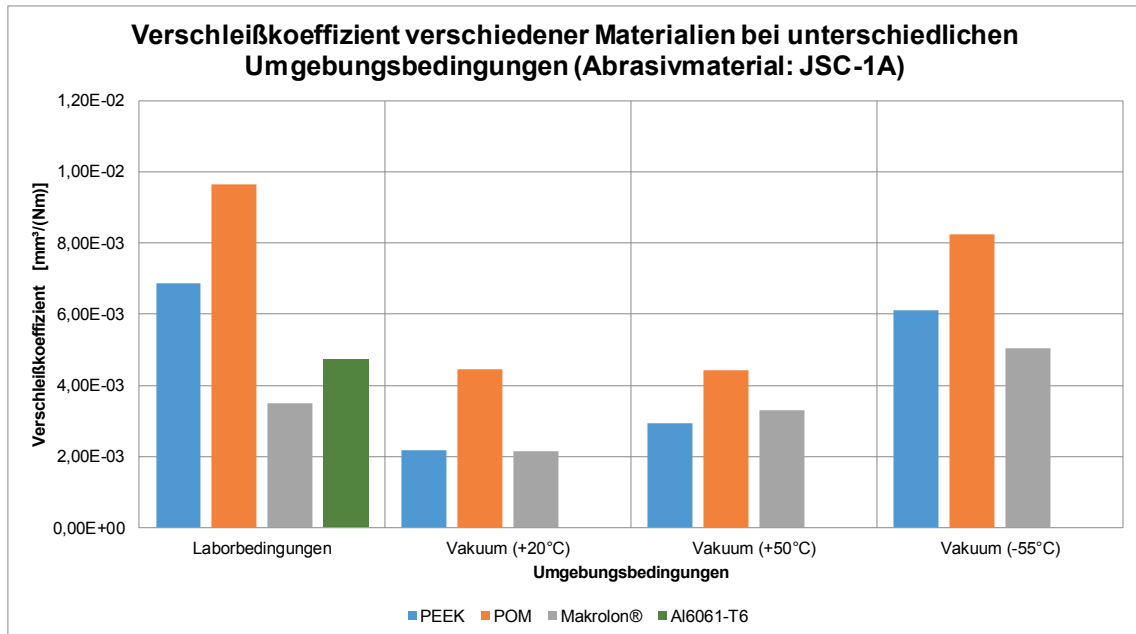


Abb. 71: Verschleißkoeffizient verschiedener Materialien für JSC-1A bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

Abb. 71 zeigt den Verschleißkoeffizienten der untersuchten Materialien mit JSC-1A als Abrasivmedium für unterschiedliche Umgebungsbedingungen. Der Verschleißkoeffizient wurde hierbei, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, berechnet. Für die Berechnung des Verschleißvolumens wurde der Mittelwert der beiden Proben verwendet. Für Al6061-T6 wurde lediglich der Verschleißkoeffizient bei Laborbedingungen angegeben, da es unter Vakuum zu einer Massenzunahme kommt und somit kein Verschleißvolumen ermittelt werden kann. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass der Verschleißkoeffizient für sämtliche Materialien deutlich über einem Wert von $10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ liegt. Wie zuvor beschrieben, ist deshalb nach [56] von schwerem Verschleiß auszugehen. Dies deckt sich mit den bei Laborbedingungen gewonnenen Erkenntnissen von Kobrick [24]. Unter Verwendung der von Kobrick beschriebenen Versuchsparametern und Ergebnissen ergibt sich dort für die verschiedenen Mondanalogmaterialien ebenfalls ein Verschleißkoeffizient, der für die untersuchte Aluminiumlegierung und PMMA auf schweren Verschleiß hindeutet.

3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist es den Abrasivverschleiß ausgewählter technischer Oberflächen durch Regolithpartikel unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zu charakterisieren. Für die Untersuchungen wurde dazu das Mondanalogmaterial JSC-1A verwendet, um die unter realen Bedingungen vorkommenden

Regolithpartikel im Labor zu simulieren. Weiterhin wurde Quarzsand als Vergleichsmaterial für den Abrasivverschleiß eingesetzt. Für die Versuche wurde der am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik entwickelte Reibradteststand in der Konfiguration mit Aluminium-Reibrädern eingesetzt. Für die experimentellen Untersuchungen wurden die Probenmaterialien Makrolon®, PEEK, POM und zwei Aluminiumlegierungen ausgewählt. Der Verschleiß der Materialien wurde dabei durch deren Massenänderung bestimmt. Zusätzlich wurde für JSC-1A unter verschiedenen Umgebungsbedingungen der Verschleißkoeffizient für ausgewählte Probenmaterialien berechnet. Die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen zeigen, dass es durch Mondanalogmaterial zu signifikanten Degradation der Materialien durch Abrasivverschleiß kommt. Im Folgenden sind die Kernaussagen der Untersuchungen zum Abrasivverschleiß von technischen Oberflächen noch einmal zusammengefasst:

- Durch das Mondanalogmaterial JSC-1A tritt bei allen untersuchten technischen Oberflächen unter Laborbedingungen eine signifikante verschleißbedingte Degradation auf.
- Für die untersuchten technischen Oberflächen besteht eine deutliche Abhängigkeit des auftretenden Abrasivverschleißes von den Umgebungsbedingungen.
- Bei allen untersuchten Polymeren kommt es zu einer signifikanten Massenabnahme bei der Verwendung von JSC-1A unabhängig von den Umgebungsbedingungen, wohingegen für Al6061-T6 eine Massenzunahme im Vakuum zu verzeichnen ist.
- Als Grund für die Massenzunahme wird die Einlagerung von Partikeln des Mondanalogmaterials in der Oberfläche vermutet. Dies ist, wenn auch in geringerem Maße, bei den Polymeren nicht auszuschließen.
- Der im Falle einer Massenabnahme berechnete Verschleißkoeffizient deutet bei allen Materialien nach der Definition von Czichos et al. [56] auf schweren Verschleiß hin.

Die oben dargelegten Ergebnisse der durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass das Vorhandensein von lunaren Regolithpartikeln zu signifikantem Abrasivverschleiß von technischen Oberflächen führen kann. Damit wird gleichzeitig die Relevanz solcher Untersuchungen für zukünftige Missionen und die Notwendigkeit weiterführender Studien zu diesem Thema unterstrichen.

Ein möglicher Startpunkt für weitere Untersuchungen wäre hierbei die Ausweitung der Materialauswahl. In der vorliegenden Studie wurden lediglich Aluminiumlegierungen betrachtet. Durch die Erweiterung der Versuche auf zusätzliche Metalle und Metalllegierungen könnte einerseits ein breiteres Feld an relevanten Werkstoffen charakterisiert werden. Andererseits könnte identifiziert werden, ob die unter Vakuum auftretende Anomalie der Massensteigerung auch bei anderen Legierungen auftritt. Darüber hinaus könnte die Untersuchung faserverstärkter Kunststoffe wichtige Einblicke in deren Einsatzmöglichkeiten geben.

Der auftretende Verschleiß hängt, wie eingangs dargelegt, zusätzlich von der Materialkombination von Grund- und Gegenkörper ab. Damit wäre ein weiterer Ansatzpunkt für experimentelle Untersuchungen gezielt Materialkombinationen zu untersuchen, die in zukünftigen technischen Systemen eingesetzt werden sollen. Dabei sollte den jeweiligen späteren Einsatzbedingungen hinsichtlich Vakuum, Temperaturbereich und idealerweise Strahlung direkt Rechnung getragen werden. In diesem Zusammenhang erscheinen auch allgemeine Untersuchungen bei deutlich höheren Temperaturen, wie sie bei direkter Sonneneinstrahlung auf dem Mond auftreten können, sinnvoll, da somit zum Beispiel eine Aussage möglich ist inwieweit sich Polymere für diese Umgebung generell eignen.

4 Verschleißverhalten von Polymerzahnradern²⁹

Bereits im vorigen Kapitel wurde gezeigt, dass durch das Vorhandensein von JSC-1A mit einem signifikanten Verschleiß für Polymere zu rechnen ist. Dieses Kapitel behandelt daran anschließend den Abrasivverschleiß von ausgewählten Polymerzahnradern, hervorgerufen durch das Mondanalogmaterial JSC-1A, bei verschiedenen Umgebungsbedingungen.

Im Kapitel 3.1 wurden bereits eingehend die Grundlagen für das Verständnis des Abrasivverschleißes, insbesondere beim Vorhandensein von beziehungsweise ausgelöst durch Drittpartikel behandelt. Deshalb beschränkt sich das folgende Kapitel 4.1 auf die Beschreibung von Anwendungsmöglichkeiten von Zahnradern an Beispielen aus der Raumfahrt, die Grundlagen zum Verständnis der Vor- und Nachteile beim Einsatz von Polymerzahnradern sowie die Verschleißberechnung von Zahnradern und hierbei im Speziellen auf den Verschleiß von Stirnrädern. Im Anschluss daran wird in Kapitel 4.2 der für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen verwendete und am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der Technischen Universität München entwickelte Zahnradteststand beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf die für die Untersuchungen mit JSC-1A notwendigen Anpassungen und Weiterentwicklungen des Teststandes eingegangen. In Kapitel 4.3 werden zuerst die Versuchsdurchführung, die verwendeten Stirnräder und die Ermittlung der Verschleißgrößen behandelt und erläutert. Daran anschließend werden die mit dem Teststand gewonnenen Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beschrieben und diskutiert. Kapitel 4 schließt in Abschnitt 4.4 mit einer Zusammenfassung der Erkenntnisse und einem Ausblick auf weitere mögliche Forschungsthemen.

4.1 Grundlagen zum abrasiven Verschleiß von Zahnradern

Getriebe kommen in einer Vielzahl terrestrischer Systeme zur Anwendung. Hierbei zählen Zahnradgetriebe zur am häufigsten verwendeten Getriebeart [68]. Zahnradgetriebe besitzen dabei einen hohen Wirkungsgrad und kombinieren diesen mit einer kompakten Bauweise [69]. Innerhalb der Gruppe der Zahnradgetriebe werden Stirnradgetriebe am häufigsten eingesetzt [64]. Hinsichtlich der Verzahnungsgeometrie überwiegt die

²⁹ Dieses Kapitel basiert zum großen Teil auf einer erweiterten und überarbeiteten Version der durch den Autor betreuten Masterarbeit von Frau Kerstin Roder [85] und auf der vom Autor zusammen mit Frau Roder veröffentlichten Publikation [95]. Aus der jeweiligen Arbeit beziehungsweise Veröffentlichung entnommenen Teile sind als solche im Folgenden kenntlich gemacht.

Evolventenverzahnung. Sie zeichnet sich durch eine einfache und kostengünstige Fertigung aus und ist wenig anfällig gegenüber Änderungen des Achsabstandes [63], [64]. Nach Purschke [64] kommen deshalb geradzahnte Stirnräder mit Evolventenverzahnung am häufigsten zum Einsatz.

Auch in der Raumfahrt finden Zahnradgetriebe vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. So zählen zum Beispiel Zahnradgetriebe zu den grundlegenden Komponenten von Pointing-Mechanismen [64]. Die gängigsten in der Raumfahrt eingesetzten Zahnradgetriebe sind dabei Stirnradgetriebe [64]. Einige Beispiele für den Einsatz von Stirnrädern in der Raumfahrt sind die Fokuseinheit der Kepler Mission [70], der Pointing-Mechanismus des OFFEQ-Experimentalsatelliten [71], der XAA Pointing-Mechanismus [72], der Bi-Axial Solar Array Drive Mechanism (BSADM) [73], oder die ursprünglich geplante Zoomeinheit für den MSL (Mars Science Laboratory) Rover [74]. Weitere Beispiele für den Einsatz von Zahnradgetrieben, speziell in bodengebundenen Systemen auf planetaren Oberflächen, sind das Apollo 15 Lunar Roving Vehicle [75], die Mars Exploration Rover (MER) [76], [77], die Mars-Lander Pathfinder [78] sowie die gescheiterte Sonde Beagle 2 [79] oder der Roboterarm des geplanten Mars Surveyor 2001 Landers [80].

Die oben genannten Beispiele verdeutlichen die vielseitigen Einsatzbereiche konventioneller Zahnradgetriebe in der Raumfahrt. In terrestrischen Anwendungen kommen Polymerzahnäder bereits in den verschiedensten Bereichen vor, wie der Kraftfahrzeug-, der Medizin- oder der Automatisierungstechnik [63], um nur einige Beispiele zu nennen, wohingegen in Raumfahrtanwendungen primär metallische Zahnradpaarungen dominieren. Jedoch zeigt das Beispiel des von Surrey Satellite Technology Ltd's (SSTL) hergestellten Antennen Pointing-Mechanismus [81], in dem ein aus POM gefertigtes Zahnrad ohne zusätzliche Schmierung zum Einsatz kommt, dass es hier erste Schritte hin zur Verwendung von Polymerzahnädern gibt. Der zuvor genannte Punkt des Betriebes ohne Schmiermittel stellt einen entscheidenden Vorteil von Kunststoffzahnädern in Weltraumanwendungen dar, da zum einen zusätzliches Gewicht durch notwendige konstruktive Maßnahmen für die Verwendung des Schmiermittels sowie durch das Schmiermittel selbst entsteht. Zum anderen können bewegliche Teile, die auf die Schmierung angewiesen sind, sowie die Schmierung selbst zumeist nicht redundant ausgelegt werden, wodurch ein Versagen der Schmierung die gesamte Mission gefährden kann und als Single Point of Failure anzusehen ist [64]. Neben der hohen Verschleißfestigkeit bei Trockenlauf [82] bieten Kunststoffzahnäder jedoch noch weitere vorteilhafte Eigenschaften. Zu diesen zählen unter

anderem: ein wartungsfreier Einsatz, Schwingungsdämpfung, Korrosionsbeständigkeit, ein geräuscharmer Lauf und ein niedriges Massenträgheitsmoment aufgrund des geringen Gewichtes der Zahnräder sowie eine kostengünstige Fertigung [82].

Neben dem geringeren Gewicht der Zahnräder könnten speziell die Trockenlaufeigenschaften von Polymerzahnradern für planetare Missionen von entscheidendem Vorteil sein. Einerseits kann auf den etwaigen nötigen Austausch von Schmiermittel verzichtet werden, der insbesondere bei robotischen Langzeitmissionen eine große Herausforderung darstellt. Andererseits kann das Eindringen von Fremdpartikeln in das Schmiermittel zu einer Art Schleifpaste führen [63]. Dieser auch bei terrestrischen Systemen vorhandene Effekt dürfte zum Beispiel auf der Mondoberfläche oder ähnlichen planetaren Oberflächen, aufgrund des dort vorhandenen feinkörnigen und hochgradig abrasiven Bodenmaterials, noch verstärkt werden, da, wie zuvor erwähnt, die Möglichkeit eines häufigen Austauschs des Schmiermittels nicht grundsätzlich als gegeben anzusehen ist. Da ein vollständiges Abhalten dieser Partikel jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach nicht möglich ist, und somit auch trockenlaufende Zahnräder diesen ausgesetzt sind, soll der dadurch auftretende Verschleiß untersucht werden. Dies ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da Verschleiß den überwiegenden Versagensmechanismus für trockenlaufende Zahnräder darstellt [83].

Ähnlich wie im vorigen Kapitel 3 beschrieben, lässt sich auch für Zahnräder ein Verschleißkoeffizient k_w berechnen. Dieser berechnet sich nach VDI 2736 [84] mit Hilfe der Massenabnahme m_w aufgrund des Verschleißes zu:

$$k_w = \frac{m_w}{2 \cdot \pi \cdot M_T \cdot N_L \cdot H_V \cdot \rho} \quad (4-1)$$

Aus Gründen der Übersicht werden sämtliche in Gleichung (4–1) und den folgenden Gleichungen (entnommen aus [64]) vorkommenden Variablen gesamtheitlich in Tab. 11 beschrieben.

Tab. 11: Übersicht der verwendeten Variablen

Variablenname	Variable	Einheit
Verschleißkoeffizient	k_w	mm^3/Nm
Massenabnahme	m_w	g
Drehmoment	M_T	Nm
Anzahl der Umdrehungen	N_L	-
Zahnverlustfaktor	H_V	-
Dichte des Materials	ρ	g/cm^3
Zähnezahl Ritzel bzw. Rad	$Z_{1/2}$	-
Schrägungswinkel	β	$^\circ$
Profilüberdeckung	ε_α	-
Teilprofilüberdeckung Ritzel	$\varepsilon_{\alpha 1}$	-
Teilprofilüberdeckung Rad	$\varepsilon_{\alpha 2}$	-
Kopfkreisdurchmesser Ritzel	d_{a1}	mm
Grundkreisdurchmesser Ritzel	d_{b1}	mm
Kopfkreisdurchmesser Rad	d_{a2}	mm
Grundkreisdurchmesser Rad	d_{b2}	mm
Achsabstand	a	mm
Betriebseingriffswinkel	α_w	$^\circ$
Eingriffsteilung	p_e	mm
Modul	m	mm
Eingriffswinkel	α	$^\circ$
Nullachsabstand	a_d	mm
Wälzkreisdurchmesser Ritzel	d_{w1}	mm
Wälzkreisdurchmesser Rad	d_{w2}	mm
Zahnfläche vor dem Versuch	A_{t1}	mm^2
Zahnfläche nach dem Versuch	A_{t2}	mm^2
Zahnbreite	b	mm

Der in Gleichung (4-1) verwendete Zahnverlustfaktor H_V berechnet sich dabei wie folgt:

$$H_V = \frac{\pi \cdot \left(\frac{z_2}{z_1} + 1\right)}{z_1 \cdot \frac{z_2}{z_1} \cdot \cos \beta} \cdot (1 - \varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\alpha 1}^2 + \varepsilon_{\alpha 2}^2) \quad (4-2)$$

Mit der Profilüberdeckung ε_α :

$$\varepsilon_\alpha = \left(\sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b1}}{2}\right)^2} + \frac{z_2}{|z_2|} \cdot \sqrt{\left(\frac{d_{a2}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b2}}{2}\right)^2} - a \cdot \sin \alpha_w \right) \cdot \frac{1}{p_e} \quad (4-3)$$

und der Teilprofilüberdeckung $\varepsilon_{\alpha 1}$:

$$\varepsilon_{\alpha 1} = \left(\sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b1}}{2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d_{w1}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b1}}{2}\right)^2} \right) \cdot \frac{1}{p_e} \quad (4-4)$$

sowie der Teilprofilüberdeckung $\varepsilon_{\alpha 2}$:

$$\varepsilon_{\alpha 2} = \left(\sqrt{\left(\frac{d_{a2}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b2}}{2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d_{w2}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b2}}{2}\right)^2} \right) \cdot \frac{z_2}{|z_2| \cdot p_e} \quad (4-5)$$

Die Eingriffsteilung p_e ist dabei wie folgt definiert:

$$p_e = m \cdot \pi \cdot \cos \alpha \quad (4-6)$$

Der Betriebseingriffswinkel α_w berechnet sich mit der folgenden Formel:

$$\cos \alpha_w = \frac{a_d}{a} \cdot \cos \alpha \quad (4-7)$$

Mit dem Nullachsabstand a_d :

$$a_d = \frac{z_1 \cdot m + z_2 \cdot m}{2} \quad (4-8)$$

Bei den unterschiedlichen Durchmessern berechnen sich die Kopfkreisdurchmesser für Ritzel d_{a1} und Rad d_{a2} :

$$d_{a1/2} = z_{1/2} \cdot m + 2 \cdot m \quad (4-9)$$

und die Grundkreisdurchmesser für Ritzel d_{b1} und Rad d_{b2} :

$$d_{b1/2} = z_{1/2} \cdot m \cdot \cos \alpha \quad (4-10)$$

sowie die Wälzkreisdurchmesser für Ritzel d_{w1} und Rad d_{w2} :

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot a}{1 + \frac{z_2}{z_1}} \quad (4-11)$$

$$d_{w2} = \frac{2 \cdot a}{1 + \frac{z_1}{z_2}} \quad (4-12)$$

Nach Puschke [64] kann für die in der Berechnung des Verschleißkoeffizienten verwendete Massenabnahme in Gleichung (4-1) die folgende Formel angewendet werden:

$$m_w = (A_{t1} - A_{t2}) \cdot z \cdot b \cdot \rho \quad (4-13)$$

Damit berechnet sich der Verschleißkoeffizient in Abhängigkeit der Flächenänderung des Zahnes wie folgt:

$$k_w = \frac{(A_{t1} - A_{t2}) \cdot z \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot M_T \cdot N_L \cdot H_V} \quad (4-14)$$

4.2 Der Zahnradteststand³⁰

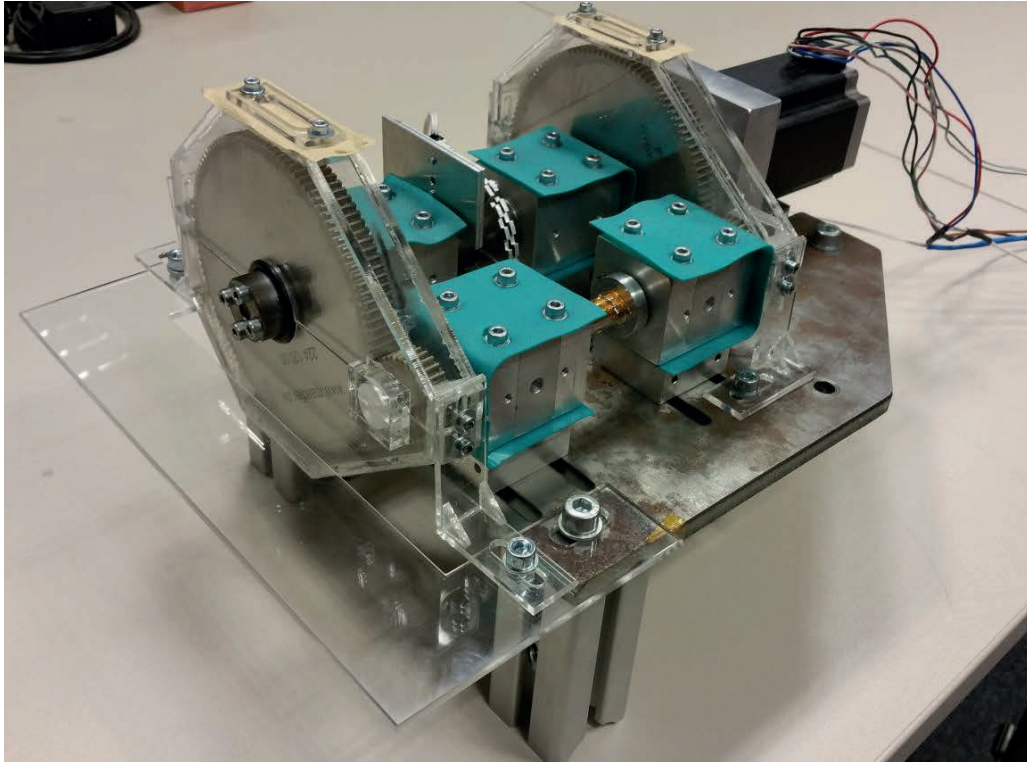


Abb. 72: Der Zahnradteststand mit Gehäuse

Für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen des Abrasivverschleißes von Polymer-Zahnradern mit Mondanalogmaterial wurde der in Abb. 72 dargestellte Zahnradteststand verwendet. Der abgebildete Teststand ist dabei eine Weiterentwicklung des bereits von Purschke [64] verwendeten Teststandes, der für die Untersuchung von Polymerzahnradern eingesetzt wurde. Der Teststand ist aus zwei identischen Stahlzahnrad-Kunststoff-Zahnradpaarungen aufgebaut. Der Achsabstand beträgt 75,3 mm. Hierbei besitzen die Stahlstirnräder einen Durchmesser von 120 mm und die zu testenden Polymerzahnradern einen Durchmesser von 30 mm. Eine genauere Beschreibung der Zahnradparameter ist dem nachfolgenden Kapitel 4.3.1 zu entnehmen. Die Verbindung der Stahlzahnradern erfolgt hierbei über eine Verspannungskupplung (Abb. 72 oben mittig), mit Hilfe derer durch axiale Verdrehung der Zahnradern zueinander eine Vorspannung und damit ein Moment auf die Welle aufgebracht werden kann. Das aufgebrachte Moment beträgt

³⁰ Die Beschreibung des Testaufbaus basiert auf dem in der durch den Autor betreuten Masterarbeit von Frau Kerstin Roder [85] verwendeten Versuchstand. Die Beschreibung des Teststandes basiert des Weiteren auf einer überarbeiteten Version, der bereits durch den Autor veröffentlichten Teststandbeschreibung in der Publikation [94]. Die Abbildungen in diesem Kapitel sind in überarbeiteter Form aus der Masterarbeit von Frau Roder [85] sowie der Publikation [95] entnommen.

hierbei für den Betrieb des Teststandes 0,68 Nm. Die beiden Polymerzahnräder sind im Testbetrieb und für das Aufbringen der Vorspannung, über eine Welle verbunden. Der Antrieb des Teststandes erfolgt mit einem Nanotec 4,2A Stepermotor über das in Abb. 72 oben rechts erkennbare Stahlzahnrad. Zur Bestimmung der Gesamtumdrehungen des Zahnradteststandes während eines Testdurchlaufs, ist der Teststand mit einem Umdrehungszähler ausgestattet (siehe Abb. 72 mittig neben der Verspannungskupplung).

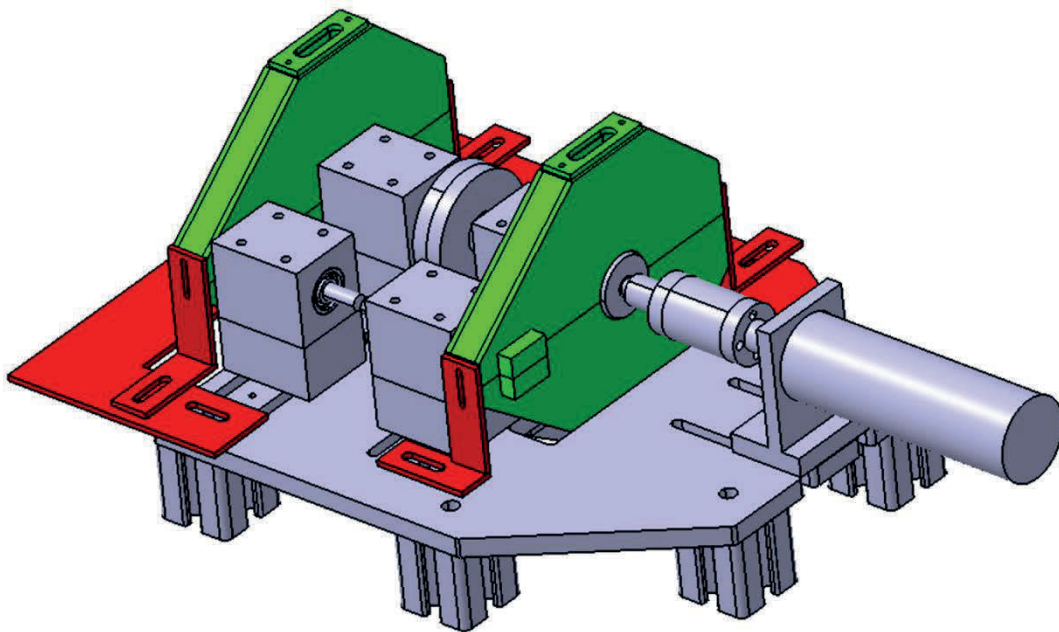


Abb. 73: CAD-Darstellung des Zahnradteststandes (neue Gehäuseteile farbig dargestellt) mit Änderungen nach [85]

Für den Betrieb des Teststandes in der Thermalvakuumkammer des Lehrstuhls für Raumfahrttechnik, unter Verwendung des Mondanalogmaterials JSC-1A, wurde der Teststand zusätzlich mit einem Gehäuse ausgestattet, das die beiden Zahnradpaarungen separat umschließt. Das Gehäuse dient primär dazu ein Austreten des Mondanalogmaterials aus dem Testaufbau zu verhindern und somit eine Verschmutzung der Thermalvakuumkammer zu vermeiden. Dabei ist das Gehäuse so konstruiert, dass es weder den Betrieb des Teststandes behindert noch seine Charakteristiken verändert. Zusätzlich existiert eine Belüftung der Gehäuseteile, welche die Zahnräder umschließen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass dieselben Umgebungsbedingungen innerhalb des Gehäuses erzielt werden, die auch außerhalb in der Thermalvakuumkammer herrschen. So kann zum Beispiel im Vakuumbetrieb Luft nahezu ungehindert aus den Gehäusen entweichen. Hierzu befindet sich jeweils im oberen Bereich der beiden Gehäuseteile eine mit Filterpapier abdichtbare Öffnung, was einerseits einen Luftaustausch ermöglicht, jedoch

gleichzeitig ein Austreten von Mondanalogmaterialpartikeln verhindert. Die neu hinzugekommenen Gehäuseteile sind zur besseren Visualisierung in Abb. 73 farblich hervorgehoben.

4.3 Abrasivverschleiß von Polymerzahnradern durch Mondanalogmaterial

Dieser Abschnitt behandelt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Abrasivverschleiß von Polymer-Stirnrädern unter verschiedenen Umgebungsbedingungen mit dem Mondanalogmaterial JSC-1A. Dazu werden zuerst die verwendeten Stirnräder, das Abrasivmaterial und die gemessenen Verschleißgrößen beschrieben. Daran anschließend werden die Versuchsergebnisse präsentiert und daraus resultierende Erkenntnisse diskutiert.

4.3.1 Verwendete Materialien und gemessene Verschleißgrößen³¹

Für die experimentellen Untersuchungen des Verschleißes von Polymerzahnradern wurden jeweils Stirnräder aus POM (Dichte: 1,41 g/cm³) und PEEK (Dichte: 1,32 g/cm³) verwendet. Tab. 12 sind die Parameter der Polymerzahnradern sowie der beiden Edelstahlzahnradern zu entnehmen. Für die unterschiedlichen Versuche wurden jeweils neue Polymerzahnradern verwendet. Bei den Edelstahlzahnradern fand hingegen kein Austausch statt. In sämtlichen Versuchen wurden dieselben Edelstahlzahnradern verwendet.

Tab. 12: Parameter der verwendeten Stirnräder

Zahnradmaterial	Edelstahl	POM	PEEK
Zähnezahl z [-]	120	30	30
Modul m [mm]	1	1	1
Referenzdurchmesser d [mm]	120	30	30
Zahnbreite b [mm]	10	7	7
Eingriffswinkel α [°]	20	20	20
Schrägungswinkel β [°]	0	0	0

Als Abrasivmedium wurde das bereits in Kapitel 2.2 beschriebene Mondanalogmaterial JSC-1A in der Standardgrößenverteilung verwendet. Um eine möglichst gleichmäßige

³¹ Die angegebenen Versuchsparameter, die Durchführung der Versuche sowie die eingesetzten Messmethoden entsprechen den Beschreibungen in der durch den Autor betreuten Masterarbeit von Frau Kerstin Roder [85].

Verteilung des Abrasivmaterials auf den Stirnrädern zu erreichen, wurden die Edelstahlzahnräder für die Versuchsvorbereitung in JSC-1A gewälzt. Für jeden Versuch kam hierbei frisches Abrasivmaterial zum Einsatz. Lediglich bei den Vorversuchen wurde eine deutlich größere Menge JSC-1A von circa 5,5 g pro Zahnradpaarung verwendet und direkt zwischen die beiden Zahnräder eingebracht. Dies entspricht einem Worst-Case Fall, da hierbei das Stahlzahnrad zum Teil in das im Gehäuse befindliche überschüssige Mondanalogmaterial eintaucht und dieses somit stetig fördert. In der Regel sollte eine solch starke Ansammlung von Fremdpartikeln im Gehäuse durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden und im fehlerfreien Betrieb somit nicht auftreten.

Für die Charakterisierung des auftretenden Verschleißes der Polymerzahnräder werden zwei unterschiedliche Messmethoden verwendet. Bei der ersten Messmethode wird die Massenänderung der Zahnräder infolge des auftretenden Verschleißes bestimmt. Hierzu wird, wie bei den vorigen experimentellen Untersuchungen, die Masse der Proben vor und nach der Durchführung der Versuche mit einer Analysewaage (Ohaus, Discovery, DV215CD) bestimmt. Bei der zweiten Messmethode wurde eine Konturmessung der Polymerzahnräder vor und nach der Durchführung der Versuche mit einem am Lehrstuhl für Maschinenelemente der Technischen Universität München verfügbaren P40 Klingenberg Präzisionsmesszentrum durchgeführt. Für beide Messgrößen wurde der im vorigen Kapitel 4.1 beschriebene Verschleißkoeffizient jeweils separat berechnet.

4.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen und Diskussion³²

Dieser Abschnitt behandelt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen des Abrasivverschleißes von Polymerzahnradern bei der Verwendung von JSC-1A als Abrasivmedium unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Unabhängig von den Versuchsbedingungen wurden die Zahnräder vor den jeweiligen Tests mit 0,68 Nm gegeneinander verspannt. Dies dient dazu den auftretenden Verschleiß einheitlich für alle Versuche zu verstärken, um die Versuchsdauern, bis ein nennenswert messbarer Verschleiß auftritt, zu verkürzen und damit die Belegungsauern der Thermalvakuumkammer innerhalb eines vertretbaren Rahmens zu halten.

³² Dieses Kapitel ist eine überarbeitete Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse, basierend auf den Versuchsdaten, die in der durch den Autor betreuten Masterarbeit von Frau Kerstin Roder [85] gewonnen wurden. Die verwendeten Bilder der Zahnräder wurden aus der Arbeit von Frau Roder entnommen.

Voruntersuchungen mit POM-Zahnrädern

Abb. 74 und Abb. 75 zeigen die Ergebnisse der Vorversuche mit POM-Zahnrädern unter Laborbedingungen. Hierbei wird zwischen treibendem und angetriebenem Polymerzahnrad unterschieden. Die angegebenen Verschleißkoeffizienten wurden hier auf der Basis der von Roder [85] ermittelten Daten für Massen- und Flächenänderung der Zahnräder berechnet. Die Versuchsdauern der beiden Versuche betragen hierbei jeweils 100.000 beziehungsweise 250.000 Umdrehungen. Wie im vorigen Kapitel bereits beschrieben, wurden für diese beiden Versuche pro Zahnradpaarung jeweils ungefähr 5,5 g des Mondanalogmaterials JSC-1A vor dem Start der Versuche direkt zwischen die Polymer- und Stahlzahnräder eingebracht.

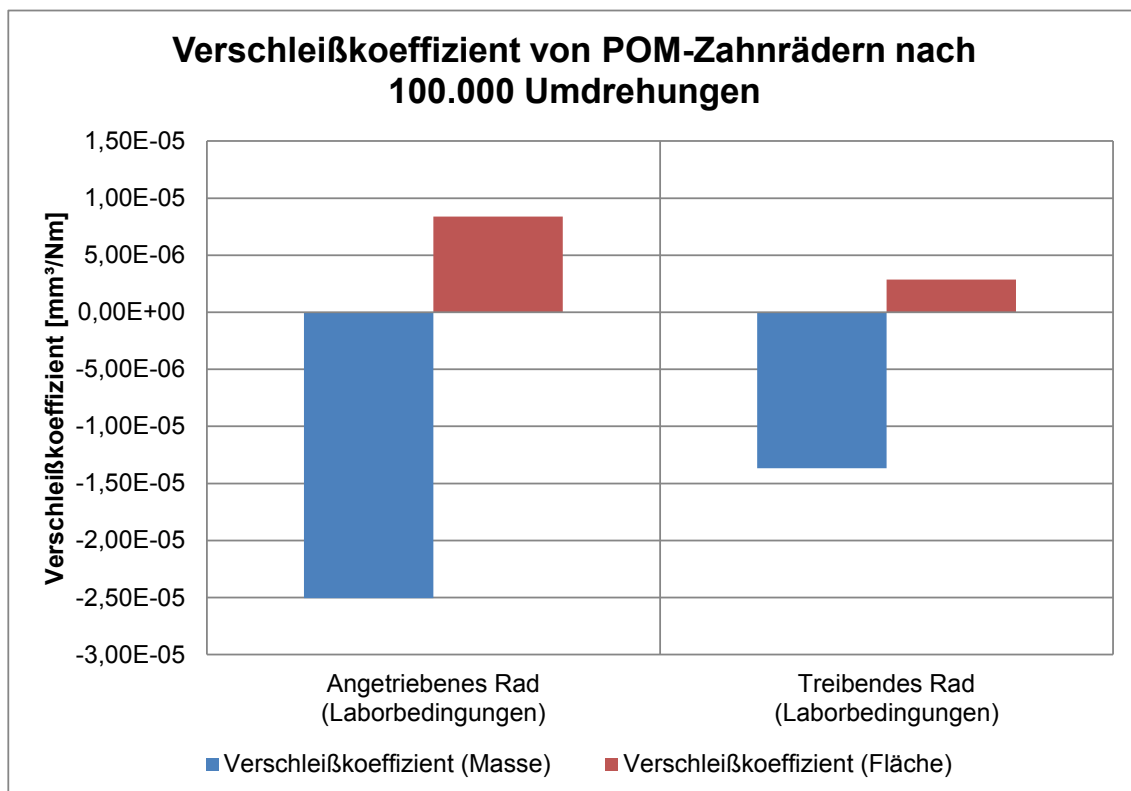


Abb. 74: Verschleißkoeffizient von POM-Zahnrädern nach 100.000 Umdrehungen bei Laborbedingungen

Verschleiß bedeutet im Allgemeinen einen Materialverlust. Daher ist die Vorzeichenkonvention zum Verschleißkoeffizienten, wie auch bereits im vorigen Kapitel beschrieben, so definiert, dass er bei auftretendem Verschleiß ein positives Vorzeichen erhält. Die in Abb. 74 dargestellten negativen Verschleißkoeffizienten deuten somit auf eine Materialanlagerung hin. Weiterhin ist dabei zu erkennen, dass es zu einem signifikanten

Unterschied hinsichtlich der verwendeten Messmethode zur Bestimmung des Verschleißes kommt. So führt die Messung der Massenänderung zu negativen Verschleißkoeffizienten, was einer Massenzunahme, in Folge der Einlagerung von JSC-1A-Partikeln in den POM-Zahnradern, entspricht. Wohingegen die Flächenmessung, nach dem Absolutwert, zu geringeren, jedoch positiven Verschleißkoeffizienten führt, was einem Materialabtrag entspricht. Eine Erklärung für diesen Unterschied kann anhand des Vorgehens der beiden Messmethoden und der darauf aufbauenden Berechnung der Verschleißkoeffizienten gefunden werden. Bei der taktilen Messmethode wird die Kontur des Zahnrades vor und nach den Versuchen bestimmt, wodurch sich die Flächenänderung ergibt. Für die Berechnung des Verschleißkoeffizienten wird dann diese Flächenänderung mit der Zahnbreite multipliziert. Dies ergibt die Volumenänderung eines Zahnes. Letztendlich wird daraus über alle Zähne des Zahnrades die gesamte Massenänderung des Zahnrades berechnet (vgl. Gleichung (4–13)). Die Gleichung zeigt, dass hierbei mehrere Annahmen zur Anwendung kommen. Zum einen wird angenommen, dass die Konturänderung über die gesamte Zahnbreite konstant ist. Weiterhin wird angenommen, dass die Konturänderung aller Zähne gleich ist. Durch die Messung mehrerer Zähne und der Mittelwertbildung über diese Messungen wird dabei der auftretende Fehler minimiert. Für den bei Purschke [64] untersuchten Verschleiß ohne Drittpartikel erscheinen diese Annahmen gerechtfertigt. Durch die Verwendung von Drittpartikeln ergeben sich jedoch einige Probleme bei dieser Methode. Die Konturmessung erfasst nur den Anteil der durch die Partikel auftretenden Änderungen, der im Bereich der Konturmessung stattgefunden hat. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Einlagerung von Partikeln weder über die gesamte Zahnbreite noch über alle Zähne homogen ist. Damit wird durch diese Messmethode nicht die Gesamtheit der Veränderungen am Zahnrad repräsentativ wiedergegeben. Zudem errechnet sich die Massenänderung der Zahnräder mittels der Dichte der Zahnräder. Haben hierbei eingelagerte Partikel und Zahnradmaterial unterschiedliche Dichten, entsteht hierdurch ein weiterer Fehler, selbst wenn die Partikelverteilung komplett homogen wäre und somit keine Auswirkung hätte. Dahingegen wird bei der direkten Bestimmung der Massenänderung die Massenänderung des gesamten Zahnrades gemessen. Somit werden auch sämtliche etwaigen eingelagerten JSC-1A-Partikel mit in die Messung einbezogen unabhängig von ihrer Verteilung über die jeweiligen Zahnflanken und Zähne.

In Abb. 75 zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Auch hier sind signifikante Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden zu erkennen. Die längere Versuchsdauer führt hier jedoch grundsätzlich zu einem Materialabtrag. Der aus dem Materialabtrag resultierende

Massenverlust ist in Summe höher als die Massenzunahme aufgrund der Einlagerung von Fremdpartikeln.

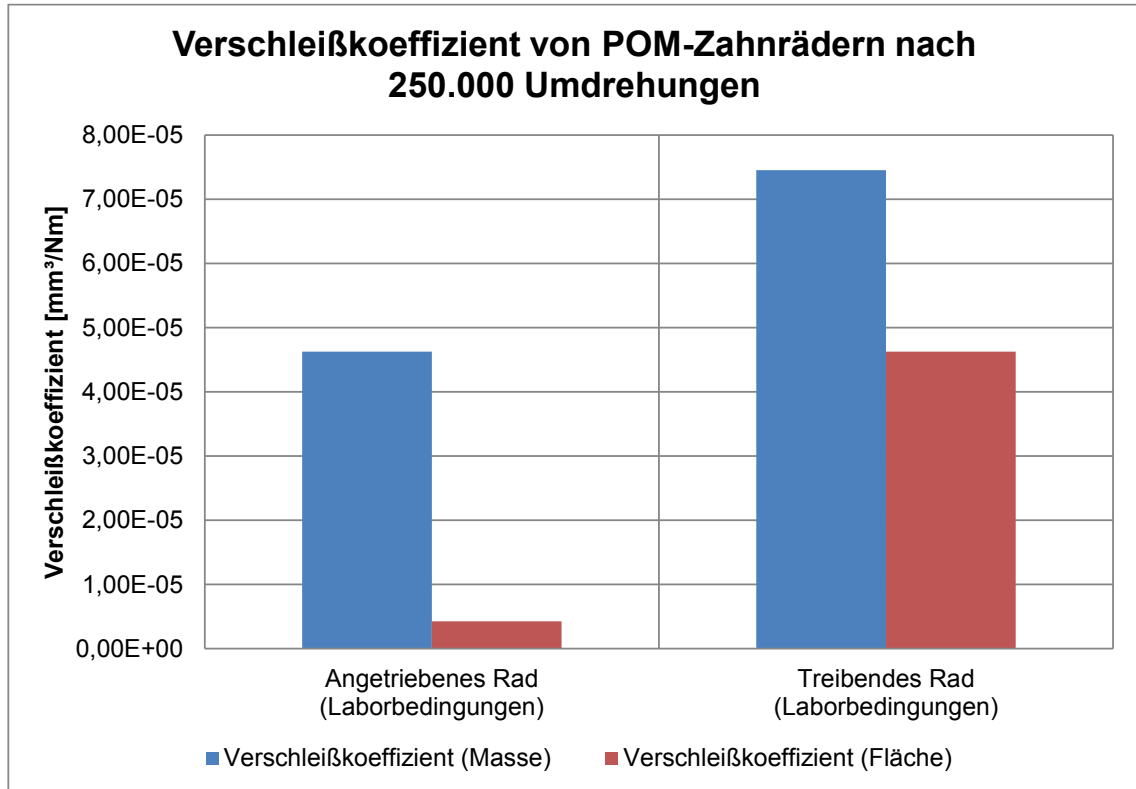


Abb. 75: Verschleißkoeffizient von POM-Zahnradern nach 250.000 Umdrehungen bei Laborbedingungen

Hauptuntersuchungen mit POM-Zahnradern

In Abb. 76 sind die Verschleißkoeffizienten der untersuchten POM-Zahnradern nach 300.000 Umdrehungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen dargestellt. Die Grundlage für die Berechnung der Verschleißkoeffizienten bilden dabei die von Roder [85] erhobenen Daten hinsichtlich Massen- und Flächenänderung der Zahnradern. Anders als bei den Vorversuchen wurde das Mondanalogmaterial nicht zwischen die Zahnradern eingebracht, sondern die Stahlzahnradern im Abrasivmedium gewälzt. Das Mondanalogmaterial haftet dabei an den Zahnflanken. Hierdurch wird zwar insgesamt eine geringere Menge an JSC-1A verwendet, jedoch kommt es zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Abrasivmediums. Gleichzeitig kommt es zu keiner Anhäufung im Gehäuse und Nachförderung von JSC-1A was, wie zuvor beschrieben, einem eher selten auftretenden Worst-Case Fall entspricht.

Wie Abb. 76 zu entnehmen, kommt es auch hier im Allgemeinen zu einer deutlichen Differenz des Verschleißkoeffizienten je nach verwendeter Messmethode. Lediglich bei

+50° unter Vakuumbedingungen sind die beiden Verschleißkoeffizienten annähernd gleich. Der Vergleich der berechneten Verschleißkoeffizienten bei Laborbedingungen zeigt, dass trotz der längeren Versuchsdauern insgesamt geringere Werte im Vergleich zu den Untersuchungen nach 250.000 Umdrehungen erzielt werden. Bei 300.000 Umdrehungen werden hierbei negative Werte für den Massen-Verschleißkoeffizienten erzielt, was wie oben beschrieben, einer deutlichen Einlagerung von JSC-1A-Partikeln entspricht. Dies erklärt sich durch die geringere Menge abrasiver Partikel, wodurch der verstärkte Abrieb unterbleibt, der bei 250.000 Umdrehungen die Einlagerung kompensiert. Die aus dem Flächen-Verschleißkoeffizienten eigentlich abzuleitende Massenabnahme bestärkt dabei die oben getätigten Überlegungen zur Problematik für die Anwendbarkeit dieser Berechnungsmethode.

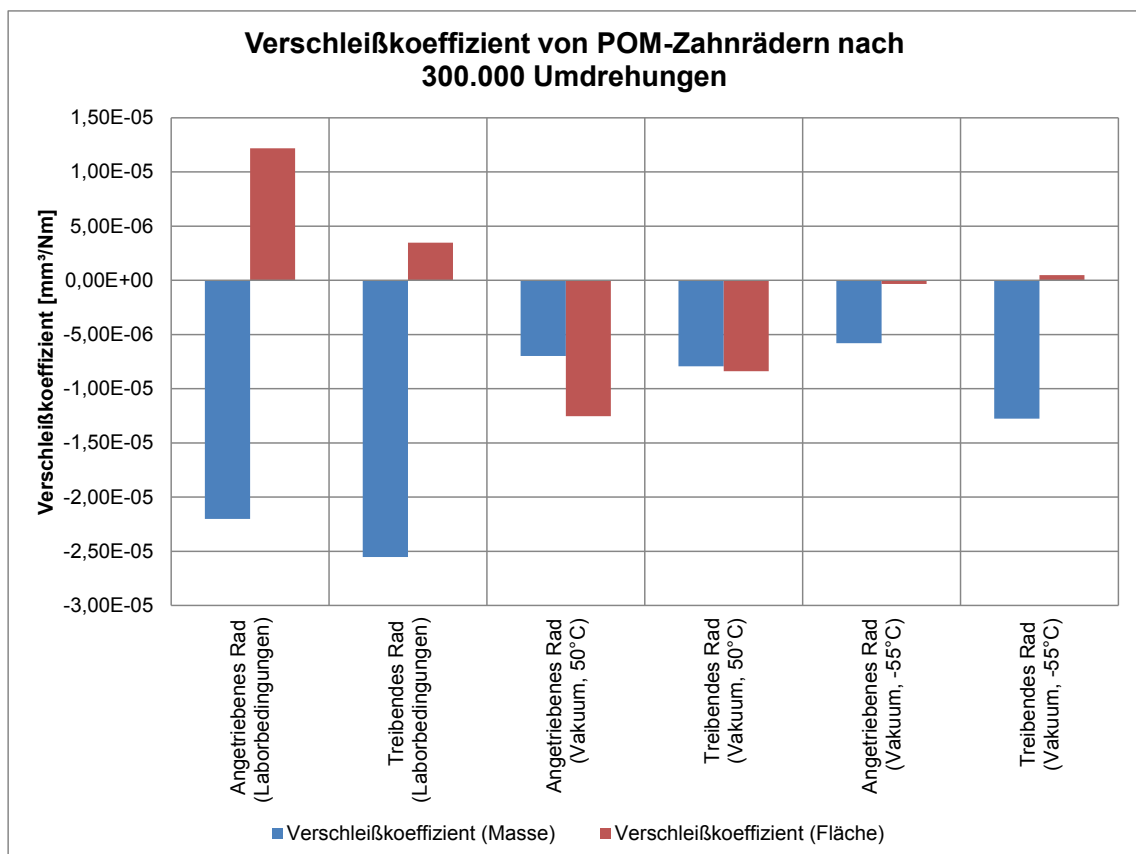


Abb. 76: Verschleißkoeffizient von POM-Zahnrädern nach 300.000 Umdrehungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen

Der Vergleich der einzelnen Umgebungsbedingungen untereinander zeigt, dass sich die höchsten Absolutwerte des Massen-Verschleißkoeffizienten für Laborbedingungen ergeben. Alle Werte deuten jedoch auf eine deutliche Einlagerung von JSC-1A-Partikeln hin. Die im Mittel geringsten Absolutwerte werden für +50°C unter Vakuumbedingungen erzielt. Sie

liegen jedoch nahe denen bei -55°C unter Vakuumbedingungen. Als Erklärung für die geringeren Werte bei $+50^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zu Laborbedingungen kann angeführt werden, dass aufgrund der höheren Temperatur die Festigkeit abnimmt [56], wodurch die Einlagerung von Partikeln erleichtert wird und gleichzeitig der Verschleiß verstärkt wird, wodurch wiederum die Massenzunahme kompensiert wird. Die im Vergleich zu Laborbedingungen geringeren Absolutwerte bei -55°C unter Vakuumbedingungen können dadurch erklärt werden, dass mit sinkender Temperatur mit spröderem Materialverhalten zu rechnen ist [67], wodurch der Verschleiß verstärkt und gleichzeitig eine Einlagerung der Partikel erschwert wird. Jedoch zeigt das „Treibende Rad“, dass es trotzdem zu einer deutlichen Anlagerung an den spröden Bruchkanten kommen kann.

Das Anlagerungsverhalten der Partikel soll durch die in Abb. 77 dargestellten Aufnahmen der Zahnräder nach den Versuchen noch einmal verdeutlicht werden. Für den Abrieb, und damit auch über das Gesamtverhalten der Zahnräder, kann jedoch anhand der Aufnahmen keine Aussage abgeleitet werden. Es ist zu erkennen, dass die oben angenommene deutliche Einlagerung von Fremdpartikel als schwarze Fremdkörper auf dem Zahnrad, welches bei $+50^{\circ}\text{C}$ unter Vakuumbedingungen untersucht wurde. Ebenso ist die im Vergleich zu den beiden anderen Zahnrädern geringer auftretende Einlagerung von Fremdpartikeln bei dem Zahnrad, welches bei -55°C unter Vakuumbedingungen untersucht wurde, zu erkennen.

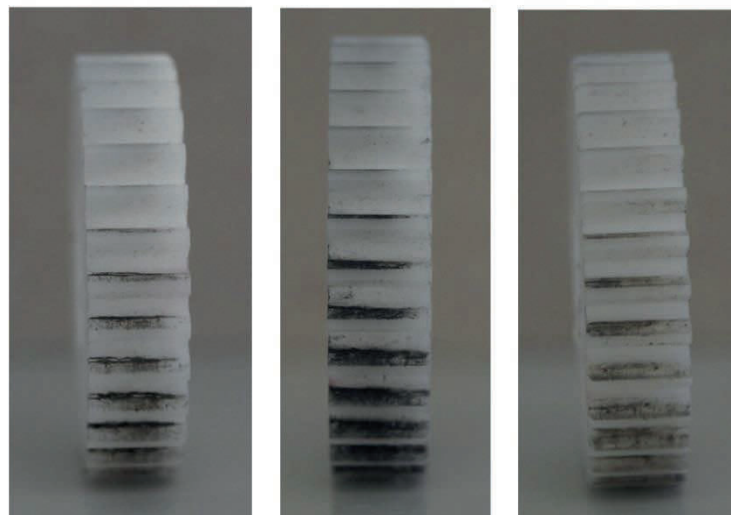


Abb. 77: POM-Zahnräder nach 300.000 Umdrehungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (von links nach rechts: Laborbedingungen, $+50^{\circ}\text{C}$ Vakuum, -55°C Vakuum), entnommen aus Roder [85]

Hauptuntersuchungen mit PEEK-Zahnrädern

Abb. 78 zeigt die berechneten Verschleißkoeffizienten für PEEK-Zahnräder unter verschiedenen Umgebungsbedingungen nach einer Versuchsdauer von 300.000 Umdrehungen. Die Berechnungen wurden hierbei auf der Basis der von Roder [85] erhobenen Daten durchgeführt. Auch für diese Versuche wurden die Edelstahlzahnäder, wie zuvor bereits beschrieben, vor den Versuchen im verwendeten Mondanalogmaterial gewälzt.

Auch in Abb. 78 ist der bereits zuvor beschriebene Unterschied zwischen den beiden Messmethoden zu erkennen. Dies wird insbesondere bei -55°C unter Vakuumbedingungen deutlich. Basierend auf dem Flächenverschleißkoeffizienten tritt hier nahezu kein Verschleiß für eines der Zahnräder auf, wohingegen sowohl für das andere Zahnrad wie für den Massenverschleißkoeffizienten beider Zahnräder eine deutliche Massenzunahme anhand des jeweiligen Verschleißkoeffizienten zu verzeichnen ist.

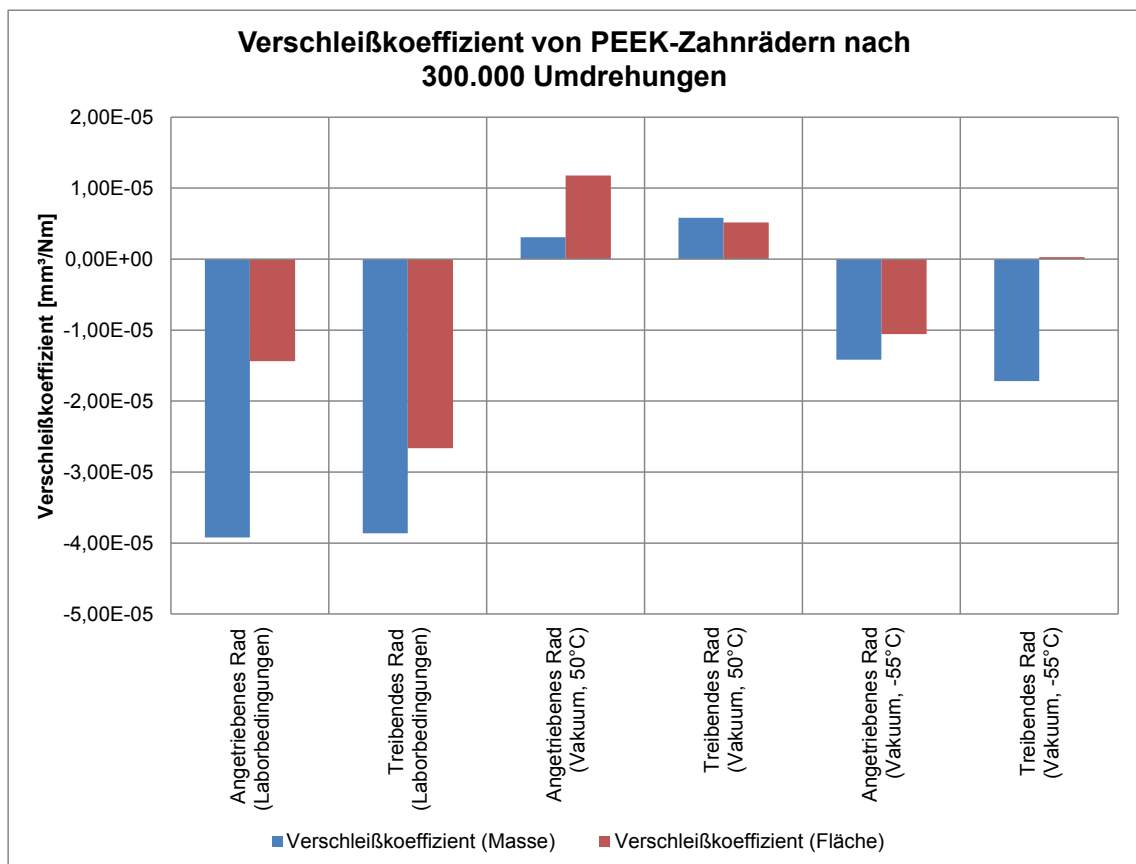


Abb. 78: Verschleißkoeffizient von PEEK-Zahnrädern nach 300.000 Umdrehungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen

Der Vergleich der Umgebungsbedingungen untereinander zeigt, dass die höchsten Absolutwerte für den Massen-Verschleißkoeffizienten bei Laborbedingungen auftreten. Die Werte deuten hier auf eine deutliche Einlagerung von Mondanalogmaterialpartikeln hin. Bei -55°C unter Vakuumbedingungen tritt, basierend auf dem Massen-Verschleißkoeffizienten, eine deutlich geringere Materialeinlagerung auf. Die geringeren Absolutwerte können wie zuvor durch das sprödere Materialverhalten von Polymeren bei geringeren Temperaturen [67] erklärt werden. Die Massen-Verschleißkoeffizienten bei $+50^{\circ}\text{C}$ nehmen hingegen positive Werte an, was in Summe einem Materialabtrag entspricht. Dies kann damit erklärt werden, dass es aufgrund der höheren Temperaturen zu einer geringeren Festigkeit des Materials [56] und somit zu einem erhöhten Verschleiß und Materialabtrag kommt. Dieser wird jedoch nicht durch die Einlagerung von Regolithpartikeln kompensiert.

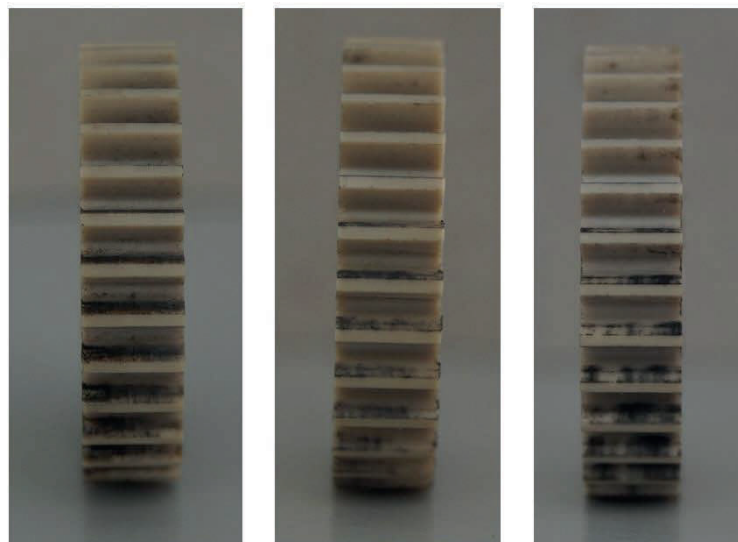


Abb. 79: PEEK-Zahnräder nach 300.000 Umdrehungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (von links nach rechts: Laborbedingungen, $+50^{\circ}\text{C}$ Vakuum, -55°C Vakuum), entnommen aus Roder [85]

Anhand der in Abb. 79 dargestellten Aufnahmen der PEEK-Zahnräder nach den Versuchen soll das eben beschriebene Anlagerungsverhalten noch einmal belegt werden. Wie zuvor kann jedoch anhand der Aufnahmen keine Aussage über den Abrieb und damit auch über das Gesamtverhalten der Zahnräder abgeleitet werden. Die Aufnahmen zeigen, dass unter Laborbedingungen eine deutlich flächige Ablagerung von JSC-1A-Partikeln auftritt. Diese Ablagerungen können auch für -55°C unter Vakuumbedingungen, wenn auch nur in geringerem Maße, nachgewiesen werden. Hierbei sind jedoch auch Stellen zu erkennen, an denen es zu kaum einer Ablagerung kommt. Dies entspricht der Annahme, dass aufgrund

des spröderen Materialverhaltens weniger Partikel eingelagert werden. Für +50°C unter Vakuumbedingungen sind die Ablagerungen, im Gegensatz zu den beiden anderen Umgebungsbedingungen, weniger intensiv vorhanden, zudem sind auch hier Bereiche zu identifizieren, an denen kaum bis gar keine Partikel haften.

Der Vergleich der Ergebnisse des Massen-Verschleißkoeffizienten von PEEK- und POM-Zahnradern zeigt, dass für PEEK bei Laborbedingungen und bei -55°C unter Vakuum höhere Absolutwerte erreicht werden. Eine mögliche Erklärung für dieses eher unerwartete Verhalten ist, dass der tatsächliche Verschleiß durch Massenabtrag, so wie es auch nach Purschke [64] und basierend auf den in Kapitel 3.3.4 gewonnenen Erkenntnissen zu erwarten wäre, für POM höher ist als für PEEK. Somit wird die Massenzunahme durch die Einlagerung der JSC-1A-Partikel stärker kompensiert, was insgesamt zu einer höheren Massenzunahme und damit zu einem höheren Massen-Verschleißkoeffizienten bei PEEK führt. Weiterhin kann eine mögliche Erklärung für die verstärkte Massenzunahme von POM-Zahnradern bei +50°C unter Vakuum im Vergleich zur Massenabnahme bei PEEK darin gefunden werden, dass es aufgrund der deutlich reduzierten Festigkeit durch die Temperaturerhöhung zu einer verstärkten Masseneinlagerung kommt, wohingegen dies bei PEEK nicht so stark auftritt und hier eher der verstärkte Verschleiß überwiegt.

4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der in diesem Abschnitt beschriebenen experimentellen Untersuchungen ist es den Abrasivverschleiß von POM- und PEEK-Zahnradern durch Regolithpartikel unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zu charakterisieren. Um die realen Missionsbedingungen im Labor zu simulieren, wurden dazu das Mondanalogmaterial JSC-1A und eine Thermalvakuumkammer eingesetzt. Für die Versuche wurde eine Weiterentwicklung des am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik existierenden Zahnradteststandes eingesetzt. Für die Charakterisierung des auftretenden Verschleißes wurde dazu der Verschleißkoeffizient jeweils basierend auf der Massenänderung und der Flächenänderung der Zahnrad bestimmt. Die Kernaussagen der experimentellen Untersuchungen sind abschließend noch einmal zusammengefasst:

- Die Anwendbarkeit einer taktilen Messung der Zahnradkontur zur Bestimmung des Verschleißkoeffizienten wie sie bei Purschke [64] verwendet wurde, muss bei abrasiven Drittpartikeln in Frage gestellt werden. Die Bestimmung des

Verschleißkoeffizienten über eine direkte Messung der Änderung der Masse ist zu präferieren.

- Durch das Mondanalogmaterial JSC-1A ist es bei nahezu allen Versuchsbedingungen bei den beiden Zahnradmaterialien POM und PEEK zu einer Massenzunahme gekommen.
- Als Grund für die Massenzunahme kann die Einlagerung von Partikeln des Mondanalogmaterials in die Oberfläche angeführt werden. Dieser Masseneintrag überlagert beziehungsweise kompensiert den Massenverlust aufgrund des verschleißbedingten Materialabtrages.
- Die Einlagerung von JSC-1A-Partikeln in die Zahnflanken konnte anhand von Aufnahmen der Zahnräder nach den durchgeführten Versuchen nachgewiesen werden
- Für die untersuchten Zahnradmaterialien besteht eine deutliche Abhängigkeit des Verschleißkoeffizienten von den Umgebungsbedingungen.

Die in diesem Kapitel dargelegten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Abrasivverschleiß von Polymerzahnradern zeigen, dass die Gegenwart von lunaren Regolithpartikeln, hier durch das Mondanalogmaterial JSC-1A simuliert, zu einer signifikanten Einlagerung dieser Partikel in die Zahnflanken der Zahnräder führt. Der auftretende Verschleiß und die damit verbundene Massenabnahme werden dadurch überlagert. Hieraus ergibt sich als Fragestellung für zukünftige Arbeiten inwieweit und in welcher Ausprägung dies auch für andere für Zahnräder geeignete Polymerwerkstoffe, wie zum Beispiel Polyamid oder Polyimid zutrifft. Darüber hinaus wäre auch die Untersuchung weiterer Zahnradgetriebe wie Harmonic Drive oder Schneckengetriebe interessant, da sich hier teils andere kinematische Bedingungen ergeben können.

Da sich gezeigt hat, dass es zu einer deutlichen Einlagerung von Fremdpartikeln in die Zahnflanken der Polymerzahnradern kommt, wäre ein weiterer wichtiger Forschungsgegenstand die Auswirkungen dieser Einlagerungen auf die Betriebseigenschaften der Zahnräder zu charakterisieren. Damit könnte abgeschätzt werden, inwieweit ein Einsatz von in dieser Weise degradierten Zahnrädern in realen Getrieben zu Komplikationen führt und bis zu welchen Toleranzgrenzen er noch zulässig ist.

5 Abschließende Zusammenfassung

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der experimentellen Verschleißuntersuchungen von technischen Oberflächen und Systemen mit lunarem Regolith noch einmal in allgemeiner Form zusammen. Zudem soll ein allgemeiner Ausblick über zukünftige Forschungsmöglichkeiten in diesem Bereich gegeben werden. Für eine detaillierte und hinsichtlich der behandelten Teilbereiche spezifische Betrachtung der beiden Themen sei hierbei auf die jeweiligen Schlusskapitel (Kapitel 2.10, Kapitel 3.4 und Kapitel 4.4) der experimentellen Untersuchungen verwiesen.

Die unterschiedlichen experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Einwirkung von lunarem Regolith zu einer signifikanten Degradation von technischen Oberflächen führen kann. Des Weiteren wurde dargelegt, dass es auch bei technischen Systemen, im Speziellen bei Polymerzahnradern, deren Oberflächen in direktem Kontakt mit den Partikeln stehen, zu einer signifikanten Degradation dieser Oberflächen kommt. Für sämtliche Untersuchungen wurde dabei das Mondanalogmaterial JSC-1A verwendet. Da dieses Material speziell dafür entwickelt wurde lunares Regolith zu simulieren, kann davon ausgegangen werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse im Allgemeinen auf real vorkommende lunare Regolithpartikel übertragen werden können. Hierbei sei jedoch darauf verwiesen, dass die dargelegten Ergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse als wichtiger erster Schritt hin zu einer umfassenden Analyse der Auswirkungen von Regolithpartikeln zu verstehen sind. Dadurch soll für die Problematik, die durch den Kontakt mit diesen Partikeln entstehen kann, sensibilisiert werden. Dies stellt keinen Ersatz für weitere detaillierte Betrachtungen dar, die grundsätzlich an die an einer potentiellen Landestelle vorherrschenden Bedingungen angepasst sein sollten.

Bei einer Vielzahl der betrachteten Fälle kommt es zu einer Einlagerung der scharfkantigen Mondanalogmaterialpartikel in die untersuchten Oberflächen. Bei den Einschlaguntersuchungen konnte dieses Phänomen bei allen betrachteten Materialien nachgewiesen werden, unabhängig von den jeweiligen Versuchsbedingungen. Wobei dieser Effekt grundsätzlich mit steigendem, beziehungsweise flacherem Einschlagwinkel abnimmt und nur bei den untersuchten duktilen Materialien dominiert. Durch die Einlagerung der Partikel des Mondanalogmaterials konnte hierbei eine signifikante Degradation der Oberflächeneigenschaften nachgewiesen werden. Ebenso zeigen die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen an Polymerzahnradern, dass es beim Vorhandensein der

JSC-1A-Partikel zu einer nachweisbaren Einlagerung des Abrasivmaterials in die Oberfläche der Zahnflanken kommt. Dieses Phänomen führte in der Auswertung der Ergebnisse, bei nahezu allen untersuchten Fällen zu einer Überlagerung des auftretenden verschleißbedingten Massenverlustes. Lediglich beim Einsatz einer großen Menge des abrasiven Mondanalogmaterials, wie bei den Verschleißuntersuchungen an technischen Oberflächen verwendet, trat eine signifikante Materialabtragung auf, ausgelöst durch die involvierten Partikel. Wobei auch hier eine grundsätzliche Einlagerung der Partikel nicht auszuschließen ist und bei den untersuchten Al6061-T6-Proben unter Vakuumbedingungen als Erklärung für die auftretende Massenzunahme angeführt werden kann. Die Einlagerung der scharfkantigen Partikel kann somit als einer der Hauptmechanismen der Degradation der untersuchten technischen Oberflächen und Systeme identifiziert werden.

Für weitere Forschungsarbeiten bietet es sich somit an die Betrachtung dieses Phänomens auf weitere für lunare Explorationsmissionen relevante technische Oberflächen und Materialien auszuweiten. Dadurch kann identifiziert und abgesichert werden, ob und inwieweit die oben getätigte Aussage, hinsichtlich des Hauptmechanismus auch für diese Materialien eine grundsätzliche Gültigkeit erlangt. Es ist mit großer Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass dieses Phänomen nicht nur speziell bei JSC-1A-Partikeln auftritt, sondern auch bei anderen vergleichbaren Partikeln zum Tragen kommt. Somit wäre ein weiterer wichtiger Forschungsgegenstand dies mit weiteren Mondanalogmaterialien abzusichern. Dies ist insbesondere von Bedeutung im Hinblick auf die eingangs erwähnten gegebenenfalls speziellen Bedingungen an den jeweiligen Landestellen. Darüber hinaus wäre von großem Interesse dieses Phänomen auch für repräsentative Marsanalogmaterialien zu untersuchen, da auf diesem Himmelskörper, aufgrund der vorhandenen Atmosphäre, mit weniger scharfkantigem Oberflächenmaterial zu rechnen ist.

Basierend auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen sollten zudem, soweit eine Vermeidung der Einlagerung nicht verhindert werden kann, Strategien zur Entfernung der Partikel entwickelt werden. Darüber hinaus sind auch Konzepte und Strategien, welche die Auswirkung der Degradation der Oberflächen und die Einlagerung der Partikel systemseitig abschwächen oder kompensieren, ein interessanter Forschungsgegenstand. Als Beispiel hierfür können zum Beispiel Bilderkennungsalgorithmen angeführt werden, die auch bei degradierten Aufnahmen noch verwertbare Ergebnisse errechnen können.

Schlussendlich sollte ein starkes Augenmerk auf die Untersuchung verschleißbedingter Degradation durch lunare Regolithpartikel von technischen Gesamtsystemen gelegt werden. Die in dieser Arbeit dargelegten Ergebnisse bilden hierfür einen guten Ansatzpunkt, können jedoch keine vollständige Aussage darüber geben, inwieweit und wie stark die Gesamtfunktion relevanter technischer Systeme durch die Degradation eingeschränkt oder sogar komplett behindert wird. Vorschläge für mögliche Systeme wären hierbei komplette Getriebe, Dichtungen, Solarzellen beziehungsweise -generatoren, Radiatoren und optische Systeme. Speziell im Hinblick auf bemannte Missionen wäre auch die Untersuchung kompletter Raumanzüge mit allen Subsystemen von großer Relevanz. Hierbei dürften jedoch Impaktuntersuchungen nur eine untergeordnete Rolle spielen, da sich Astronauten bei Start- und Landevorgängen an geschützten Orten aufhalten werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Ip Wing-Huen et al., „Preface: The Chang'e-3 lander and rover mission to the Moon,“ *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14. Jg., Nr. 12, S. 1511, 2014.
- [2] „Presidential Memorandum on Reinvigorating America’s Human Space Exploration Program,“ [Online]. Available: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/presidential-memorandum-reinvigorating-americas-human-space-exploration-program/>. [Zugriff am 06.07.2019].
- [3] „Solar System Exploration Research Virtual Institute: President Signs Space Policy Directive 1,“ [Online]. Available: <https://sservi.nasa.gov/articles/president-signs-space-policy-directive-1/>. [Zugriff am 06.07.2019].
- [4] E. M. Galimov, „Luna-Glob project in the context of the past and present lunar exploration in Russia,“ *Journal of earth system science*, 114. Jg., Nr. 6, S. 801-806, 2005.
- [5] Richard Fisackerly et al., „The ESA lunar lander mission,“ *AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition.*, S. 7217, 2011.
- [6] Fassett Caleb, „Exploration and Science of the Moon,“ 2019 .
- [7] J. E. Colwell et al., „Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics,“ *Rev. Geophys.* 45 (2) (2007) RG2006, <http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000184>.
- [8] Timothy J. Stubbs et al., „Impact of dust on lunar exploration,“ 2007.
- [9] James R. Gaier und Ronald A. Creel, „The Effects of Lunar Dust on Advanced EVA Systems: Lessons from Apollo,“ Presentation, Jan 2005.
- [10] Burton G. Cour-Palais, „News Release,“ NASA, Houston, Texas, 1970.
- [11] Heiken Grant et al., „Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon,“ CUP Archive, 1991.
- [12] Miguel San Martin et al. , „Mars Science Lander GN&C Design for Entry, Descent, and Landing,“ 2011.
- [13] Norman S. Land und Hurlund F. Scholl, „Scaled lunar module jet erosion experiments,“ *NASA Technical Report*, Langley Research Center, Hampton, 1969.

- [14] Jeremiah N. Mpagazehe et al., „An experimental study of lunar dust erosive wear potential using the JSC-1AF lunar dust simulant,“ *Wear*, 2014.
- [15] „Lunar Reconnaissance Orbiter Looks at Apollo 12, Surveyor 3 Landing Sites,“ Online . Available: <https://www.nasa.gov/content/lunar-reconnaissance-orbiter-looks-at-apollo-12-surveyor-3-landing-sites>. [Zugriff am 05.12.2017].
- [16] Christopher Immer et al., „Apollo Video Photogrammetry Estimation of Plume Impingement Effects,“ *Earth and Space Conference, Long Beach*, 2008.
- [17] John E. Lane et al., „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.
- [18] Aaron Benjamin Morris, „Simulation of rocket plume impingement and dust dispersal on the lunar surface,“ *Dissertation, The University of Texas at Austin*, 2012.
- [19] Heikki Kahila, „Engine exhaust plume interactions with a planetary surface,“ *Master’s Thesis, Aalto University School of Science*, 2014.
- [20] Audelia C. Wittbrodt und Philip T. Metzger, „Material Damage from Impacts of Lunar Soil Particles Ejected by the Rocket Exhaust of Landing Spacecraft,“ *NASA Technical Report*, 2008.
- [21] Jeremiah N. Mpagazehe et al., „Kicking Up Some Dust”: An Experimental Investigation Relating Lunar Dust Erosive Wear to Solar Power Loss,“ *NASA/TM*, 2013.
- [22] Eduard Igenbergs et al., „The TUM/LRT Electromagnetic Launches,“ *IEEE Transactions on Magnetics*, Mag-22, Vol. 6, pp 1536-1541, 1986.
- [23] Martin Rott und Detlef Koschny, „Low-velocity Impact Studies with the LRT Electromagnetic Accelerator,“ *49th Meeting of the Aeroballistic Range Association, Scheveningen, NL*, 1998.
- [24] Ryan Lauren Kobrick, „Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion for Spacecraft Design and Operations,“ *Dissertation, University of Colorado*, 2010.
- [25] Khalid A. Alshibli und Alsidqi Hasan, *Strength properties of JSC-1A lunar regolith simulant. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135. Jg., Nr. 5, S. 673-679, 2009.

- [26] Orbital Technologies Corporation, „MATERIAL SAFETY DATA SHEET,“ *Product Name: JSC-1AF, JSC-1A, JSC-1AC Lunar Mare Regolith Simulant*, 2005.
- [27] I. M. Hutschings , „A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence,“ *Wear*, 70. Jg., Nr. 3, S. 269-281, 1981.
- [28] „ASM Aerospace Specification Metals Inc.,“ Online . Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6>. [Zugriff am 06.07.2019].
- [29] „ASM Aerospace Specification Metals Inc.,“ Online . Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>. [Zugriff am 06.07.2019].
- [30] G. Sundararajan, „The depth of plastic deformation beneath eroded surfaces: the influence of impact angle and velocity, particle shape and material properties,“ *Wear*, 149. Jg., Nr. 1-2, S. 129-153, 1991.
- [31] G. L. Sheldon und Ashok Kanhere , „An investigation of impingement erosion using single particles,“ *Wear*, 21. Jg., Nr. 1, S. 195-209, 1972.
- [32] Werner Goldsmith , „Analytical versions of penetration processes,“ *Naval Ordnance Test Station China Lake CA*, 1962.
- [33] Y. Ben-Ami et al., „Modelling the particles impingement angle to produce maximum erosion,“ *Powder Technology*, 301. Jg., S. 1032-1043, 2016.
- [34] Cunkui Huang et al. , „A comprehensive phenomenological model for erosion of materials in jet flow,“ *Powder Technology*, 187. Jg., Nr. 3, S. 273-279, 2008.
- [35] Kenneth Langstreth Johnson , „Contact mechanics,“ *Cambridge university press*, 1987.
- [36] J. G. A. Bitter, „A study of erosion phenomena part I,“ *Wear*, 6. Jg., Nr. 1, S. 5-21, 1963.
- [37] J. G. A. Bitter, „A study of erosion phenomena: Part II,“ *Wear*, 6. Jg., Nr. 3, S. 169-190, 1963.
- [38] Iain Finnie , „Some observations on the erosion of ductile metals,“ *Wear*, 19. Jg., Nr. 1, S. 81-90, 1972.
- [39] Iain Finnie et al., „The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles.,“ *Wear*, 152. Jg., Nr. 1, S. 91-98, 1992.

- [40] J. H. Neilson und A. Gilchrist , „Erosion by a stream of solid particles,“ *Wear*, 11. Jg., Nr. 2, S. 111-122, 1968.
- [41] Iain Finnie , „Erosion of surfaces by solid particles,“ *Wear*, 3. Jg., Nr. 2, S. 87-103, 1960.
- [42] Ian Hutchings und Philip Shipway, „Tribology: friction and wear of engineering materials,“ *Butterworth-Heinemann*, 2017..
- [43] I. M. Hutchings und R.E Winter, „The erosion of ductile metals by spherical particles,“ *Journal of Physics D: Applied Physics*, 8. Jg., Nr. 1, S. 8, 1975.
- [44] I. M. Hutchings und R. E. Winter, „Particle erosion of ductile metals: a mechanism of material removal,“ *Wear*, 27. Jg., Nr. 1, S. 121-128, 1974.
- [45] Q. Chen und D. Y. Li, „Computer simulation of solid particle erosion,“ *Wear*, 254. Jg., Nr. 3-4, S. 203-210, 2003.
- [46] A. J. Sparks und I. M. Hutchings , „Transitions in the erosive wear behaviour of a glass ceramic,“ *Wear*, 149. Jg., Nr. 1-2, S. 99-110, 1991.
- [47] S. M. Wiederhorn und B. J. Hockey, „Effect of material parameters on the erosion resistance of brittle materials,“ *Journal of Materials Science*, 18. Jg., Nr. 3, S. 766-780, 1983.
- [48] Ryan L. Kobrick et al., „Defining an abrasion index for lunar surface systems as a function of dust interaction modes and variable concentration zones,“ *Planetary and Space Science*, 59. Jg., Nr. 14, S. 1749-1757, 2011.
- [49] ASTM G171-03, „Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond,“ *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2003.
- [50] Dale C. Ferguson , „The Wheel Abrasion Experiment-how abrasive is the Martian dust?,“ *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*. IEEE, S. 734-737, 1997.
- [51] Dale C. Ferguson et al. , „Evidence for Martian electrostatic charging and abrasive wheel wear from the Wheel Abrasion Experiment on the Pathfinder Sojourner rover.,“ *Journal of Geophysical Research: Planets*,, 104. Jg., Nr. E4, S. 8747-8759, 1999.
- [52] Kenneth G. Budinski, „Guide to friction, wear and erosion testing.,“ *West Conshohocken*, PA: ASTM international, 2007.

- [53] L. H. Mair et al. , „Wear: mechanisms, manifestations and measurement.“ *Report of a workshop, Journal of Dentistry*, 24. Jg., Nr. 1-2, S. 141-148, 1996.
- [54] Gesellschaft für Tribologie, „Tribologie Definitionen, Begriffe, Prüfung,“ *GfT-Arbeitsblatt 7*.
- [55] Karl Sommer et al., „Verschleiß metallischer Werkstoffe,“ *Wiesbaden: Vieweg+Teubner*, 4. Jg., 2010.
- [56] Horst Czichos und Karl-Heinz Habig , „Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik,“ *Springer-Verlag*, 2010.
- [57] K.-H. Zum Gahr , „Microstructure and wear of materials,“ *Elsevier*, 1987.
- [58] K. G. Budinski und L. K. Ives, „Measuring abrasion resistance with a fixed abrasive loop,“ *Wear*, 1. Jg., Nr. 258, S. 133-140, 2005.
- [59] J. F. Archard , „Wear theory and mechanisms,“ *Wear control handbook*, 58. Jg., 1980.
- [60] ASTM G65-16e1, „Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus,“ *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016.
- [61] Paul B. Willis und Cheng-Hsien Hsieh, „Space applications of polymeric materials,“ *Kobunshi*, 49. Jg., Nr. 2, S. 52-56, 2000.
- [62] A. P. Harsha , „An investigation on low stress abrasive wear characteristics of high performance engineering thermoplastic polymers,“ *Wear*, 271. Jg., Nr. 5-6, S. 942-951, 2011.
- [63] R. Feulner , „Verschleiß trocken laufender Kunststoffgetriebe,“ *Doktorarbeit: Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg*, 2008.
- [64] Ralf Purschke, „Synthetic Gear Wheels for Space Mechanisms,“ *Doktorarbeit, Technische Universität München*, 2015.
- [65] N. L. McCook et al. , „Tribological results of PEEK nanocomposites in dry sliding against 440C in various gas environments,“ *Wear*, 262. Jg., Nr. 11-12, S. 1511-1515, 2007.
- [66] Géraldine Theiler und Thomas Gradt, „Tribological behaviour of PEEK composites in vacuum environment,“ *12th European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATS)*, Liverpool, UK, S. 19-21, 2007.

- [67] Karlheinz Biederbick, „Kunststoffe: kurz und bündig,“ *Vogel*, 1977.
- [68] G. Niemann und H. Winter, „Maschinenelemente Band 2,“ *Berlin: Springer*, 2003.
- [69] Herbert Wittel et al. , „Roloff/Matek Maschinenelemente,“ *Springer Vieweg*, 2017.
- [70] Kraig Koski , „Focus Mechanism for Kepler Mission,“ *Proceedings of the 39th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Marshall Space Flight Center*, S. 359-372, 2008.
- [71] M. Shmulevitz und A. Halsband, „The design, development and qualification of a lightweight antenna pointing mechanism,“ *30th Aerospace Mechanisms Symposium*, S. 291-298, 1996.
- [72] Manfred Schmid et al. , „Extremely Compact Two-Axis X-Band Antenna Assembly,“ *The 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, 2009.
- [73] Nigel Phillips et al., „Bi-Axial Solar Array Drive Mechanism: Design, Build and Environmental Testing,“ *ESA Special Publication*, 2015.
- [74] Daniel DiBiase et al., „A zoom lens for the MSL mast cameras: Mechanical design and development,“ *41 st Aerospace Mechanisms Symposium*, S. 293, 2012.
- [75] Keiji Ueura und Rolf Slatter, „Development of the harmonic drive gear for space applications,“ *European Space Agency-Publications-ESA SP*, 438. Jg., S. 259-264, 1999.
- [76] Robert Warden et al., „Pancam mast assembly on Mars rover,“ *37th Aerospace Mechanisms Symposium*, 2004.
- [77] Satish Krishnan und Chris Voorhees, „The use of harmonic drives on NASA's Mars exploration rover,“ *Harmonic Drive International Symposium*, 2001.
- [78] Howard Jay Eisen et al. , „Mechanical design of the Mars Pathfinder mission,“ *7th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, 1997.
- [79] Paul McMahon et al., „Beagle 2-A Retrospective Look at the Beagle 2 Lander Mechanisms Following Evidence of Successful Deployment,“ *Proceedings: ESMATS 2017*, Univ. of Hertfordshire, Hatfield, U.K, 2017.
- [80] Robert Bonitz et al., „The mars surveyor'01 rover and robotic arm,“ *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8484)*. *IEEE*, S. 235-246, 2000.

- [81] Mark Ferris und Nigel Phillips, „The use and advancement of an affordable adaptable antenna pointing mechanism,“ *Proc. 14th Eur. Space Mech. Tribol. Symp.*, S. 227-234, 2011.
- [82] Licharz: technische Kunststoffe, „Konstruieren mit technischen Kunststoffen,“ 2019.
- [83] VDI 2736: Blatt 1, „Thermoplastische Zahnräder: Werkstoffe, Werkstoffauswahl, Herstellverfahren, Herstellgenauigkeit, Gestalten,“ *VDI Richtlinien*, 2016.
- [84] VDI 2736: Blatt 4, „Thermoplastische Zahnräder: Ermittlung von Tragfähigkeitskennwerten an Zahnrädern,“ *VDI Richtlinien*, 2016.
- [85] Kerstin Roder, „Erweiterung und Anwendung eines Teststandes für abrasiven Verschleiß durch lunares Regolith,“ *Masterarbeit*, Technische Universität München, 2017.
- [86] Christian Alexander Bühler, „Experimental investigation of lunar dust impact wear,“ *Wear*, 342. Jg., S. 244-251, 2015.
- [87] Christian Bühler, „Experimentelle Untersuchung der Schadwirkung von Staubeinschlägen unter verschiedenen Winkeln während Lunaren Landevorgängen,“ *Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV*, 2015.
- [88] Christian Bühler, „Experimental investigations of low velocity impacts of millimeter-sized particles on different target materials,“ *67th Meeting of the Aeroballistic Range Association*, Monterey, CA, USA, 2017.
- [89] Christian Bühler, „Experimental investigation of lunar dust impact wear for different grain sizes and impact angles,“ *2017 IEEE Aerospace Conference, IEEE*, S. 1-14, 2017.
- [90] Leonard Victor Spies, „Vergleich von analytischen Berechnungen, Simulation und Experimentaldaten von Einschlägen sphärischer Vollkörper,“ *Masterarbeit*, Technische Universität München, 2017.
- [91] Stephan B. Lidel, „Analysis of particle impacts of different materials to characterize lunar dust impact wear,“ *Semesterarbeit*, Technische Universität München, 2017.
- [92] Anian Richter, „Untersuchung von Einschlägen durch Metall- und Glaskörper unterschiedlicher Geometrie auf Aluminiumoberflächen,“ *Semesterarbeit*, Technische Universität München, 2016.

-
- [93] I. Kopic, „Experimentelle Untersuchung des Abrasiven Verschleißes von Technischen Oberflächen unter dem Einfluss von Regolith,“ *Bachelorarbeit*, Technische Universität München, 2017.
- [94] Christian Bühler et al., „Experimentelle Untersuchungen verschiedener Verschleißerscheinungen hervorgerufen durch Lunaren Regolith während Explorationsmissionen,“ *Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV*, 2017.
- [95] Christian Bühler und Kerstin Roder, „Experimental Study of Lunar Dust Induced Wear on Synthetic Spur Gears,“ *European Lunar Symposium*, Münster, 2017.