

Hammering beneath the Surface of Mars

Analyse des Schlagzyklus und der äußeren Form des HP³-Mole mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode

Roy Lichtenheldt, M.Sc., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, 82234 Weßling, Deutschland, Roy.Lichtenheldt@dlr.de
und Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Mechanismentechnik

Kurzfassung

Die Marsmission „InSight“ (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transfer) der NASA hat das Ziel, Fragen zur Entstehung erdähnlicher Planeten zu beantworten. Dafür schlägt sich der HP³-Mole tiefer unter die Oberfläche des Mars als je ein anderes Instrument zuvor. Der Vortrieb dieses „selbsteinschlagenden Nagels“ hängt dabei stark vom Ablauf des inneren Schlagzyklus, der äußeren Formgebung des Mechanismus und der Interaktion mit dem umgebenden Regolith ab. Nach erfolgreicher Verifikation und Validierung der DEM-MKS Co-Simulation mit Messdaten, wird nun der komplexe Schlagzyklus und die Interaktion mit dem Boden bei Variation der Mole-Spitzenform modellbasiert untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung nichtlinearer Spitzenprofile anstelle linear-konischer Profile bei gleichem Bauraum geringere Widerstandskräfte auftreten. Diese Erkenntnisse ermöglichen geeignete Kompromisse zwischen der Steigerung der Penetrationsleistung, der Reduzierung der äußeren Abmessungen und der Minimierung der Masse, für künftige Missionen.

Abstract

NASA's Mars-mission „InSight“ (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transfer) aims to investigate the evolution of rocky planets. Therefore the HP³-Mole hammers itself deeper below the martian surface, than any other instrument before. Thereby the performance of this „self impelling nail“ is highly dependent on its inner stroke cycle, outer shape and the mutual influence with the surrounding regolith. Using the successfully validated DEM-MKS Co-Simulation, both the complex stroke cycle and the mutual influence to the soil are analyzed, while varying the tip shape. It is shown, that by using nonlinear tip shapes instead of linear-conical tips, the resistance force can be lowered while maintaining the outer dimensions. These insights enable proper compromises between increased performance, decreased dimensions and optimized mass for future missions.

1 Einleitung

Die als Discovery-Typ klassifizierte Marsmission „InSight“ (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transfer; [1, 2]) der NASA hat sich zum Ziel gesetzt, Fragen zur Entstehung erdähnlicher Planeten des inneren Sonnensystems zu beantworten. Das DLR stellt hierfür die wissenschaftliche Nutzlast HP³ (Heatflow and Physical Properties Package; [3, 4]), um sowohl den Wärmestrom als auch das Temperaturprofil unter der Oberfläche des roten Planeten zu messen. Um diese Messungen durchzuführen, schlägt sich das Lokomotionssystem des Instrumentes, der HP³-Mole, tiefer unter die Oberfläche des Mars als je ein anderes Instrument zuvor. Um das gewünschte Ziel von fünf Metern Tiefe unter Einhaltung des engen Massen- und Energiebudgets zu ermöglichen, wird ein spezieller Mechanismus als „selbsteinschlagender Nagel“ verwendet. In **Bild 1** ist eine Schnittzeichnung des HP³-Mole mit den wichtigsten Systemen dargestellt. Darin sind sowohl der Schlagmechanismus als auch die wissenschaftlichen Instrumente STATIL (Static Tilt Measurement Unit) und TEM-A (Thermal Excitation Measurement-Active) zu sehen. Das Grundprinzip der Lokomotion des HP³-Mole basiert dabei auf der Anisotropie der äußeren

Reibung zwischen Gehäuse und Boden. Für den Vortrieb wird die Haftreibung und der Widerstand des Regoliths durch die Schlagenergie überwunden, die Rückschlagenergie hingegen wird durch die Suppressorbewegung und die Bremsfeder aufgenommen. Dabei ist die Bremsfeder so ausgelegt, dass die Energieabgabe zeitlich gestreckt wird und somit die Haftreibungskraft, die eine Aufwärtsbewegung des Mole's verhindert, nie überschritten wird.

Der Vortrieb sowie die dafür benötigte Energie hängen dabei stark vom Ablauf des inneren Schlagzyklus, der äußeren Formgebung des Mechanismus und der gegenseitigen Interaktion mit dem Boden ab. In [5] wurden bereits erfolgreich Analysen und Optimierungen des Mechanismus in Zusammenhang mit einfachen Bodenmodellen vorgenommen. Hierdurch konnte bei gleichbleibender Eingangsleistung von weniger als 5 W die erreichte Tiefe von maximal 3 m auf die Zieltiefe von 5 m gesteigert und die dazu benötigte Schlaganzahl auf weniger als 25% des Ausgangswertes gesenkt werden. Da das innere Verhalten des Mechanismus jedoch stark vom Verlauf der äußeren Kräfte abhängt, sind für eine genaue Analyse und die Variation der äußeren Form detailliertere Bodenmodelle erforder-

lich. Hierfür wurde von LICHTENHELDT, SCHÄFER & KRÖMER [7] ein ursprünglich für die Nutzung für Räder planetarer Rover entwickeltes Bodenmodell auf Basis der Diskrete Elemente Methode (DEM) an die Anforderungen zur HP³-Modellbildung angepasst und in einer Co-Simulation mit dem erweiterten Mehrkörpermodell des Mechanismus [6, 7] gekoppelt. Durch den Vergleich sowohl der Einzelmodelle für Boden und Mechanismus als auch der Co-Simulation mit dedizierten Messungen konnte die Validität der Modellierung nachgewiesen werden. Durch die Ergebnisse in [7] konnten bereits erste Erkenntnisse zum Einfluss des Bodens auf die Abläufe im Mechanismus gewonnen werden.

Für bisherige Systeme wurde die äußere Gehäuseform auf Grund von empirischen Zusammenhängen sowie Erfahrungswerten ausgelegt. Variationen der äußeren Gehäuseform am realen Prototyp sind jedoch zeitaufwändig und somit nicht mit dem engen Zeitplan planetarer Explorationsmissionen vereinbar. Zudem sind in Versuchen einige Bewertungsgrößen nicht oder nur schwer messbar. So ist z.B. die Bodenverformung um den HP³-Mole nicht beobachtbar. Ebenso kann der innere Schlagzyklus nur unter großem Aufwand und in geringen Eindringtiefen (kleiner als eine Mechanismusstärke) beobachtet werden. Im Rahmen dieses Artikels wird daher die bestehende und verifizierte Modellbildung des HP³-Mole aus [7] genutzt, um ein tiefer gehendes Verständnis in die Interaktion des Mechanismus mit dem Boden zu erlangen und zugehörige Effekte zu identifizieren. Aufbauend auf dem Verständnis des Schlagzyklus wird im Nachgang der Einfluss der äußeren Form des HP³-Mole anhand des Öffnungswinkels untersucht. Dafür wird der Öffnungswinkel konischer Gehäusespitzen variiert. Weiterhin werden diese konischen Spitzen mit nichtlinearen Spitzenprofilen verglichen und so auch die nichtlineare Spitze des Flugmusters (PFM) beurteilt.

Die gewonnenen Erkenntnisse können sowohl für die Analyse des Verhaltens des Flugmusters des HP³-Mole genutzt werden, als auch um die Entwicklung zukünftiger Mole Penetratoren zu unterstützen. Weiterhin ermöglichen die Modelle Versuche mit virtuellen Prototypen unter den realen Bedingungen auf dem Mars, welche vor dem Start der Mission so nicht erreicht werden können.

2 Aufbau & Modell des HP³-Mole

Der HP³-Mole besteht zum einem aus der wissenschaftlichen Nutzlast STATIL im Payload-Compartment, TEM-A auf der Außenhülle des Mechanismus, sowie dem eigentlichen Schlagmechanismus für die Lokomotion des Systems [3]. Sowohl das federnd gelagerte STATIL als auch der Schlagmechanismus sind in **Bild 1** zu sehen. Nicht dargestellt ist ein weiterer wissenschaftlicher Anteil des Instruments: TEM-P. Dabei handelt es sich um auf dem Science-Tether angebrachte Sensoren zum Erfassen des Temperaturprofils. Um auch bei Ablenkungen des Mole's an Hindernissen die korrekte Tiefe für TEM-A und TEM-P

zu bestimmen, misst STATIL, zusätzlich zur reinen Längsinformation des TLM (Tether Length Measurement) die Inklination des Mole's. Da die schlaggetriebene Fortbewegung hohe Stoßlasten verursacht ist STATIL an „galaxieförmigen“ Federn, den Shock Mitigation Springs [8], aufgehängt um die Sensoren zu schützen.

Der Schlagmechanismus des Mole's besteht grundlegend aus drei Hauptmassen: Hammer, Suppressor und Gehäuse. Zum Ausführen der Schläge wird der Hammer periodisch durch den Spannmechanismus auf den Suppressor zubewegt. Dafür greift der über eine spielbehaftete Kupplung mit dem DC-Motor gekoppelte Driveshaft in ein Kurvengetriebe ein, welches die Spannbewegung erzeugt. Durch diese Bewegung werden die Schlagfedern gespannt und speichern die Energie bis zum Auslösen des Schlages. Eine Aussparung in der Kurvenbahn führt dann zum Freigeben der Rolle am Driveshaft und somit zum Auslösen des Schlages (näheres zu diesem Prozess beschreiben [5] und [6]).

Sobald der Hammer freigegeben ist, entspannen sich die Schlagfedern und beschleunigen sowohl den Hammer als auch den über die Bremsfeder gelagerten Suppressor: Der Schlagzyklus beginnt. Der HP³-Mole wurde während der gesamten Entwicklungsphase der Mission durch Simulationen unterstützt. Hierfür wurde durch LICHTENHELDT ET AL. [5–7] ein erweitertes Mehrkörperdynamikmodell des Mechanismus entwickelt, welches gemäß [7] die folgenden Aspekte modularisiert abbildet:

- die Körper und ihre kinematischen Beziehungen
- Spann- und Auslösevorgang inklusive der Elektrodynamik des DC-Motors
- Kontaktdynamik aller Kontaktstellen im Mechanismus
- Schlag- und Bremsfeder, sowie elastischer Beitrag der Kabel
- Umgebungsbedingungen für Mars und Erde: atmosphärischer Druck und Zusammensetzung, Temperatur und Gravitation
- kritische Reibungseffekte im Inneren des Mechanismus
- Gasfluss und Druckänderungen im Mechanismus, sowie deren Rückwirkung auf die Körper auf Basis dynamischer pneumatischer Netzwerke
- Einfluss des federnd gelagerten Payloads STATIL
- modulare äußere Kraftbedingungen (Teststände, verschiedene Bodenmodelle inkl. DEM)

Die entwickelten Modelle des Mechanismus wurden mit Hilfe des Health Check Test Stand (HCTS) für jeden real existierenden Prototypen mit Messungen verglichen [6, 7]. Durch die Ergebnisse der Optimierung aus [5] und die nötigen Anpassungen nach den Untersuchungen in [6] konnten

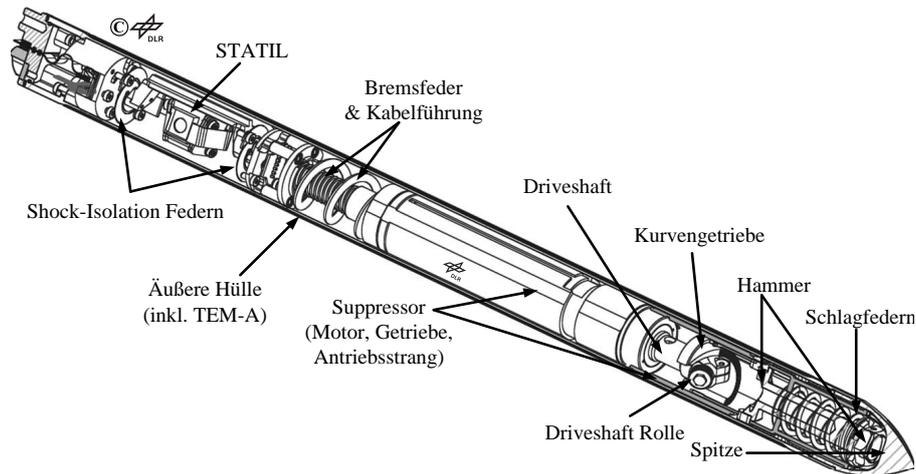


Bild 1 Schnittbild des HP³-Mole nach [7]

die Optimierungsergebnisse in die nächste Evolutionsstufe des HP³-Mole einfließen. Das neue Design wurde dabei vom polnischen Institut CBK durch die Konstruktion und Erfahrungen mit ähnlichen Systemen [9–11] unterstützt. Dabei wurde auch eine neue Spitze mit nichtlinearem Profilverlauf, gestützt auf die Erfahrungen mit dem KRET-Penetrator [9] vorgesehen.

Für Optimierung und Entwicklung des Mechanismus wurde ein schnell zu berechnendes, analytisches Bodenmodell auf Basis eines elasto-plastischen Elements [5] genutzt. Um jedoch die gegenseitige Abhängigkeiten der Dynamik des Mechanismus und des Bodens korrekt zu erfassen, werden detailliertere Bodenmodelle benötigt. Mittels des von LICHTENHELDT ET AL. [7] vorgestellten Co-Simulationsmodells, kann der Boden partikelbasiert und somit als diskretes Medium abgebildet werden. Dies ermöglicht eine natürliche Abbildung des Scherversagens und der Bodenverformung durch Partikelrelokation. Gemäß LICHTENHELDT ET AL. [7] ergeben sich folgende Hauptmerkmale des Modells:

- effiziente Abbildung der anisotropen Partikelrotation und der Kornform durch die Berechnung aus 2D-Rotationsgeometrien
- effiziente Berechnung von nichtlinearer Kohäsion auf Kornenebene
- dynamisch mitbewegte Ränder des Simulationsgebietes
- gravitationsabhängige Schüttdichte des granularen Materials
- Vorabbestimmung der Modellparameter aus makroskopischen Messungen
- Implementierung im DEM-Modellframework für Terramechanik DEMETRIA [7] (basierend auf Pasmimodo [12])

Gleichzeitig kann das dynamische Verhalten des Mechanismus mit den detaillierten, erweiterten Mehrkörpermo-

dellen aus [5, 6] und [7] abgebildet werden. Dies ermöglicht ein direktes Abbilden des gegenseitigen Einflusses von Mechanismus und Boden. Das Partikelmodell des Bodens wurde bereits in [7] mit den jeweiligen Messdaten sowohl für Penetrometermessungen als auch für den tatsächlichen Schlagprozess des HP³-Mole überprüft.

Nähere Informationen zur Modellbildung und dem Ablauf der Simulationen können [7] entnommen werden.

3 Schlagzyklus des HP³-Mole & Rückwirkungen auf den Boden

Als Grundlage für die folgenden Untersuchungen wurden die Daten eines Vorläufers des HP³-Mole-Flugmusters verwendet. Diese Einheit weicht zwar in ihren Parametern leicht von denen des Flugmusters ab, jedoch stehen für diese Einheit Messwerte in Regolith-Simulanten zur Verfügung und die Überprüfbarkeit der Ergebnisse ist somit gewährleistet. Aus den vorgenannten Gründen sind die folgenden Simulationen und Diagramme für irdische Umgebungsbedingungen ausgeführt. Auf Änderungen unter den Bedingungen des Mars wird entsprechend verwiesen. Weiterhin sind die durchgeführten Simulationen wie auch die Betrachtungen in [7] für ein Simulant auf Basis von Quarzsand durchgeführt.

Der Schlagprozess des HP³-Mole im Boden kann grundlegend in sechs Hauptprozesse gegliedert werden. Diese Hauptprozesse sind jeweils durch eine stoßartige Energieübertragung geprägt. Die Übergänge zwischen diesen Punkten erfolgen in der Regel durch kontaktfreie Bewegungen, bzw. werden nur durch Kontakte mit geringfügiger Energieübertragung beeinflusst. In **Bild 2** sind die Hauptprozesse I-VI im Geschwindigkeitsprofil der Hauptmassen des HP³-Mole dargestellt. **Bild 3** zeigt die jeweils zugehörigen Stellungen der drei Hauptmassen während dieser Hauptprozesse, sowie in den Übergängen. **Bild 6** zeigt die aktuelle Position des Gehäuses im Boden zu jedem Zeitpunkt t .

In Stellung 0 (**Bild 3**) ist der Spannvorgang abgeschlossen und der Hammer wird freigegeben, im Anschluss beginnt dieser zusammen mit dem Suppressor zu beschleunigen. Da der Hammer eine geringere Masse als der Suppressor besitzt, wird ein größerer Teil der in den Schlagfedern gespeicherten Energie auf den Hammer übertragen. Nach vollständiger Entspannung der Federn trennt sich der Hammer von diesen und bewegt sich frei in Richtung Spitze. Während der Suppressor sich gegen die Penetrationsrichtung verschiebt, wird dieser zusätzlich von der Bremsfeder abgebremst. In Prozess I trifft der Hammer auf die Spitze, der erste Schlag wird ausgeführt. Durch die stoßartige Energieübertragung wird die initiale Festigkeit des Bodens überwunden und das Gehäuse bewegt sich in den Boden. Nach Erreichen der maximalen Eindringgeschwindigkeit sinkt die kinetische Gehäuseenergie durch die vornehmlich dissipativen Widerstandskräfte des Bodens. Durch diesen Prozess entsteht eine seismische Longitudinalwelle (**Bild 10**), welche sich durch den Boden ausbreitet.

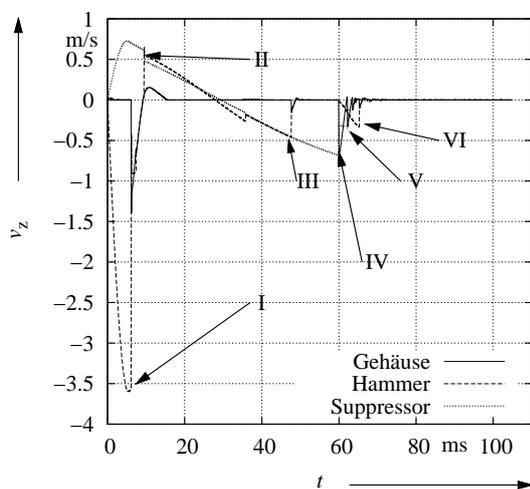


Bild 2 Geschwindigkeitsprofil der Hauptmassen für die PFM-Spitze nach [7]

Durch die gesenkte kinetische Energie des Hammers trennt sich dieser zunächst wieder vom Gehäuse, bewegt sich aber nachdem das Gehäuse durch die Widerstandskräfte abgebremst wurde wieder zusammen mit dem Gehäuse in Penetrationsrichtung. Im Boden bewegen sich während dieses Prozesses die durch die Longitudinalwelle beeinflussten Teilchen in einer rückläufigen Welle wieder auf das Gehäuse zu und verursachen somit das Eintreten einer Rückstellbewegung des Gehäuses. Diese Rückstellbewegung des Gehäuses wird durch Prozess II verstärkt. Dabei schließt der äußere Anschlag zwischen Suppressor und Hammer und die Bewegungsrichtung des Hammers wird auf Grund der höheren kinetischen Energie des Suppressors umgekehrt. Durch elastische Effekte und die geringere Hammermasse eilt der Hammer nach Prozess II dem Suppressor voraus. Durch Prozess II wird auch die äquivalente Trägheit des Gehäuses aus Sicht des Bodens gesenkt, da statt der Trägheiten des gemeinsam bewegten Hammers und Gehäuses lediglich noch die Gehäusemasse wirksam

ist. Dementsprechend kann durch Prozess II die Rückstellbewegung durch die rückläufige Welle bei einer entsprechenden zeitlichen Abfolge verstärkt werden (vgl. **Bild 9**).

Im Übergang von Prozess II zu III wird der Suppressor bis zum Erreichen seines Umkehrpunktes durch Gravitation und die Bremsfeder abgebremst, während der Hammer zunächst nur durch die Gravitation beeinflusst wird. Unter irdischer Gravitation erreicht der Hammer seinen Umkehrpunkt vor dem Suppressor und eilt diesem in Richtung der Spitze solange voraus, bis der äußere Anschlag der beiden Massen erneut schließt und beide Massen sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen. Dieser Kontakt hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Bewegung des Gehäuses. Unter Marsgravitation hingegen kommt es zunächst zu einer Berührung des Hammers mit den Schlagfedern und damit zu einer Energieübertragung an den Suppressor. Hierdurch wird in aller Regel keine Erhöhung Suppressorgeschwindigkeit erreicht, sondern lediglich die bremsende Wirkung der Gravitation und Bremsfeder aufgehoben. Währenddessen beendet das Gehäuse seine Rückstellbewegung und erreicht einen Ruhezustand im Boden.

Mit Eintreten von Prozess III schlägt der Hammer erneut auf die Spitze. Dieser Prozess ruft auf Grund der niedrigen verbleibenden Hammerenergie nur geringfügige Verschiebungen hervor ruft und wird daher nicht als Schlag im Sinne des Schlagzyklus gezählt. Zwischen Prozess III und IV kommen sowohl Hammer als auch Gehäuse in einen Ruhezustand. Im anschließenden Prozess IV trifft der Suppressor wieder auf die Spitze, der zweite Schlag im Sinne des Schlagzyklus wird ausgeführt. Durch diesen Schlag wird erneut die Bodenfestigkeit überwunden, das Gehäuse bewegt sich in den Boden. Analog zum ersten Schlag entsteht eine weitere seismische Longitudinalwelle. Durch die während des Schlagprozesses an das Gehäuse übertragene Energie sinkt die kinetische Energie des Suppressors und dieser trennt sich wieder vom Gehäuse. Dabei kann nicht von einem Zurückprallen gesprochen werden, da der Suppressor seine Bewegungsrichtung beibehält. Weiterhin folgt der Hammer, bedingt durch seine Trägheit, dem Gehäuse nicht sofort, und wird erst durch die Gravitation wieder in Richtung der Spitze beschleunigt. Mit Prozess V tritt der dritte Schlag des Zyklus durch den Kontakt von Suppressor und Spitze auf. Durch diesen zeitlich direkt auf den zweiten Schlag folgenden Kontakt, wird wiederum eine Longitudinalwelle ausgesandt. Diese Welle folgt dabei hinreichend schnell auf Prozess IV, um dessen rückläufige Welle auszulöschen. Dies führt dazu, dass im Gegensatz zum ersten Schlag keine Rückstellbewegung des Gehäuses stattfindet (siehe **Bild 6**). Zunächst stand in Frage, ob dieser Effekt in Realität zu beobachten ist oder nur einen Artefakt des Simulationsmodells darstellt. Der Effekt der ausbleibenden Rückstellbewegung nach dem zweiten Schlag, konnte jedoch in Highspeed-Videoaufnahmen des realen Systems in geringer Tiefe bestätigt werden. Auf den dritten Schlag folgen noch weitere schwächere Schläge des Suppressors, welche keinen nennenswerten Beitrag zur Penetrationstiefe leisten und daher nicht als

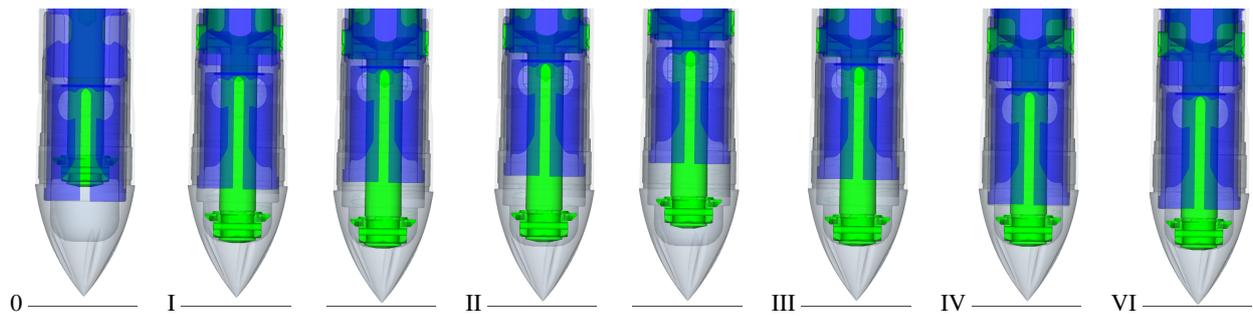


Bild 3 Gerenderte Darstellung der Positionen der drei Hauptmassen während des Schlagzyklus (nach [7])

Schläge im Sinne des Schlagzyklus betrachtet werden. In Prozess VI trifft anschließend der Hammer wieder auf die Spitze, jedoch ist auch dieser Schlag nicht maßgeblich an der Penetration beteiligt. Nach Prozess VI geht das gesamte System in den Ruhezustand über und verbleibt in diesem bis der nächste Spannprozess folgt (näheres zum Spannprozess siehe [5, 6]). Für den Ablauf auf dem Mars erfolgen die Prozesse IV-VI zeitlich gedehnt und in leicht veränderter Intensität, der qualitative Ablauf verändert sich jedoch nicht. Für andere äußere Kraftbedingungen als die Penetration von Boden kann der Schlagzyklus stark abweichen. Somit ist für die Entwicklung von Testständen auf die Ähnlichkeit der Kraftverläufe zu den Widerständen im Boden zu achten.

4 Einfluss der Spitzengeometrie

Um einen ersten Vergleich der Einflüsse der äußeren Form des Mole's vorzunehmen, wird zunächst die Spitze variiert. Um hierbei möglichst systematisch vorzugehen, werden konische Spitzen mit Profil-Steigungswinkel $\beta(r) = \text{const.}$ betrachtet. Da durch Messungen am „KRET“ [9] bereits bekannt ist, dass nichtlineare Profilwinkerverläufe bei gleicher Baulänge zu einem verbesserten Eindringverhalten führen können, werden auch zwei nichtlineare Spitzen betrachtet. Die untersuchten Spitzen sind als Oberflächenmodelle in **Bild 4** abgebildet. Bei der ersten nichtlinearen Spitze handelt es sich um die Spitze des Flugmusters des HP³-Mole's, bei der zweiten sogenannten „Blunt“ Spitze wurde zunächst ein größerer Steigungswinkel gewählt, welcher über dem Radius sinkt.

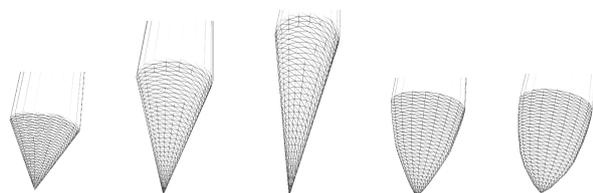


Bild 4 Verschiedene Spitzen: 60°, 40°, 25°, PFM Spitze, „Blunt“ Spitze

Ziel dieser Spitze ist es einen möglichst tangentialen Übergang zum zylindrischen Teil des Gehäuses unter Beibehaltung der Länge der PFM-Spitze zu erreichen. Die Charakterisierung der Böden für den Mole erfolgt über die Spitzenwiderstandsspannung aus Cone-

Penetrometermessungen mit einem Steigungswinkel von 60°. Um eine bessere Vergleichbarkeit der im folgenden ermittelten Ergebnisse zu erhalten, werden die Spannungen auf die Spitzen jeweils mit denen einer 60° Spitze normiert. Entsprechend normierte Größen sind mit $(\dots)_0$ notiert. Die Auflösung Γ der Partikel wurde gemäß [7] so gewählt, dass alle Spitzenvarianten der Co-Simulation das Kriterium $\Gamma \geq 9$ erfüllen.

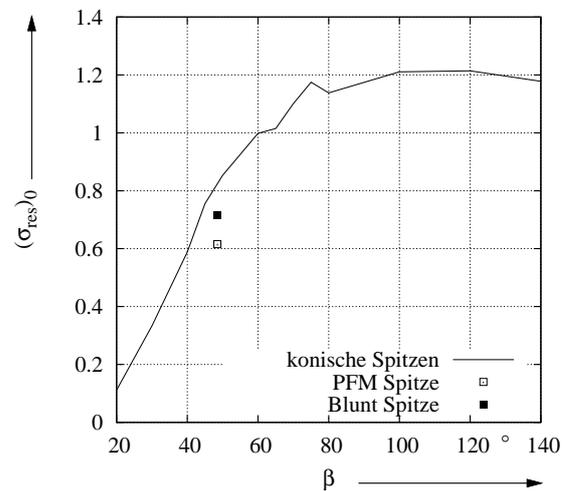


Bild 5 Auf eine 60° Spitze normierter Verlauf der Spitzenwiderstände für rheonome Fortbewegung

Gemäß dem von LICHTENHELDT ET AL. [7] vorgeschlagenen Ablauf der Co-Simulation sind zunächst DEM-Simulationen durchzuführen, in denen das Mole-Gehäuse rheonom bis auf die entsprechende Zieltiefe geführt wird, um die Gesamtsimulationsdauer gering zu halten. Dabei wird die Geschwindigkeit nach [7] als maximal zu erwartende Gehäusegeschwindigkeit während des Schlagprozesses gewählt. Da der Schlag in der Co-Simulation in 1 m Tiefe erfolgt, können diese Initialisierungssimulationen bereits für einen Vergleich herangezogen werden. Dies ermöglicht den Vergleich einer größeren Anzahl von Steigungswinkel als in der Co-Simulation, da nur der erste Schritt des Co-Simulationsprozesses aus [7] durchgeführt werden muss.

Bild 5 zeigt den normierten Eindringwiderstand $(\sigma_{res})_0$ über dem Profilwinkel. Wie zu erwarten ist steigt der Eindringwiderstand für stumpfere Spitzen. Erwähnenswert ist

dabei, dass ab 100° ein Plateau des Spitzenwiderstandes erreicht wird und dieser mit weiter zunehmendem Steigungswinkel nicht nennenswert ansteigt. Zusätzlich zu den konischen Spitzen sind auch die beiden nichtlinearen Spitzen mit ihrem äquivalenten Profilsteigungswinkel (berechnet aus Radius und Länge) dargestellt.

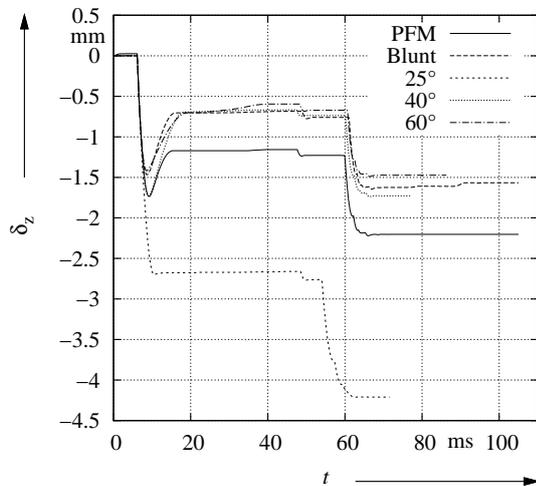


Bild 6 Penetrationstiefe während eines Schlagzyklus für verschiedene Spitzen

Die „Blunt“ Spitze zeigt bereits eine Senkung des Widerstandes gegenüber konischen Spitzen. Mittels der PFM-Spitze kann der Spitzenwiderstand weiter gesenkt werden und liegt auf dem Niveau einer 40° Spitze, bei der Länge einer 48.5° Spitze.

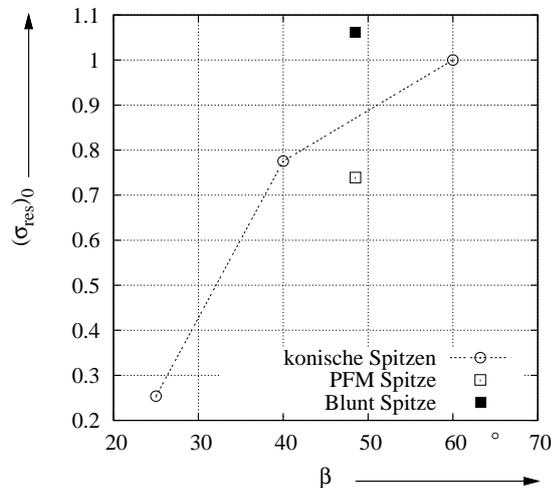


Bild 7 Auf eine 60° Spitze normierter Verlauf der maximalen Spitzenwiderstände für den ersten Schlag

Da jedoch zu erwarten ist, dass durch die feste Gehäusegeschwindigkeit das Bodenverhalten beeinflusst wird, erfolgen weitere Vergleiche am tatsächlichen Schlagzyklus in der Co-Simulation. Analog zum Vorgehen zur rheonomen Gehäusebewegung wird auch für die durchgeführten Co-Simulationen der Penetrationswiderstand $(\sigma_{res})_0$ verglichen. Dabei werden die Widerstandsspannungen während des ersten (**Bild 7**) und des zweiten Schlages (**Bild**

8) gesondert betrachtet. Für die konischen Spitzen werden die Beobachtungen aus dem vorherigen Vergleich qualitativ bestätigt, jedoch tritt eine geringere Senkung des Widerstandes für spitzere Winkel als 60° ein. Im Vergleich zu $\beta = 40^\circ$ zeigt die PFM-Spitze geringere Widerstandswerte. Im Bezug auf $\beta = 60^\circ$ ist jedoch auch hier die Widerstandssenkung geringer. Die „Blunt“ Spitze zeigt für beide Schläge ein gänzlich anderes Verhalten, ihre Widerstandswerte liegen über denen der 60° Referenzspitze. Für den zweiten Schlag bestätigen sich diese Beobachtungen. Es ändern sich lediglich einige Relationen zwischen den Varianten, so zeigt die PFM-Spitze im zweiten Schlag einen höheren Widerstand als die 40° Variante.

Bild 6 zeigt den Vergleich der Eindringtiefen der Varianten. Dabei werden die Erkenntnisse aus den Widerstandsdiagrammen größtenteils bestätigt. Analog zu den Ergebnissen aus **Bild 5** und **7** ist die PFM-Spitze performanter als die 40° Variante, wobei dies maßgeblich durch die stärkere Rückstellbewegung für $\beta = 40^\circ$ verursacht wird. Wie erwartet erreicht $\beta = 25^\circ$ die höchste Penetrationsleistung. Dies begründet sich zum einen in den niedrigeren Eindringwiderständen, als auch in der fast ausschließlich radial verlaufenden seismischen Wellenausbreitung (**Bild 10**).

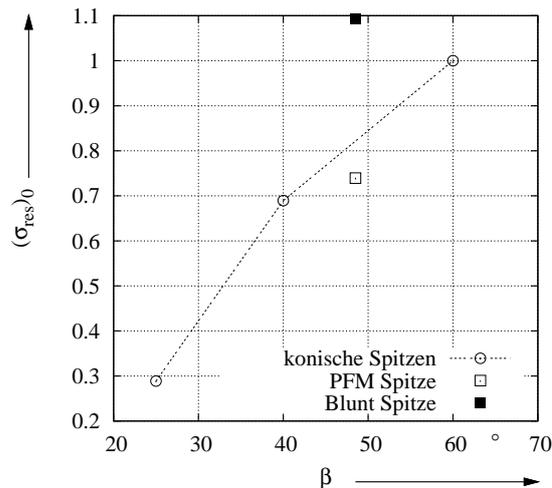


Bild 8 Auf eine 60° Spitze normierter Verlauf der maximalen Spitzenwiderstände für den zweiten Schlag

Durch diese radiale Ausbreitung ergibt sich eine geringere Vertikalkomponente der rückläufigen Welle und damit eine vernachlässigbare Rückstellbewegung. Wie in **Bild 9** zu sehen, steigt jedoch auch die Relativgeschwindigkeit von Hammer und Suppressor während Prozess II und damit die Lasten auf den Antriebsstrang. Da erhöhte Energieübertragung in diesem Kontakt gemäß [6] zu Problemen führen kann, bleibt zu prüfen ob die Lasten im zulässigen Bereich liegen. Weiterhin ist zu erkennen, dass der gesamte Schlagzyklus bereits 10 ms früher als in den anderen Varianten abgeschlossen ist. Die Geschwindigkeitsprofile der anderen Varianten unterscheiden sich hauptsächlich in der Ausprägung der Rückstellbewegung und -geschwindigkeit, sowie dem zeitlichen Auftreten von Prozess II.

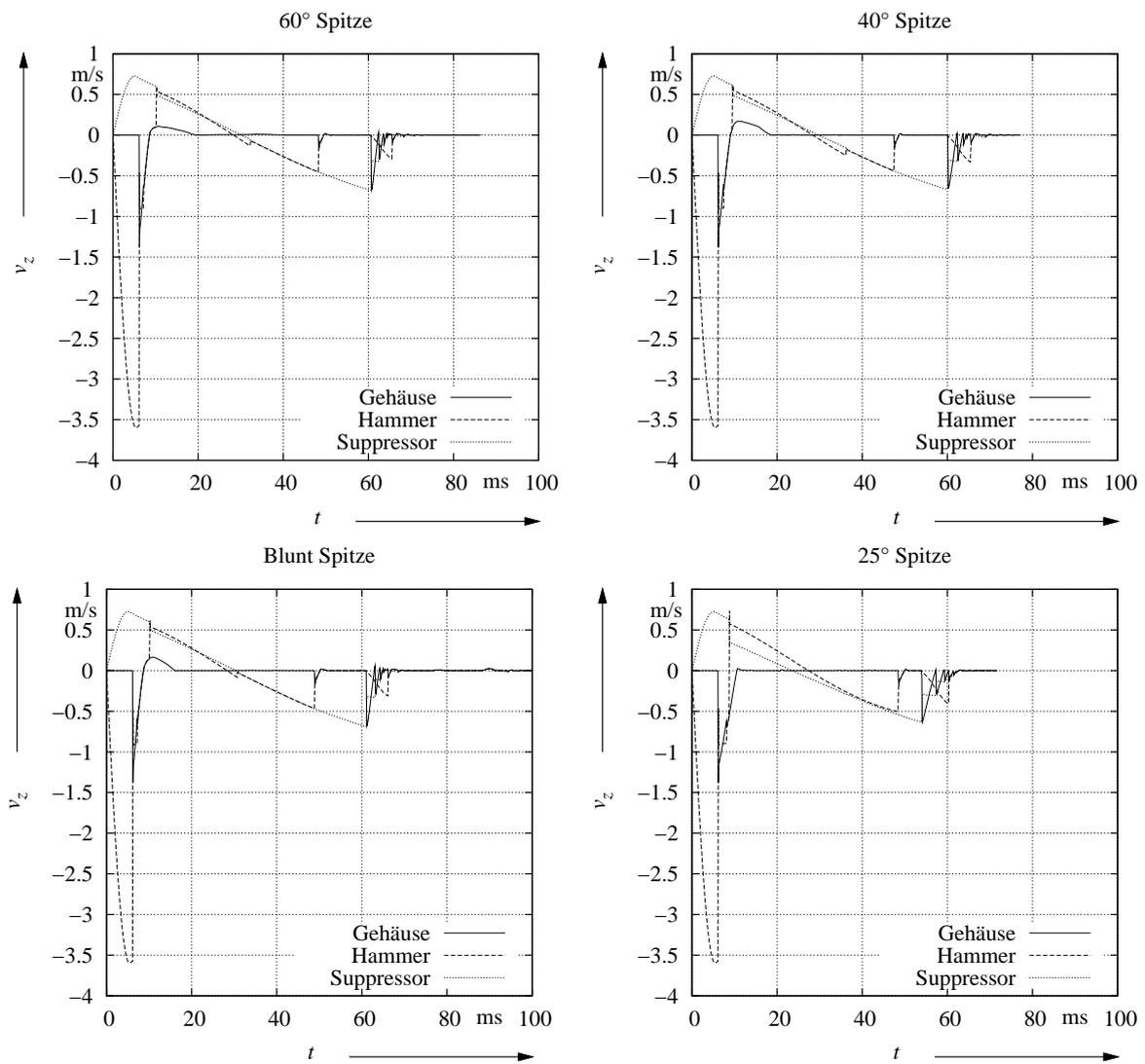


Bild 9 Geschwindigkeiten der drei Hauptmassen für verschiedene Spitzen

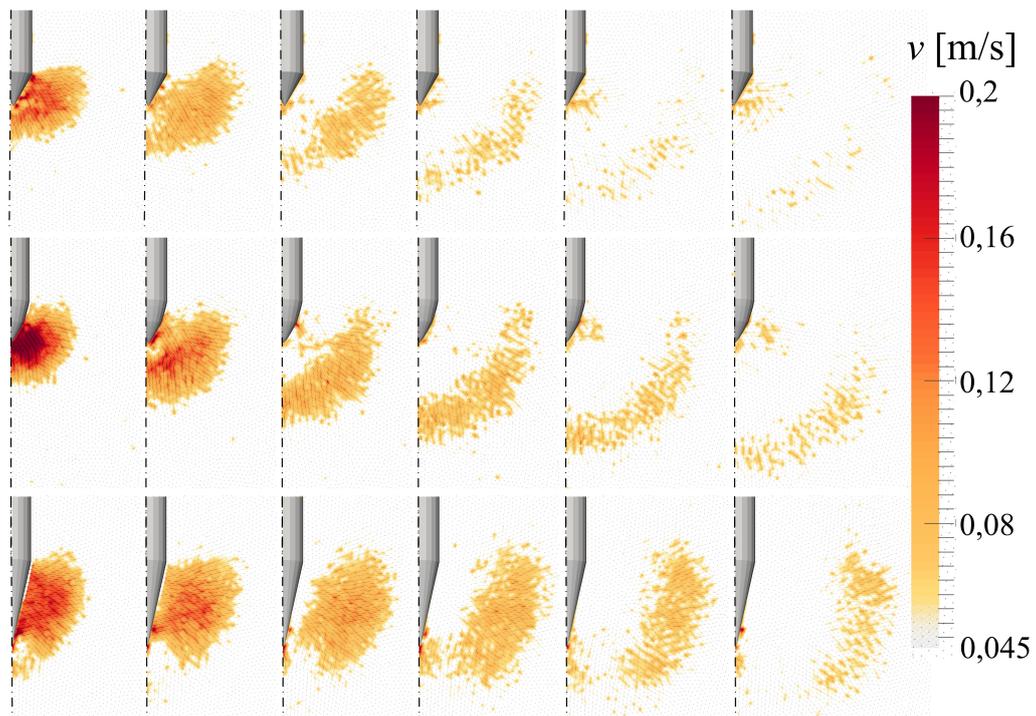


Bild 10 Geschwindigkeitsfelder im Boden 2-7 ms nach dem ersten Schlag für 60° (oben), PFM (mitte) und 25° (unten)

5 Zusammenfassung

Für Penetratorsysteme wie den HP³-Mole sind Änderungen der äußeren Geometrie am realen Prototyp mit großem Aufwand verbunden und nötige Bewertungsgrößen können nicht oder nur mit großem Aufwand gemessen werden. Zudem sind solche breit angelegten Messkampagnen durch die engen Zeitpläne planetarer Explorationsmissionen häufig nicht möglich. Um dennoch einen sinnvollen Kompromiss aus verbessertem Eindringverhalten, Randbedingungen für den Bauraum und minimierter Masse zu ermöglichen, wurden mit dem Co-Simulationsmodell aus [7] erste Untersuchungen zu den Einflüssen der äußeren Geometrie vorgenommen. Hierfür wurden sowohl für feste Gehäusegeschwindigkeiten als auch den eigentlichen Schlagprozess verschiedene konische Spitzen und nichtlineare Profilwinkelverläufe untersucht.

Dabei zeigt sich, dass vereinfachte Simulationen mit fester Eindringgeschwindigkeit, welche lediglich den ersten Schritt aus dem Co-Simulationsprozess nach LICHTENHELDT ET AL. [7] benötigen, bereits eignen, um erste Vergleiche anzustellen. Durch die beobachteten Abweichungen zum Verhalten während des Schlages, sollte jedoch die feste Geschwindigkeit auf die mittlere Penetrationsgeschwindigkeit während des ersten Schlages gesenkt werden. Für eine abschließende Beurteilung ist das Verhalten einer Vorauswahl von Varianten im Schlagprozess zu vergleichen. Mit diesem Vorgehen kann die Zeit für eine Simulationskampagne deutlich gesenkt werden.

Mit den erhaltenen Ergebnissen bestätigt sich die Vermutung, dass spitzere Steigungswinkel zu einem verbesserten Eindringverhalten von Mole-Penetratoren führen. Zudem konnte gezeigt werden, dass „projektilförmige“ Spitzen mit radial sinkendem Profilwinkel, konischen Spitzen gleicher Länge bei konstanter Geschwindigkeit überlegen sind. Jedoch wurde ebenfalls gezeigt, dass diese Form sich für schlaggetriebene Lokomotion als nachteilig erweist. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die aus Erfahrungen am „KRET“ [9] abgeleitete nichtlineare Spitze des Flugmusters des HP³-Mole den Penetrationswiderstand bei gleichem Bauraum um 10 bis 15% senken kann.

Für künftige Missionen und Mole Systeme sollten daher weitere geometrische Einflüsse der äußeren Form untersucht und optimiert werden.

6 Literatur

- [1] NASA InSight Homepage: <http://insight.jpl.nasa.gov>, checked 12/2013, NASA, 2013
- [2] Barnerdt, W.B. et al.: INSIGHT: A discovery mission to explore the interior of Mars. In: 44th Lunar and Planetary Science Conference, Texas, USA, 2013.
- [3] Spohn, T. et al.: INSIGHT: Measuring the martian heat flow using the Heatflow and Physical Properties Package (HP3). In: 43th Lunar and Planetary Science Conference, Texas, USA, 2012.
- [4] Spohn, T. et al.: Measuring the Martian heat flow using the Heatflow and Physical Properties Package (HP3). In: 45th Lunar and Planetary Science Conference, Texas, USA, 2014.
- [5] Lichtenheldt, R.; Schäfer, B.: Hammering beneath the Surface of Mars - Modellbildung und Optimierung des HP3-Mole. In: Proceedings of „10. Kolloquium Getriebetechnik“, pp. 169-186, ISBN 978-3-86360-065-5, Ilmenau, Germany, 2013
- [6] Lichtenheldt, R.; Schäfer, B.; Krömer, O.; van Zoest, T.: Hammering beneath the Surface of Mars - Forensic Engineering of failures in the HP³-Mole by applying multi-body dynamics simulation. In: Proceedings of 3rd International Conference on Multibody System Dynamics, ISBN 978-89-950027-7-3, Busan, Korea, 2014.
- [7] Lichtenheldt, R.; Schäfer, B.; Krömer, O.: Hammering beneath the surface of Mars - Modeling and simulation of the impact-driven locomotion of the HP³-Mole by coupling enhanced multi-body dynamics and discrete element method. In: Shaping the future by engineering: 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk:3 Technische Universität Ilmenau, Germany, 2014
- [8] Kletz, B.T.; Melcher, J.: SHOCK ISOLATION ON PLANET MARS. In: Proceedings of 13th European Conf. on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing, Braunschweig, Germany, 1-4 April 2014 (ESA SP-727, June 2014)
- [9] Grygorczuk, J.; Seweryn K.; Wawrzaszek R.; Banaszkiwicz M.: TECHNOLOGICAL FEATURES IN THE NEW MOLE PENETRATOR „KRET“. In: 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium - ESMATS 2009, Wien, Österreich 23-25 September, 2009
- [10] Seweryn, K. et al.: Low velocity penetrators (LVP) driven by hammering action - definition of the principle of operation based on numerical models and experimental tests. Acta Astronautica, 99, pp. 303-317, 2014
- [11] Seweryn, K. et al.: Determining the geotechnical properties of planetary regolith using Low Velocity Penetrometers. Planetary and Space Science, 99, pp. 70-83, 2014
- [12] Fleissner, F.: Pasimodo v1.15.0: software package and template files, Inpartik & ITM University of Stuttgart, Tübingen/Stuttgart, 2014