

Design, Kalibrierung und Betrieb der HP³ Wärmeflusssonde für die InSight Mars Mission

Design, Calibration, and Operations of the HP³ Heat Flow Probe for the InSight Mars Mission

M. Grott, DLR Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
T. Spohn, DLR Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
J. Knollenberg, DLR Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
N.T. Müller, DLR Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
C. Krause, DLR Nutzerzentrum für Weltraumexperimente, Linder Höhe, 51147 Köln

Kurzfassung

Die InSight Mission der NASA ist am 26. November 2018 in der Elysium Region des Mars gelandet und hat dort das erste geophysikalische Observatorium auf dem roten Planeten in Betrieb genommen. Die wissenschaftliche Nutzlast beinhaltet das sogenannte Heat Flow and Physical Properties Package (HP³), eine Wärmeflusssonde, die Temperatursensoren bis in eine Tiefe von 5 m in den Marsboden einbringen soll. Dort sollen dann der Temperaturgradient sowie die Wärmeleitfähigkeit im Marsboden gemessen werden, um daraus den oberflächennahen planetaren Wärmefluss abzuleiten. Darüber hinaus beinhaltet HP³ ein Radiometer, das die Oberflächentemperatur an der Landestelle überwacht. HP³ wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt und wird in Zusammenarbeit mit dem Jet Propulsion Laboratory der NASA betrieben.

Abstract

NASA's InSight Mars Mission landed in the Elysium region on November 26th, 2018, and installed the first geophysical observatory on the red planet. The scientific payload includes the Heat Flow and Physical Properties Package (HP³), a heat flow probe which will emplace temperature sensors to a depth of up to 5 m into the martian subsurface. It will measure the subsurface temperature gradient as well as the soil's thermal conductivity in order to derive the planetary surface heat flow. In addition, HP³ includes a radiometer to monitor the surface temperature at the landing site. HP³ was designed at the German Aerospace Center and is operated in cooperation with NASA's Jet Propulsion Laboratory.

1 Einleitung

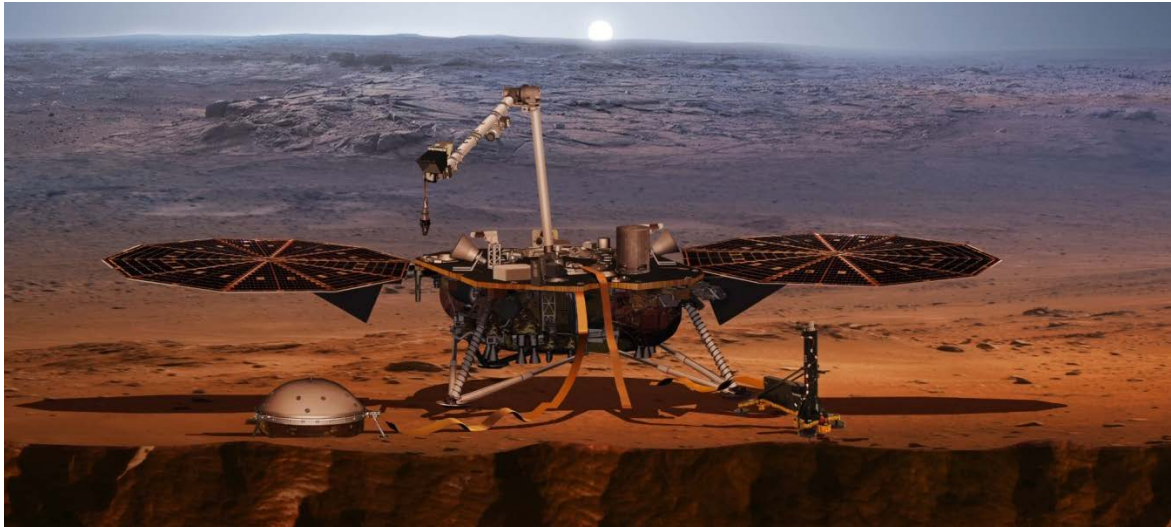


Abb. 1. Künstlerische Darstellung des NASA InSight Mars Landers. Das Seismometer ist links, HP³ rechts im Bild. Bild: NASA/JPL-Caltech

Die InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) Mission der NASA besteht aus einem geophysikalischen Observatorium (Abb. 1), das am 26. November 2018 in der Elysium Region des Mars gelandet ist. Die wissenschaftliche Nutzlast besteht neben einem Seismometer (SEIS - Seismic Experiment for Interior Structure) und einem Experiment zur Bestimmung des Rotationszustandes (RISE - Rotation and Interior Structure Experiment) aus dem Heat Flow and Physical Properties Package (HP³), einer Wärmeflusssonde, die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Ziel der Mission ist es, fundamentale geophysikalische Parameter, wie unter anderem Kerngröße, Krustendicke und planetarer Wärmefluss zu bestimmen, um so durch Vergleich mit anderen terrestrischen Planeten etwas über die Entstehung und Entwicklung der Planeten des Sonnensystems zu lernen.

Neben der wissenschaftlichen Hauptnutzlast befinden sich eine Reihe weiterer Sensoren an Bord des InSight Landers, deren Aufgabe darin besteht, die Verhältnisse an der Landestelle zu charakterisieren und somit Kontextinformationen für die Interpretation der gewonnenen Daten zu liefern. Das APSS Paket (Auxiliary Payload Sensor Suite) beinhaltet dabei eine Wetterstation (TWINS - Temperature and Winds for InSight), sowie ein Fluxgate Magnetometer (IFG - InSight FluxGate). Der Lander verfügt darüber hinaus über einen robotischen Arm (IDA – Instrument Deployment Arm) sowie zwei Kameras (IDC – Instrument Deployment Camera und ICC – Instrument Context Kamera), die für das Aussetzen der Instrumente auf der Marsoberfläche benötigt wurden. In diesem Beitrag werden wir einen Überblick über das Design sowie die Kalibrierung der HP³ Wärmeflusssonde sowie des HP³

Radiometers geben und kurz auf den Betrieb des Instruments nach der Landung im November 2018 eingehen.

2 Instrumentenbeschreibung

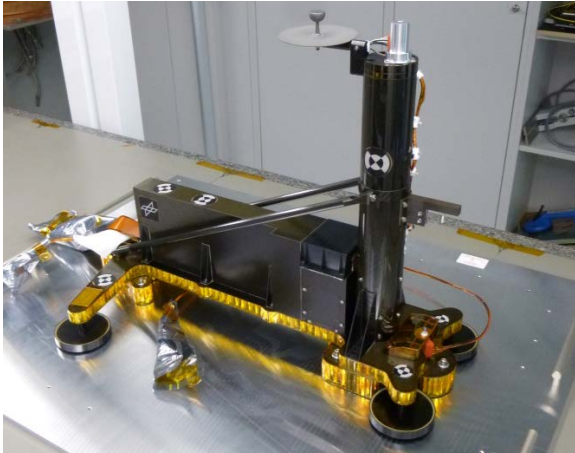


Abb. 2. Flugmodell der HP³ Wärmefluss-sonde. Der Hammermechanismus befindet sich in der Röhre rechts im Bild, das mit Temperatursensoren bestückte Kabel befindet sich im flachen Container links.



Abb. 3. Flugmodell des HP³ Radiometers. 6 Thermopile Sensoren messen den von der Oberfläche emittierten Strahlungsfluss. Die Blende kann zur Überprüfung der Kalibrierung beheizt werden.

Das Heat Flow and Physical Properties Package (HP³, Abb. 2, siehe auch [1, 2, 3] für eine ausführliche Beschreibung des Instrumentendesigns) ist ein Instrument zur Bestimmung des planetaren Oberflächenwärmeflusses, der nach dem Fourier'schen Gesetz als das Produkt von Wärmeleitfähigkeit k und Temperaturgradient dT/dz gegeben ist:

$$F = k \frac{dT}{dz}$$

HP³ misst den Temperaturgradienten im Boden mit Hilfe von 14 PT100 Temperatursensoren, die auf einem Flachbandkabel montiert sind. Das Kabel wird dabei vom HP³ Mole, einem Penetrator mit integriertem Schlagmechanismus, bis zu einer Tiefe von 5 m in den Boden eingebracht und soll die Temperaturen für ein Marsjahr (ungefähr 2 Erdjahre) messen. Die Wärmeleitfähigkeit wird dabei mit Hilfe einer transienten Methode gemessen, indem der Mole Penetrator als modifizierte Line Heat Source (LHS) betrieben wird. Die Bestimmung der Leitfähigkeit findet dabei in Tiefenintervallen von 50 cm statt.

Um die Tiefe der Sonde zu bestimmen, wird der Eindringwinkel mit Hilfe von im Mole integrierten Neigungsmessern bestimmt, während gleichzeitig der Molefortschritt durch Überwachen der Kabellänge bestimmt wird. Auf diese Weise kann der Pfad des Moles als Funktion der Zeit rekonstruiert werden, so dass sowohl die Tiefe der Wärmeleitfähigkeitsmessungen als auch die Positionen der PT100 Sensoren bekannt sind.

Neben der Messung des Temperaturgradienten im Boden und der Wärmeleitfähigkeit misst das HP³ Radiometer (Abb. 3) die Oberflächentemperatur an der Landestelle, um die Einstrahlung und damit die Randbedingung für die Modellierung des Bodentemperaturprofils zu quantifizieren. Das Radiometer verfügt dabei über 2 unabhängige Gesichtsfelder, in denen die Temperatur in den Wellenlängenbereichen von 8-10 µm, 8-14 µm, und 15-19 µm gemessen wird. Hier kommen Bi_{0,87}Sb_{0,13} (Bismut-Antimon) Thermopile Sensoren mit einer elektromotorischen Kraft von 135 µV/K zum Einsatz. Der Radiometersensorkopf ist temperaturstabilisiert und kann an den Arbeitspunkten T = 238 K, 268 K und 298 K betrieben werden.

3 Kalibrierung

3.1 Kontakttemperaturmessung



Abb. 4. Versuchsaufbau zur Kalibrierung von Kontaktthermometern. Die Sensoren werden in einer Vergleichskalibrierung gegen ein Sekundärstandardreferenzthermometer (Hart Scientific 5615) im Kalibrierbad (Hart Scientific 7318) im Bereich -70°C bis +55°C kalibriert. Die Widerstandsmessungen werden auf kalibrierte Referenzwiderstände (Burster-1240) zurückgeführt.

Die PT100 Sensoren zur Messung des Temperaturgradienten im Boden wurden nach der Integration auf dem Flachbandkabel im Temperaturbereich von -70°C bis +55°C im Thermallabor des DLR kalibriert. Die Gültigkeit der Kalibrierung des für die Vergleichskalibrierung genutzten Sekundärstandard Referenzthermometers (Hart Scientific 5615) wurde mit Hilfe einer H₂O-Trippelpunktzelle (TPW, 273.1600 K) und einer Gallium Schmelzpunktzelle (Ga-Zelle, 302.9146 K) verifiziert. Die Sensoren wurden daraufhin im Kalibrierbad (Hart Scientific 7318, Thermalfluid Galden HT110) gegen das Referenzthermometer im genannten Temperaturbereich kalibriert (Abb. 4). Die Messdaten wurden mit einem Agilent 34907A Datenlogger erfasst und zwei DAkKS-kalibrierte Referenzwiderstände (Burster-1240, 100 Ohm, sowie Burster-1240, 50 Ohm) wurden zur Korrektur von Offset und Gain simultan mitgemessen. An jedem der Kalibrierpunkte im Intervall wurde eine Haltezeit von 45 min eingehalten und die Messwerte wurden für die letzten 5 min des Plateaus gemittelt.

Der ermittelte Kennlinie $R(T)$ der PT100 Sensoren wurde dann mit Hilfe der Callendar-van Dusen Gleichung angepasst, wobei

$$R(T) = R_0[1 + AT + BT^2 + (T - 100)CT^3]$$

im Bereich $T < 0^\circ\text{C}$ und

$$R(T) = R_0[1 + AT + BT^2]$$

für $T \geq 0^\circ\text{C}$ angenommen wurde. Somit wurden die Kalibrierkoeffizienten A , B und C für alle 14 Sensoren bestimmt.

Die Messunsicherheit [4] der absoluten Temperatur σ_{abs} des HP3 Instrumentes ergibt sich dann aus

$$\sigma_{abs} = \sqrt{\sigma_{el}^2 + \sigma_{res}^2 + \sigma_{Therm}^2 + \sigma_{stab}^2 + \sigma_{hom}^2 + \sigma_{CvD}^2}$$

wobei σ_{el} der Beitrag des Elektronikrauschens, σ_{el} der Beitrag der Messunsicherheit der Referenzwiderstände, σ_{Therm} der Beitrag der Messunsicherheit der Referenzthermometer, σ_{stab} der Beitrag durch die Temperaturschwankungen im Kalibrierbad, σ_{hom} der Beitrag durch die Temperaturinhomogenität des Kalibrierbades, und σ_{CvD} der Beitrag der Abweichungen von der Callendar-van Dusen Gleichung darstellen. Es ergibt sich eine Messunsicherheit von 20 mK, wobei Temperaturunterschiede zwischen 2 Sensoren mit einer Unsicherheit von 10 mK ($2\text{-}\sigma$) bestimmt werden können. Eine detaillierte Diskussion der Auswahl der Temperatursensoren, der Sensorstabilität, sowie der Kalibrierung des Instrumentes findet sich in [5].

3.2 Wärmeleitfähigkeitsmessung

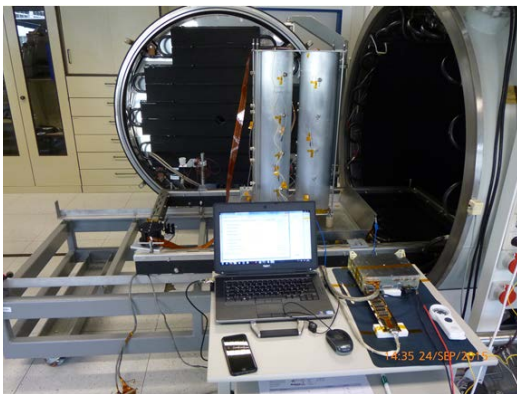


Abb. 5. Versuchsaufbau zur Verifikation des Thermalmodells. Der HP³ Mole befindet sich im linken Zylinder, der Referenzstreifen (THS – Transient Hot Strip) befindet sich im rechten Zylinder. In der Vakuumkammer wurden Versuche im Bereich 0 – 1000 mbar durchgeführt. Die Datenerfassung wurde mit Hilfe der HP³ Elektronik realisiert.

HP³ misst die Wärmeleitfähigkeit des Marsbodens mit einem transienten Verfahren, indem der HP³-Mole Penetrator als modifizierte Line Heat Source [6] betrieben wird. Dabei wird eine kontrollierte Wärmemenge in den Boden abgegeben und die Temperatur der Sonde gemessen. Aufgrund der Geometrie des Moles ist für die Interpretation der Messung keine einfache analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung möglich, so dass auf ein numerisches Modell [5] zurückgegriffen werden muss. Dieses bestimmt den

Temperaturanstieg der Sonde als Funktion der Heizleistung Q , der Bodenwärmeleitfähigkeit k , dem Verhältnis der Wärmekapazitäten von Mole und Boden S , dem thermischen Kontaktwiderstand H , und der Zeit t , wobei

$$\Delta T(Q, k, S, H, t) = C_1(Q, k, S, H) \ln(t) + C_2(S, H)$$

Die Wärmeleitfähigkeit k wird dann durch Parametervariation bestimmt.

Um das thermische Modell zu verifizieren, wurden Versuche mit granularem Material (PMMA Granulat) unter variierenden Druckbedingungen durchgeführt (Abb. 5), wobei die Wärmeleitfähigkeit des Granulat in einem Kontrollaufbau mit Hilfe eines Referenzverfahrens (Transient Hot Strip, siehe auch [7]) bestimmt wurde.

Die Unsicherheit der Wärmeleitfähigkeitsmessung σ_k ist dann gegeben als

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_{Temp}^2 + \sigma_Q^2 + \sigma_S^2 + \sigma_H^2 + \sigma_{mod}^2 + \sigma_{THS}^2}$$

wobei σ_{Temp} der Beitrag der Unsicherheit der Temperaturmessung, σ_Q der Beitrag der Messunsicherheit der Heizleistung, σ_S der Beitrag der Unsicherheit der Wärmekapazitäten, σ_H der Beitrag der Unsicherheit des thermischen Kontaktwiderstandes, σ_{mod} der Beitrag durch Abweichungen vom Thermalmodell, und σ_{THS} der Beitrag der Unsicherheit der THS Referenzmessung darstellen. Insgesamt kann somit eine Messunsicherheit von 8% (2- σ) erreicht werden.

3.3 Radiometrische Oberflächentemperaturmessung

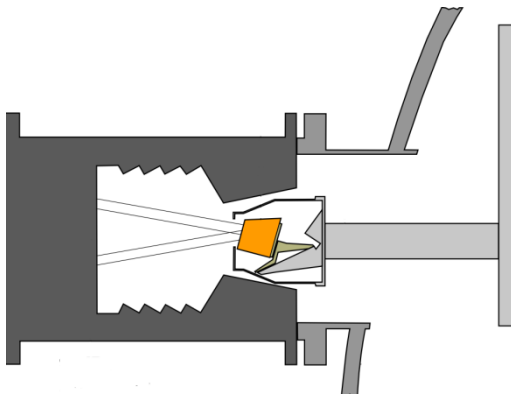


Abb. 6. Schematischer Versuchsaufbau zur Kalibrierung des HP³ Radiometers. Die beiden Gesichtsfelder des Radiometers werden vom BB100 Hohlraumstrahler [i] komplett ausgefüllt. Die Kalibrierung fand unter 8 mbar Argon Atmosphäre im Bereich -150°C bis +30°C statt. Die Temperaturumgebung des Radiometers wurde gesondert über einen Kühlfinger geregelt.

Das HP³ Radiometer wurde in der Weltraumsimulationsanlage (WSA) des DLR Instituts für Optische Sensorsysteme mit einem Hohlraumstrahler (BB100, siehe auch [8]) im Temperaturbereich von -150°C bis +30°C radiometrisch kalibriert [9]. Um die Messsituation am Mars realistisch nachzustellen, wurde die thermische Umgebung des Radiometers mit Hilfe eines Strahlungsschildes innerhalb der WSA simuliert, und Experimente wurden unter 8 mbar Argonatmosphäre durchgeführt (Abb. 6). Der Arbeitspunkt des Radiometers selbst wurde dabei von der HP³ Elektronik temperaturstabilisiert. Offsets der Thermopilesignale, die größtenteils durch verbleibende Temperaturinhomogenitäten innerhalb des Sensorkopfes

verursacht werden, wurden dabei mit Hilfe des zur Temperaturkontrolle benötigten Heizstromes quantifiziert. Insgesamt ergibt sich damit eine Messunsicherheit der Helligkeitstemperatur von

$$\sigma_{TB} = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_H^2 + \sigma_C^2 + \sigma_I^2 + \sigma_{mod}^2}$$

wobei σ_S der Beitrag durch die Unsicherheit der Sensor Sensitivität, σ_H der Beitrag durch die Messunsicherheit der Heizerkorrektur, σ_C der Beitrag durch den Offset, σ_I der Beitrag durch die Messunsicherheit des Heizstromes, und σ_{mod} der Beitrag durch die Abweichungen vom Instrumentenmodell darstellen. Die Messunsicherheit beträgt dabei in den Breitbandkanälen (8-14 μm) 3 K (2- σ) bei den höheren Tagtemperaturen und 6 K nachts. Die schmalbandigeren Sensoren (8-10 μm sowie 15-19 μm) erreichen aufgrund des geringen Signal-zu-Rausch Verhältnisses und aufgrund von Offsets, die durch Temperaturinhomogenitäten im Sensorkopf verursacht werden, tagsüber lediglich Messunsicherheiten von 5 K und 16 K. Diese Sensoren sind aufgrund der relativ großen Offsetspannungen zum Messen von Nachttemperaturen ungeeignet.

4 Betrieb



Abb. 7. Bild der Umgebung der Landestelle, aufgenommen von der ICC am Marstag (Sol) 103. Blick vom Lander nach Süden. HP³ wurde im östlichen, das Seismometer im westlichen Teil des Arbeitsbereiches ausgesetzt. Bild: NASA/JPL-Caltech.

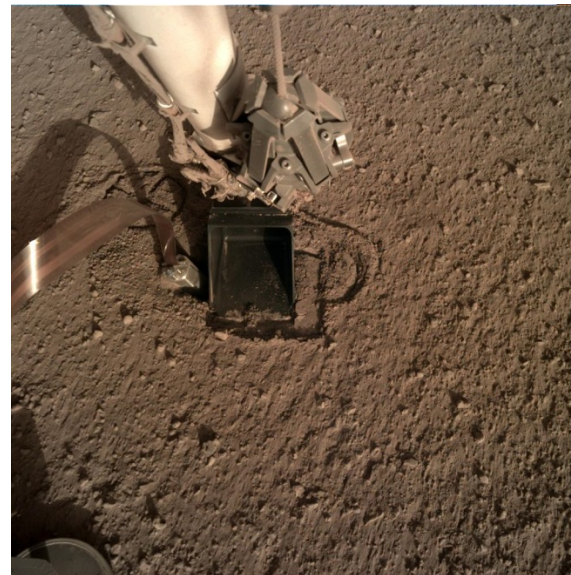


Abb. 8. Bild der HP³ Wärmeflusssonde, aufgenommen von der IDC am Marstag (Sol) 320. Der HP³ Mole ist fast vollständig im Boden versenkt und über das Flachbandkabel mit dem Lander verbunden. Bild: NASA/JPL-Caltech.

Nach der Landung am 26. November 2018 wurde die Umgebung des InSight Landers zunächst kartiert, um geeignete Stellen für das Aussetzen des Seismometers und das Aussetzen der HP³ Wärmeflusssonde zu identifizieren. Hierbei wurde angestrebt, die Instrumente möglichst weit vom Lander entfernt zu platzieren, um Störeinflüsse zu minimieren. Abb. 7 zeigt die ausgebrachten Instrumente (HP³ links, SEIS rechts im Bild) in einer Aufnahme der ICC. Die Versuche, die HP³ Sonde in den Marsboden eindringen zu lassen, begannen am 1. März 2019, wobei der Tiefenfortschritt allerdings nach ca. 30 cm zum Erliegen kam. Da weitere Hammerversuche erfolglos blieben wurde beschlossen, die HP³ Haltestruktur vom Mole zu entfernen, um zu einer besseren Einschätzung der Situation zu kommen und mit dem Roboterarm direkt mit dem Mole interagieren zu können. Nach detaillierter Planung wurde die Haltestruktur dann am 1. Juli 2019 entfernt. Nachdem fehlende Reibung am Mole und damit ein ungenügendes Abfangen des Rückstoßes als Problem identifiziert wurde, wurde der Roboterarm benutzt, um die Kräftebilanz an der Molehülle zu verbessern. Dies führte zum Erfolg und der Mole konnte in seiner vollen Länge (40 cm) im Boden versenkt werden (25. Oktober 2019, Abb. 8). Nach zwischenzeitlichen Rückschlägen werden die Planungen, den Mole bis zu seiner Zieltiefe von 5 m zu versenken, nun weiter verfeinert.

Parallel zu den Aktivitäten des HP³ Moles hat das HP³ Radiometer die Oberflächentemperatur in der Nähe der Landestelle nahezu kontinuierlich vermessen. So konnte der Einfluss des Landers sowie der Jahreszeiten quantifiziert werden, an der Interpretation der Messergebnisse wird zur Zeit gearbeitet. Insbesondere der Einfluss eines globalen Staubsturmes auf die Oberflächentemperaturen und die Beobachtung der Phobos Mondfinsternis am 6. März 2019 lassen hierbei Rückschlüsse auf die Transmissivität der Atmosphäre sowie die thermophysikalischen Eigenschaften des Bodens zu. Eine Chronologie der Ereignisse am Mars findet sich im Missionslogbuch [10].

5 Literatur

- [1] T. Spohn et al., The Heat Flow and Physical Properties Package (HP3) for the InSight Mission, Space Science Reviews, 96, 214, 5, Doi: 10.1007/s11214-018-0531-4, 2018.
- [2] O. Krömer et al., Design details of the HP3 mole onboard the InSight mission. Acta Astronautica, 164, 152 – 167, DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.06.031, 2019.
- [3] T. Wippermann et al., Penetration and performance testing of the HP³ Mole for the InSight Mars mission. Planetary and Space Science, DOI: 10.1016/j.pss.2019.104780, 2019.
- [4] GUM, Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM, 100:2008, 2008.

- [5] M. Grott et al., Calibration of the Heat Flow and Physical Properties Package (HP³) for the InSight Mars Mission. Earth and Space Science, Doi: 10.1029/2019EA000670, 2019.
- [6] U. Hammerschmidt, W. Sabuga, Transient Hot Wire (THW) Method: Uncertainty Assessment, International Journal of Thermophysics, 1255-1278, 21, 6, Doi: 10.1023/A:1006649209044, 2000.
- [7] U. Hammerschmidt, W. Sabuga, Transient Hot Strip (THS) Method: Uncertainty Assessment, International Journal of Thermophysics, 217-248, 21, 1, Doi: 10.1023/A:1006621324390, 2000.
- [8] V.I. Saprisky et al., Blackbody sources for the range 100 k to 3500 k for precision measurements in radiometry and radiation thermometry, AIP Conference Proceedings, 619-624, Doi: 10.1063/1.1627196, 2003.
- [9] N. Müller et al., Calibration of the HP³ radiometer on InSight, Earth and Space Science, submitted.
- [10] T. Spohn, The InSight mission logbook, accessed 22.12.2019, https://www.dlr.de/blogs/en/desktopdefault.aspx/tabid-5893/9577_read-1090/

Kontakt: Dr. Matthias Grott, matthias.grott@dlr.de, +49 30 67055 419