

Wetter und Klima auf dem Mars mit authentischen Daten selbst erkunden

In Bezug auf den Beitrag „Staubteufel auf der Marsoberfläche“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 2/2026, Rubrik: Nachrichten, S. 16, WIS-ID: 1571320, Zielgruppe: Oberstufe

Simon F. Kraus

Der Mars steht derzeit wieder verstärkt im Fokus als das wahrscheinlichste Ziel einer ersten bemannten interplanetaren Mission. Schon lange werden die klimatischen Verhältnisse und seit einigen Jahren auch die lokalen Witterungsbedingungen unseres äußeren Nachbarplaneten durch Sonden im Orbit und robotische Missionen auf der Oberfläche beobachtet. Im Beitrag wird aufgezeigt, wie die Daten dieser Missionen abgerufen werden können, um daraus Rückschlüsse auf die lokalen und planetenweiten Verhältnisse hinsichtlich Temperatur, Druck und Windgeschwindigkeiten zu ziehen. Es wird daran demonstriert, wie authentische astronomische Daten so auch eine Bereicherung für den Geographieunterricht oder die Klimabildung darstellen können, wenn interplanetare Vergleiche zu den Grundlagen und Auswirkungen von Witterung und Klima angestellt werden.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planetologie, robotische Missionen	Authentische Daten , Rover , Messinstrumente , Mittlere Sonnenzeit , Wahre Sonnenzeit , Jahreszeiten des Mars , Curiosity , Perseverance
Physik	Wärmelehre, Mechanik	Temperatur , Konvektion , Strahlungstemperatur , Druck , Kinetische Energie
Fächer-verknüpfung	Informatik, Geographie	Programmieren , vergleichende Planetologie
Lehre allgemein	Kompetenzen Unterrichtsmittel Lehr-/Sozialformen	Arbeitsblätter, Aufgaben



Abbildung 1: Mehrere Staubteufel auf der Marsoberfläche, aufgenommen von einer Navigationskamera des Marsrovers Perseverance (Quelle NASA, gemeinfrei).

Authentische Daten

Die Verwendung authentischer Daten ist in der Astronomie mit weniger großen Hürden verbunden, als dies in anderen Wissenschaftsbereichen der Fall ist, da der Großteil der Daten – ggf. nach einer überschaubar langen Embargofrist – frei verfügbar ist. Die Nutzung derartiger Daten für den Unterricht liegt damit nahe und wird bereits seit vielen Jahren praktiziert (siehe beispielsweise Latußeck, 2019). Gegenwärtig erlebt die Nutzung derartigen Daten einen zusätzlichen Schub (Kraus, im Druck). Je nach dem Forschungsgebiet werden dabei unterschiedliche Ansätze genutzt, wobei sich zwei Grundströmungen unterscheiden lassen: 1) der direkte Einsatz von Rohdaten, wie sie aus Datenbanken abgerufen werden können und 2) die Nutzung von aufbereiteten Daten, um z. B. die Hürden der Kalibrierung zu umgehen, zu der vertiefte Kenntnisse der Instrumente notwendig sind.

Auch bei der Umsetzung im Unterricht zeichnen sich unterschiedliche Herangehensweisen ab. Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen, seien die folgenden Möglichkeiten genannt:

- 1) Die Verwendung von Daten auf Papier-Ausdrucken und deren händische Auswertung,
- 2) die Auswertung von Rohdaten oder bereits kalibrierten Datensätzen mit modernen, der astronomischen Fachwissenschaft weitgehend entsprechenden Methoden, wie z. B. selbst erstellten oder zu adaptierenden Python-Skripten,
- 3) die digitale Auswertung von kalibrierten Daten, die in Form von vorbereiteten Lernumgebungen und angepassten Tools (z. B. Jupyter-Notebooks, gesondert erstellte Software) erfolgt.

Es scheint sich dabei ein Trend einzustellen, der von der direkten und wissenschaftsnahen Auswertung durch selbst erstellte Skripte wegführt und sich mehr den vorbereiteten Lernumgebungen zuwendet. Dies wird häufig auf den Umstand zurückgeführt, dass hier der Fokus der Lerneinheiten auf der Interpretation aus der astronomischen Sichtweise liegt und technische Probleme (wie sie bei Programmieraufgaben auftreten können) damit in den Hintergrund treten (Kraus, im Druck). In diesem Beitrag werden bereits kalibrierte Daten verwendet, um keine unnötig großen Hürden aufzubauen (wobei auch die Kalibration selbst als wichtiger Schritt angesehen wird, der wertvolle Einsichten bereithalten kann!). Die Auswertung kann leicht an die individuellen Ziele des Unterrichts angepasst werden und sowohl mit den Mittel von Tabellenkalkulationssoftware oder auch mit Python-Skripten erfolgen. Auch die Arbeit mit den fertig aufbereiteten Diagrammen ist möglich und lenkt den Fokus direkt auf die Ebene der physikalischen oder geographischen Interpretation.

Hier soll es um eine Art von Daten gehen, die innerhalb der Astronomie eine Sonderrolle einnehmen. Typischerweise erfolgt die Datensammlung durch Teleskope oder andere Detektortechnologien (bspw. Gravitationswellen- oder Neutrinodetektoren), die allesamt passive Beobachtungen anstellen, d. h. es erfolgt keine Manipulation des Untersuchungsgegenstands. Dies ist die für die Astronomie (bzw. Astrophysik und Kosmologie) prägende Arbeitsweise (Kraus, 2023a). Die hier behandelten Daten stammen allerdings von Mars-Missionen (Abbildung 1), d. h. es wurden In-situ-Untersuchungen angestellt, wie sie bei bemannten und unbemannten Missionen auftreten können. Ein Blick auf die Strukturierung der Astronomie aus einer erkenntnistheoretischen Sicht (Abbildung 2) legt nun nahe, dass man sich mit der Verwendung solcher Daten aus der eigentlichen Domäne der Astronomie (wenn man das Fach über seine Methode definieren möchte) entfernt.

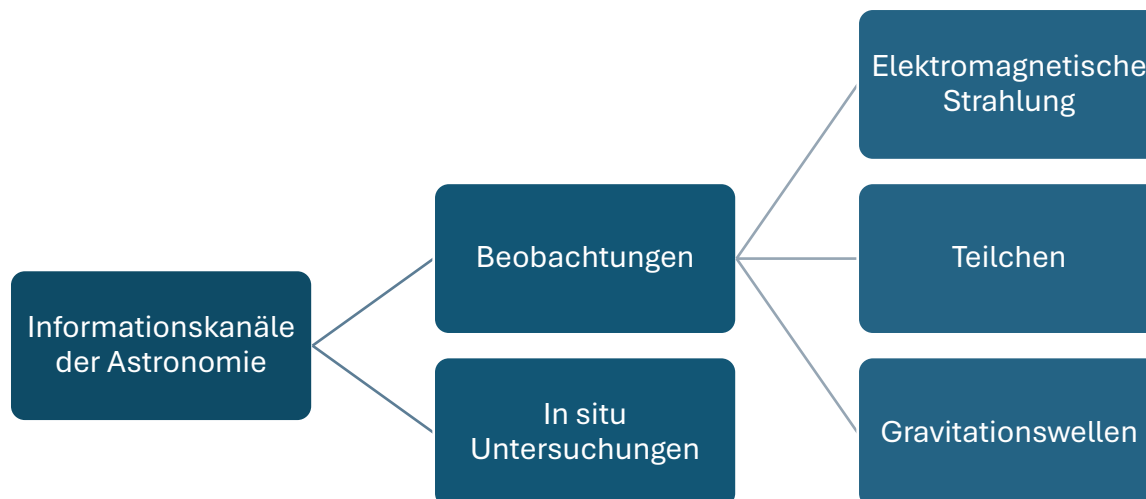


Abbildung 2: Struktur der Informationskanäle der Astronomie.

Bei den hier betrachteten meteorologischen Daten handelt es sich – analog zu klassischen Daten der Astronomie – jedoch ebenfalls um solche, die gesammelt werden, ohne einen manipulierenden Eingriff durchzuführen. Es handelt sich damit weiterhin um klassische Beobachtungsdaten, bei denen keine Abhängigkeiten unter kontrollierten und modifizierten Umgebungsbedingungen untersucht werden, sondern das System so betrachtet wird, wie es uns in seiner natürlichen Form begegnet. Dies bringt dann die übliche Schwierigkeit mit sich, dass ein Modell gefunden werden muss, welches recht viele Variablen besitzt und damit die natürlichen Verhältnisse hinreichend genau abbildet, um die wesentlichen Beobachtungen erklären zu können. Auch dies stellt eine Parallele zur modernen Astronomie und Astrophysik dar.

Vergleichende Planetologie als fächerübergreifendes Thema

Nicht nur in Zeiten, in denen die Astronomie zunehmend als eigenständiges Fach aus den Stundentafeln verschwindet, ist man bemüht, Ansätze für fächerübergreifenden Unterricht zu finden. Die Astronomie ist eine enorm vielfältige Disziplin, was sicherlich auch mit dem Umstand zu tun hat, dass sie die älteste Wissenschaft ist und auch damit, dass die Hürden für einen praktischen Zugang zu ihren Grundlagen sehr niedrig sind. Moderne und historische astronomische Forschung hat Anknüpfungspunkte daher in der Chemie, Biologie, Geologie, Informatik den Ingenieurwissenschaften und weiteren Fächern und auch die Querverbindungen zur Kunst und Literatur sind mannigfaltig.

Auch umgekehrt erscheint es sinnvoll, wenn andere Schulfächer astronomische Inhalte in ihre Lehrpläne aufnehmen. Dies gilt insbesondere auch für die Geographie, bei der sich eine große Schnittmenge mit Inhalten identifizieren lässt, die man auch in der Astronomie verorten könnte. Exemplarisch anhand des Lehrplans Geographie für die Schulen der Sekundarstufe I des Landes Baden-Württemberg sind dies:

- 1) Bewegungen von Erde und Mond (u. a. Entstehung von Tag und Nacht),
- 2) der Innere Aufbau der Erde,
- 3) typische Merkmale der Klimazonen der Erde (darin u. a. Schrägstellung der Erdachse, Äquator, Wendekreis, Polarkreis, Polartag, Polarnacht, Jahreszeiten),
- 4) Gezeiten (in den dynamischen Prozessen des Meeres enthalten).

Die Aufzählung beschränkt sich hier auf solche Inhalte, in denen die astronomischen Bezüge offensichtlich sind. Darüber hinaus existieren viele weitere Anknüpfungspunkte, wie etwa das Verständnis des irdischen Klimas, was ohne den astronomischen Blick auf das System Erde und die solar-terrestrischen Beziehungen nicht zu erreichen ist. Die vergleichende Planetologie zu nutzen, um daran auch mehr über die Gründe für die lebensfreundlichen Bedingungen auf der Erde zu lernen, erscheint daher als ein sinnvoller Ansatz. Auch das tiefergehende Verständnis – oder zumindest die entsprechenden Fragen – nach den Gründen, warum z. B. Berge nicht beliebig in die Höhe wachsen, sondern gewissen Höhenbeschränkungen unterliegen, lassen sich insbesondere dann erkennen und

beantworten, wenn der Blick über die irdischen Verhältnisse hinaus geweitet und auch andere Himmelskörper betrachtet werden.

Wetterdaten vom Mars

Aufgrund der relativ moderaten Umgebungsbedingungen auf seiner Oberfläche und seiner potenziell – zumindest vorübergehend – lebensfreundlichen Vergangenheit, rückte der Mars in den letzten Jahrzehnten wieder verstärkt in den Fokus der Weltraumforschung – nach einer Phase des starken Interesses, welches sich vor allem um die vermeintliche Sichtung der sogenannten Marskanäle herum entspann (Kraus, 2023b). Heute stehen vor allem die Erforschung der genauen Eigenschaften der Marskruste sowie die Vorbereitung auf weitere Lande- und Probenrückholmissionen im Vordergrund. Zu beiden Aspekten kann die Erhebung von Wetterdaten, bzw. von Daten zur Temperaturverteilung in den oberen Schichten des Marsbodens, beitragen.

Überblick früherer Missionen

Die Erhebung von Wetterdaten begann auf dem Mars mit der Mission Viking 1 (Landung: 1976), die Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung erfasste (siehe Tabelle 1 für eine vollständige Liste aller erfolgreichen Landeeinheiten, die bislang meteorologische Daten erhoben haben). Der Mars Pathfinder (1997) erweiterte diese Messdaten um ein zusätzliches Instrument für den Umgebungsdruck.

Tabelle 1 Liste bisher erfolgreich gelandete Marsmissionen, die Instrumente zur Erfassung der Witterungsbedingungen mitführten, mit Region der Landung, Landekoordinaten, der Höhe der Landestelle relativ zum Referenzellipsoid und den erfassten Größen aus dem Bereich der Meteorologie und verwandten Gebieten. Sortiert nach dem Jahr der Landung.

Mission / Landung	Landeregion	Koordinaten	Höhe	erfasste Größen
Viking 1 1976	Chryse Planitia	22° 16' N, 312° 3' O	–2690 m	- Temperatur - Windgeschwindigkeit - Windrichtung
Viking 2 1976	Utopia Planitia	47° 38' N, 225° 42' W	–4230 m	- Temperatur - Windgeschwindigkeit - Windrichtung
Mars Pathfinder 1997	Ares Vallis, Chryse Planitia	19° 7' N, 33° 13' W	–3681 m	- Temperatur - Windgeschwindigkeit - Windrichtung - Druck
Mars-Exploration- Rover-A (Spirit) 2004	Gusev-Krater, Elysium Planitia / Terra Cimmeria	14° 34' S, 175° 28' O	–1936 m	- Temperatur
Mars-Exploration- Rover-B (Opportunity) 2004	Eagle, Meridiani Planum	1° 57' S, 354° 28' O	–1387 m	- Temperatur
Phoenix 2008	Vastitas Borealis	68° 13' N, 125° 42' W	–4100 m	- Temperatur - Windgeschwindigkeit - Windrichtung - Druck - Staubanteile
Mars Science Laboratory (Curiosity) 2012	Elysium Planitia / Terra Cimmeria	4° 35' S, 137° 27' O	–4400 m	- Temperatur (getrennt für Oberfläche und Atmosphäre) - Windgeschwindigkeit - Druck - Feuchtigkeit - UV-Strahlung - Ionisierende Strahlung
InSight 2018	Elysium Planitia	4° 30' N, 135° 37' O	–2613 m	- Temperatur - Windgeschwindigkeit und -richtung - Druck - Wärmefluss - Magnetische Feldstärke

Mars (Perseverance) 2021	Syrtis Major	18° 27' N, 77° 27' O	−2600 m	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatur - Windgeschwindigkeit und -richtung - Druck - Feuchtigkeit - Ionisierende Strahlung - Größe und Form von Staubpartikeln - Umgebungsgeräusche
Tianwen-1 (Zhurong) 2021	Utopia Planitia	25° 4' N, 109° 56' O	−4100 m	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatur - Druck - Windgeschwindigkeit - Windrichtung - Magnetische Feldstärke - Umgebungsgeräusche

Eine vollständige Wetterstation trug dann wieder die Mission *Phoenix*, die bei 68° N landete, um die Polregion zu untersuchen. Die *Meteorological Station* (MET) bestand, neben den üblichen Instrumenten, zusätzlich aus einem LIDAR Scanner, mit dem es erstmal gelang, das atmosphärische Profil eines fremden Planeten von dessen Oberfläche aus zu erstellen. Das von diesem Instrument ausgesandte Licht wurde (durch Rayleigh- und Mie-Prozesse) an den Staub- und Eisteilchen der Atmosphäre gestreut und erlaubte so Rückschlüsse auf deren Verteilung in der planetaren Grenzschicht, in der Veränderungen, durch Reibung und Konvektion, auf Zeitskalen von Stunden eintreten. Auf der Erde liegt die obere Grenze dieser Schicht bei ca. 1,5 bis 2 km, während diese beim Mars – bedingt durch die starke Konvektion – bis zu 10 km hoch reicht.

Die Erfassung von Windstärke von -richtung erfolgte bei *Phoenix* mit einer Konstruktion, die von einem Windfaden, wie er bei Segelbooten verwendet wird, abgeleitet war. Dafür wurde eine extrem leichte Kapton-Röhre an einem Kevlarfaden aufgehängt, so dass die Konstruktion einem Tischtennisball-Anemometer gleicht, wie es auch leicht selbst hergestellt werden kann. Die Gesamtmasse der beweglichen Teile lag damit bei nur 10 mg, so dass auch die sehr dünne Marsatmosphäre noch zu feststellbaren Auslenkungen des Instruments führte (Gunnlaugsson et al., 2008; siehe auch Kraus, 2022).

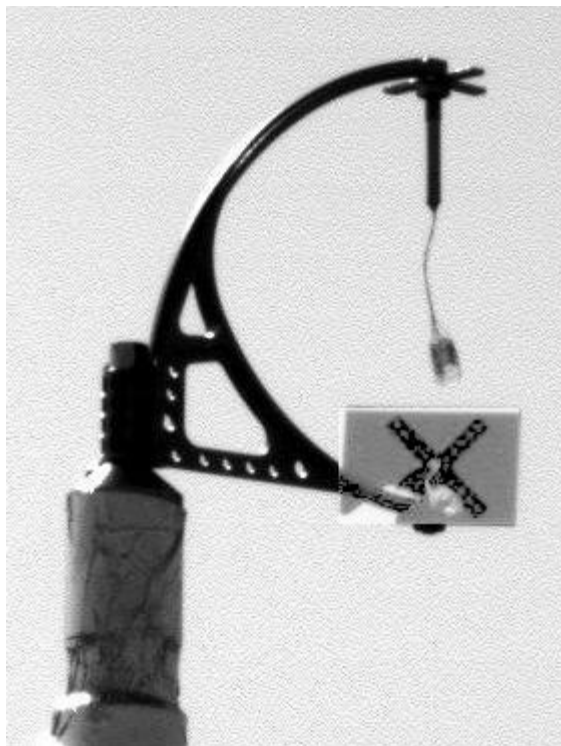


Abbildung 3:
Das sogenannte *tell-tale* zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung an Bord des Mars-Landers *Phoenix*. Der schräg angebrachte Spiegel zeigt die horizontale Abweichung des Massestücks gegenüber der Ruhelage (Quelle NASA, Lizenz: public domain).

In die Reihe der Missionen, die meteorologische Daten erheben, reiht sich dann auch das Mars Science Laboratory mit seinem Rover *Curiosity* ein. Neben Messungen von Temperatur, Druck und Windgeschwindigkeit kommen hier erstmals auch Instrumente für die atmosphärische Feuchtigkeit (der Begriff Luftfeuchtigkeit soll hier nicht verwendet werden, da der Begriff „Luft“ die spezifische atmosphärische Zusammensetzung der Erde bezeichnet) und die UV-Strahlung auf der Oberfläche des Mars zu Einsatz. Alle fünf (bzw. sechs, da die Messung der Oberflächen- und der Umgebungstemperatur getrennt erfolgen) Instrumente sind in der *Rover Environmental Monitoring Station* (REMS) vereint. Dazu kommt, wenn dies auch kein Themengebiet der Meteorologie darstellt, noch die Messung der ionisierenden Strahlung mit einem gesonderten Instrument, die auf dem Mars eine wesentliche Umgebungsvariable darstellt.

Auf der Basis der REMS basiert das Instrument *Temperature and Winds for InSight* (TWINS), welches auf der Mission *InSight* zum Mars reiste und dort vor allem die Datenanalyse des Seismometers unterstützen sollte, indem windinduzierte Erschütterungen korrigiert werden konnten (Spiga et al., 2018). Das Instrumente war gegenüber dem REMS weiterentwickelt worden, so dass die Messwerte mit höherer Frequenz als bisher aufgezeichnet werden konnten. Auch umgekehrt ließ sich mit den seismischen Messungen Atmosphärenwissenschaft betreiben, da sich sowohl hochfrequente (von Turbulenzen, Staubeufeln und Schwerewellen verursacht) und niederfrequente (atmosphärisches „Brummen“, durch thermische Gezeiten, planetarische Wellen oder die Hadley-Zellen hervorgerufen) Effekte nachweisen ließen (Spiga et al., 2018). Die zu erwartenden lokalen Windgeschwindigkeiten sind auch bei der Planung von zukünftigen Landemissionen ein wesentlicher Faktor (Li et al., 2021), so dass entsprechende Instrumente auf allen modernen Missionen mitgeführt werden.

Mit dem Rover Zhurong gesellte sich 2021 erstmals ein Fahrzeug zu den übrigen Missionen, welches nicht aus US-amerikanischer Produktion stammt. Auch hier ist mit der *Mars Climate Station* (MCS) ein komplexes Instrument zur Erfassung der Umgebungsbedingungen mit an Bord. Zusätzlich führt der Rover das Mars Rover Magnetometer mit, welches die Magnetfeldausrichtung in den Gesteinen im Detail untersuchen soll.

Datenabruf

Die Datenbereitstellung erfolgt bei Wetterdaten bedauerlicherweise weniger komfortabel, als dies bei astronomischen Daten sonst überwiegend der Fall ist. Es gibt i. d. R. keine Möglichkeit, diese über bekannte Portale wie VizieR zu durchsuchen, den Downloadumfang anzupassen und in auswählbaren Formaten abzurufen. Stattdessen müssen individuelle Lösungen gefunden werden. Die Daten des Instruments REMS des Rovers *Curiosity* werden beispielsweise von der New Mexico State University vorgehalten und sind über deren Website frei zugänglich (gleiches gilt auch für Perseverance). Die Verzeichnisstruktur selbst kann mit einem Webbrowser durchsucht werden. Da dort jeweils Daten für einen Tag gespeichert sind, ist für viele Szenarien der Abruf einer großen Zahl an Dateien notwendig, was sich sinnvoll nur mit Tools wie z. B. *wget* (frei verfügbar für sämtliche gebräuchliche Betriebssysteme) umsetzen lässt.

Beispielhaft lautet der Befehl für den Download der Daten aus dem ersten Verzeichnis (/SOL_00001_00089/, für Sol 1 bis 89):

```
wget -r -l2 --no-parent -nd -P d:/temp/data -e -A "**RMD*TAB"  
https://atmos.nmsu.edu/PDS/data/mslrem_1001/DATA/SOL_00001_00089/
```

Erläuterung zu wget:

- r -l2: Lädt die Dateien in den Unterordnern (bis zu zwei Ebenen (l2)) herunter.
- nd: Es werden keine Unterverzeichnisse auf dem lokalen Computer erstellt, d. h. alle Dateien werden in das gleiche Verzeichnis gespeichert, was die Datenanalyse über mehrere Dateien hinweg vereinfacht.
- no-parent: Kein Download aus darüberliegenden Verzeichnissen

-P d:/temp/data: Angabe des lokalen Verzeichnisses
-A "*RMD*TAB": Akzeptiert lediglich Dateien, die dem angegebenen Muster entsprechen
(-A als Kurzform von --accept)

Mit diesem Befehl werden sämtliche Dateien heruntergeladen, auf die die vorgegebene Namensstruktur passt, also z. B. die Datei „RME_400642348RMD003600000000_P9.TAB“. Im Falle dieses Beispiels umfasst der Download 82 Dateien, mit einer Gesamtgröße von 684 MB.

Erschließung der (Roh)Daten

Die hier gewählte Beschränkung auf Dateien mit der Buchstabenfolge RMD geschieht, um lediglich aufbereitete Daten herunterzuladen. Darin sind bereits verschiedene Korrekturen vorgenommen, wie z. B. die Berücksichtigung der Ausrichtung des Rovers (in Drehung und Neigung), die für die Bestimmung der Windrichtung notwendig ist. Auch alle anderen Größen sind in dieser Fassung der Daten um verschiedene Faktoren korrigiert, um unterschiedliche Umgebungseffekte oder instrumentelle Einflüsse (wie etwa die Abschattung verschiedener Instrumente durch den Rover selbst oder die Aufheizung seiner unmittelbaren Umgebung durch den Radioisotopengenerator) einzubeziehen.

Es gilt nun, zunächst sich einen Überblick über das heruntergeladene Material zu verschaffen. Bei den TAB-Dateien handelt es sich um gewöhnliche csv-Dateien, d. h. die einzelnen Spalten der Datei sind mit Kommas abgetrennt. Eine erste Inaugenscheinnahme kann, in komfortabler Form, beispielsweise mit dem freien Programm *Notepad++* erfolgen. Dabei fällt als erstes auf, dass in den Dateien keine Überschriften vorhanden sind. Die notwendigen Informationen zu den insgesamt 40 Spalten werden in einer gesonderten Datei, mit der Bezeichnung MODRDR6.FMT.txt auf dem [Server](#) bereitgehalten.

Mit Hilfe dieser Dokumentation wird dann deutlich, dass drei verschiedene Einträge für die Zeit vorhanden sind: **TIMESTAMP**, **LMST** und **LTST**. **TIMESTAMP** bezieht sich auf die Systemzeit des Rovers und ist eine fortlaufende Zahl, mit einem Nullpunkt am 1. Januar 2000. **LMST** ist die Local Mean Solar Time, d. h. die mittlere Sonnenzeit. **LTST** wiederum ist die Local True Solar Time, also die wahre Sonnenzeit, deren Angabe auch die Position des Rovers mit einbezieht, die Zeitgleichung (zum Prinzip der Zeitgleichung siehe z. B. Fischer & Müller, 2021) berücksichtigt und sich damit auf den Durchgang der Sonne durch den Meridian bezieht. Die zunächst ungebräuchlich erscheinende **LTST** kann gerade dann relevant sein, wenn lokale meteorologische Phänomene untersucht werden, die direkt mit dem Sonnenstand zusammenhängen, wie etwa der tägliche Temperaturgang oder auch die sich verändernden Druckverhältnisse oder Windrichtungen innerhalb eines Marstages.

Die beiden Zeitangaben **LMST** und **LTST** haben das Format SSSSMHH:MM:SS.sss, bzw. SSSSS HH:MM:SS.sss, wobei die fünf führenden „S“ die Sol-Nummer der Mission angeben, also die Anzahl der Marstage (die als Sol bezeichnet werden), seit die Mission auf der Planetenoberfläche aufgesetzt hat.

Spalte 4 enthält die Windgeschwindigkeit in horizontaler Richtung. Die Angabe erfolgt in Metern pro Sekunde. Ein Blick in verschiedene Daten-Dateien zeigt jedoch, dass die Windrichtung in den wenigsten Fällen aufgezeichnet wurde. Fehlende Werte werden allgemein mit dem Eintrag „UNK“ gekennzeichnet. Dies kommt insbesondere dann vor, wenn das entsprechende Instrument zum Zeitpunkt des Eintrags abgeschaltet war oder eine Sättigung des Instruments vorlag (teilweise sind auch NULL-Werte vorhanden, die entsprechend berücksichtigt werden müssen). Spalte 5 enthält nach dem gleichen Muster die Windgeschwindigkeit in vertikaler Richtung, während Spalte 6 die Windrichtung beinhaltet. Diese wird von Norden aus in Uhrzeigerrichtung gezählt und wird in Grad angegeben.

Deutlich mehr Messwerte sind für die Temperaturen vorhanden. Wahlweise kann hierfür auf die Rohdaten der beiden Messfühler (Spalte 12 und 14) oder direkt auf die daraus abgeleitete Umgebungstemperatur zurückgegriffen werden (Spalte 16). Spalte 8 enthält dazu die *Brightness Temperature*, also die Strahlungstemperatur der Oberfläche, die über drei, nach unten gerichtete, Thermoelemente erfasst wird (Sotomayor, 2019). Ebenfalls häufig erhoben werden die Messwerte zum Umgebungsdruck, die in Spalte 38 enthalten sind und wertvolle Einsichten in die Witterung und die jahreszeitlichen Änderungen bieten können.

Eine einfache Betrachtung der lokalen Verhältnisse in der Umgebung des Landesplatzes kann nun aus der Darstellung des täglichen Verlaufs der Temperatur sowie des Drucks bestehen. Dies kann über ein

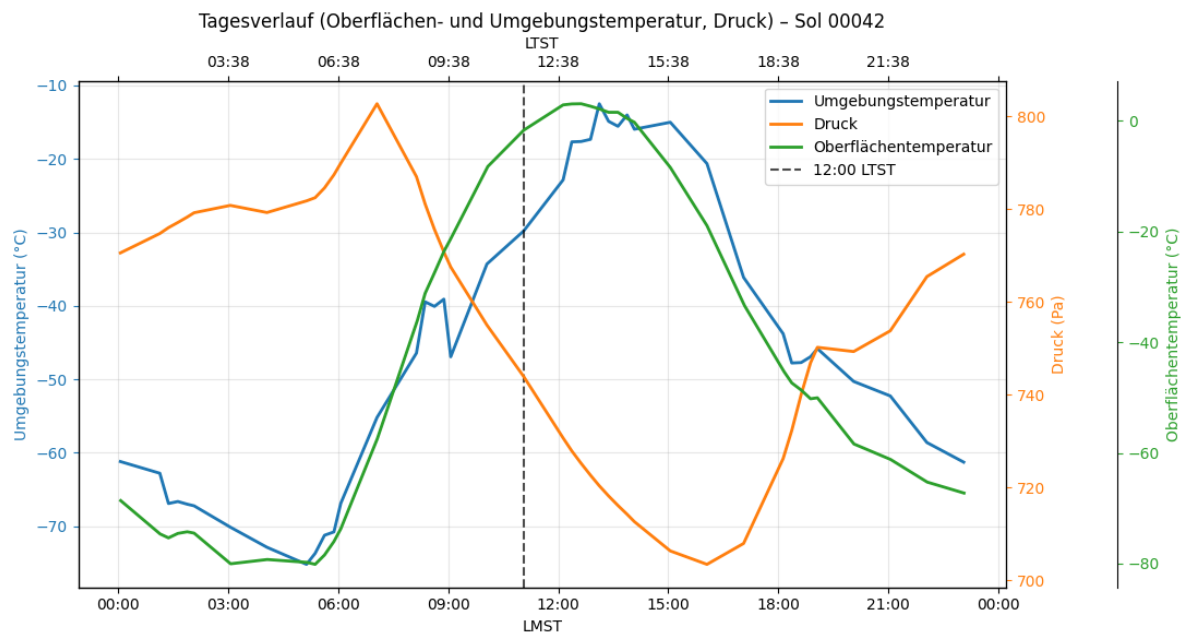


Abbildung 4: Verlauf von Umgebungs- und Oberflächentemperatur und des Drucks über einen zufällig ausgewählten Tag (Sol 42) hinweg. Generiert aus den Daten des Instruments REMS auf dem Rover Curiosity.

Python Script oder eine einfache Tabellenkalkulation geschehen. Für das hier gezeigt Beispiel wurden die beiden Zeitangaben (LMST und LTST) auf den x-Achsen dargestellt und zusätzlich der Meridiandurchgang der Sonne gesondert durch eine vertikale Linie markiert. Abbildung 4 zeigt einen solchen Verlauf für einen zufällig ausgewählten Tag (Sol 42). Deutlich zu erkennen ist, wie sich die Oberfläche gegenüber der Atmosphäre schneller erwärmt. Allerdings kühlt sie in den Abendstunden auch schneller aus als diese, was an dem extrem niedrigen Feuchtigkeitsgehalt liegt.

Eine weitere Auswertung kann in der langfristigeren Darstellung des Temperaturverlaufs bestehen. Dazu muss zunächst eine Vielzahl an täglichen Messdaten heruntergeladen werden.

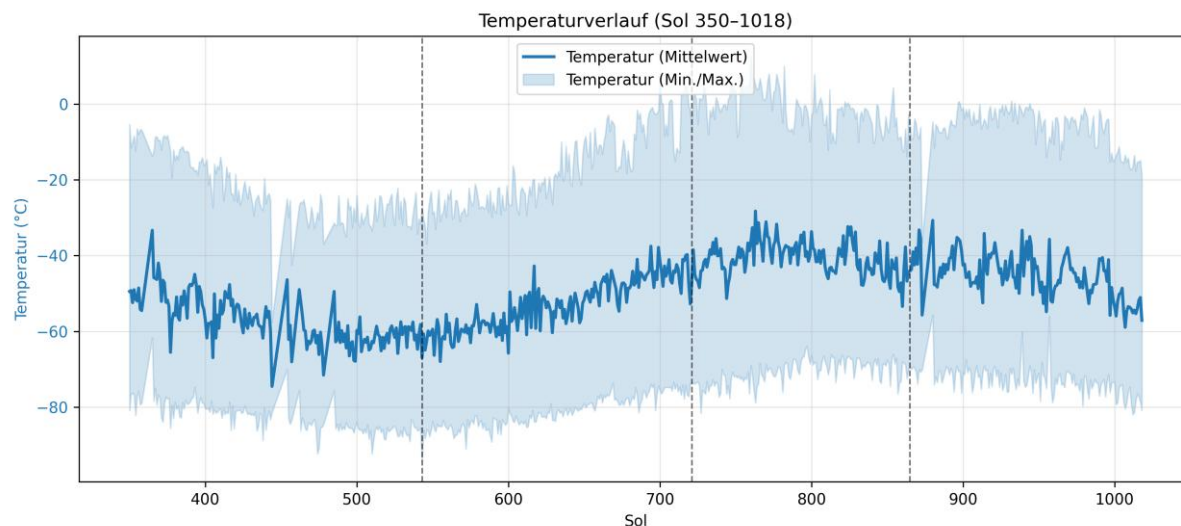


Abbildung 5: Darstellung des Temperaturverlaufs für ein Marsjahr (Sol 350 bis 1018). Das Startdatum (Sol 350) entspricht dem Frühlingsäquinoktium, das Enddatum (Sol 1018) dem nächst Frühlingsäquinoktium. Weitere Fixpunkte des Jahres sind markiert (vgl. Tabelle 2). Ausreißer bei den täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen sind auf Lücken in den Daten zurückzuführen. Erstellt aus den Daten des Rovers *Curiosity* bei 4° S.

Die Umlaufzeit des Mars um die Sonne liegt bei 687 Tagen, also grob 2 Erdjahren. Die Unterteilung der Jahreszeiten geschieht, analog zu den irdischen Jahreszeiten, durch die astronomischen Konstellationen, d. h. durch Tag- und Nachgleichen für den Frühlahr- und Herbstanfang sowie die Solstitien für den Beginn von Sommer und Winter. Anders ausgedrückt bestimmt die Länge der Sonne (L_s) die Aufteilung

des Jahres (The Planetary Society, o. D.). Beträgt die Länge der Sonne $L_s = 0^\circ$ steht sie im Frühlingspunkt und definiert den Beginn dieser Jahreszeit – bezogen auf die nördliche Hemisphäre. Tabelle 2 zeigt die Zeitpunkte des Beginns der Jahreszeiten auf dem Mars seit dem Beginn der MSL-Mission und etwas darüber hinaus.

Trotz des sehr äquatornahen Standorts von Curiosity (4° S) ist doch deutlich der Temperaturtrend der Jahreszeiten auszumachen. Die Differenz der mittleren Temperaturen liegt bei $\Delta \bar{T} \approx 20 \text{ K}$. Spitzenwerte zeigen im Sommer Temperaturen, die leicht über dem Gefrierpunkt von Wasser liegen. Im Winter kann die Temperatur dagegen auf unter -80°C absinken. Mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T \approx 80 \text{ K}$ liegt der Standort von Curiosity noch in einem Bereich von Temperaturschwankungen, wie sie auch bei kontinentalen Standorten auf der Erde angetroffen werden können, wo die jährlichen Minimal- und Maximaltemperaturen Unterschiede von über 100 K erreichen können. Auf dem Mars kommen jedoch noch deutlich extremere Temperaturunterschiede vor.

Tabelle 2: Übersicht der Jahreszeitenanfänge auf dem Mars über die Dauer der MSL-Mission (Curiosity) hinweg
(Quelle: [The Planetary Society](#)).

Frühjahrs- äquinoktium $L_s = 0^\circ$	Sommer- solstitium $L_s = 90^\circ$	Herbst- äquinoktium $L_s = 180^\circ$	Winter- solstitium $L_s = 270^\circ$
13.09.2011	30.03.2012	29.09.2012	23.02.2013
31.07.2013	15.02.2014	17.08.2014	11.01.2015
18.06.2015	03.01.2016	04.07.2016	28.11.2016
05.05.2017	20.11.2017	22.05.2018	16.10.2018
23.03.2019	08.10.2019	08.04.2020	02.09.2020
07.02.2021	25.08.2021	24.02.2022	21.07.2022
26.12.2022	12.07.2023	12.01.2024	07.06.2024
12.11.2024	29.05.2025	29.11.2025	25.04.2026
30.09.2026	16.04.2027	17.10.2027	12.03.2028

Druckverlauf

Plottet man den Verlauf des Drucks über einen Sol hinweg und vergleicht diesen Verlauf an verschiedenen Tagen, so findet sich ein wiederkehrendes Muster (siehe orange Kurve in Abbildung 4): In der zweiten Nachthälfte liegt der Druck auf einem recht hohen Niveau und steigt dann morgens nochmals an, um zwischen 8 und 9 Uhr morgens das tägliche Maximum zu erreichen. Danach fällt der Atmosphärendruck recht stark ab, bis sich um ca. 16 Uhr das absolute Tagesminimum einstellt. Dieses tägliche Muster im Druckverlauf wird von der Erwärmung der bodennahen Schichten durch die Sonneneinstrahlung hervorgerufen und als thermische Gezeiten (englisch: „thermal tide“) bezeichnet. Ein Vergleich zwischen dem Temperatur- und dem Druckverlauf zeigt, dass sich das tägliche Minimum des Drucks kurz nach der niedrigsten Temperatur des Tages einstellt. Danach führt die Konvektion zu einer Abnahme des Drucks, da die Luft beginnt aufzusteigen. Auch der Minimalwert des Drucks stellt sich mit einem kleinen zeitlichen Versatz zum Erreichen der Höchsttemperatur ein.

Abbildung 6 stellt dieses Muster dazu an zwei speziellen Tagen dar: Sol 924 markiert in etwa die Mitte des Winters auf der Nordhalbkugel und Sol 1302 entspricht der Mitte des Nord-Sommers. Um diese beiden Zeitpunkte herum dürfte die Marsatmosphäre ihre Extremwerte erreicht haben. Es zeigt sich, dass die Druckverhältnisse sich mit dem Wechsel der Jahreszeiten deutlich verändert haben und eine Differenz von ca. 100 Pa aufweisen. Allerdings entspricht das Ergebnis vielleicht nicht ganz den Erwartungen: Der Druck während des Nord-Sommers (Sol 1302) ist niedriger als während des Winters und nicht etwa höher (wie man es mit dem Sommer vielleicht zunächst assoziieren würde). Aus diesem Umstand lässt sich schließen, dass die südliche Polkappe mehr Kohlenstoffdioxid- und Wassereis speichert als die nördliche Polkappe. Im Nord-Sommer ist folglich mehr Masse in der südlichen Polkappe gebunden und der Atmosphärendruck sinkt ab.

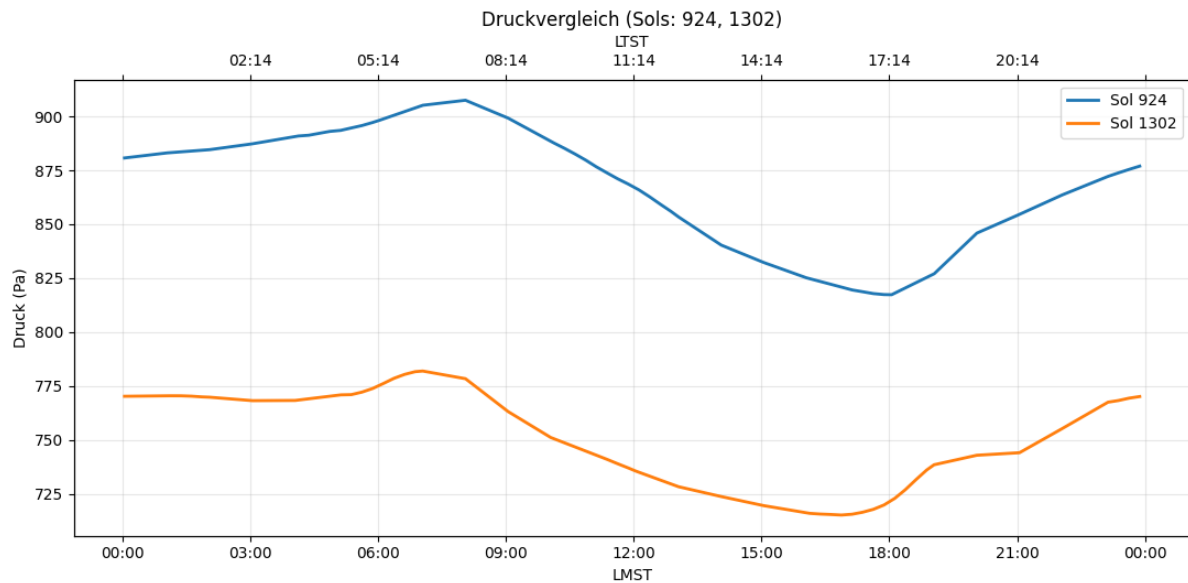


Abbildung 6: Vergleich der Druckverläufe (Mittelwerte über jeweils 15 min) an Sol 924 (13.03.2015, der Mitte des Winters auf der Nordhalbkugel) und Sol 1302 (04.04.2016, Mitte des Nord-Sommers). Auffällig ist die Ähnlichkeit des Druckverlaufs, der typisch für den Mars ist.

Relative Feuchtigkeit

Curiosity verfügt auch über einen Sensor für die Luftfeuchtigkeit. Abbildung 7 zeigt hierzu einen exemplarischen Verlauf über einen Tag hinweg für den äquatornahen Standort von *Curiosity*. Nahe des morgendlichen Temperaturminimums findet sich der tägliche Spitzenwert der Feuchtigkeit, der bei nur ca. 17% liegt. Tagsüber liegt die relative Feuchtigkeit dann mit < 2,5% nochmals deutlich darunter und nimmt damit extreme Ausmaße an.

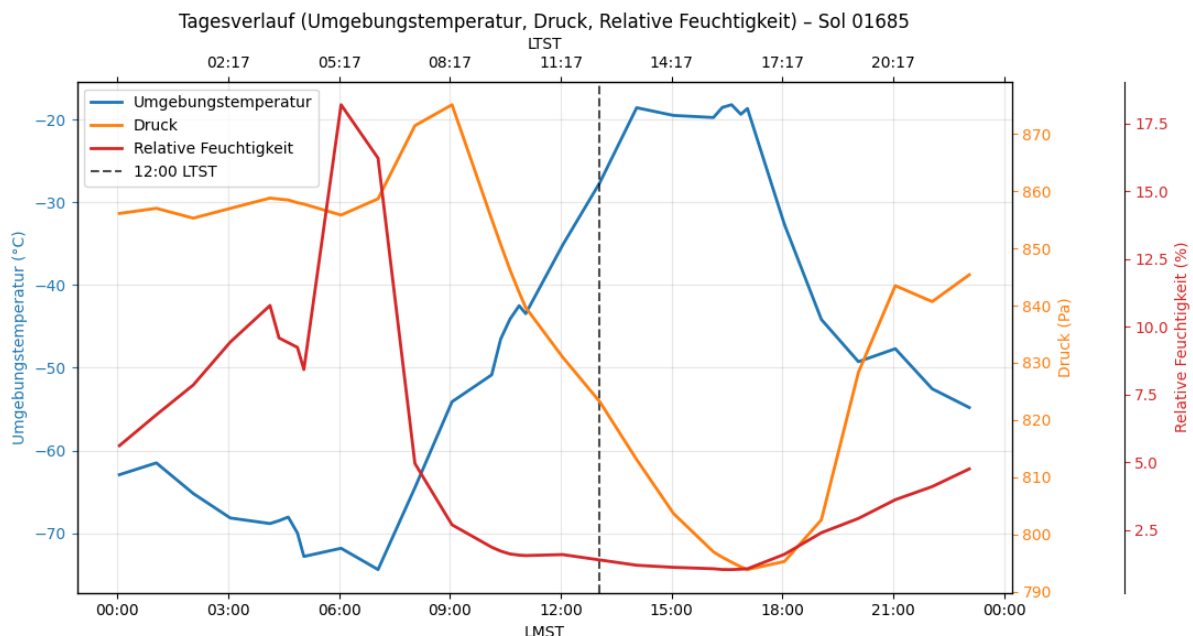


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung des Verlaufs von Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Druck für einen Tag im „Hochsommer“. Generiert aus Daten des Rovers *Curiosity*.

Lokale Windverhältnisse

Die Rover *Curiosity* und *Perseverance* haben mittlerweile lange Strecken auf dem Mars zurückgelegt und sind dabei auch an markanten Geländeformationen vorbeigekommen, die sich für Untersuchungen der dort vorherrschenden Windverhältnisse gut eignen würden. Leider haben beide Landeeinheiten mit Beeinträchtigungen ihrer Windsensoren zu kämpfen: bei *Curiosity* trat der Schaden an einem der Sensoren bereits bei der Landung auf und bei *Perseverance* wurde Staub in die Öffnung eines der beiden Sensoren geweht und macht diesen damit ebenfalls unbrauchbar. Von beiden Missionen stehen daher nur sehr eingeschränkt Daten zur Windgeschwindigkeit zur Verfügung (hier zeigt sich ein Vorteil des einfachen, jedoch offenbar recht robusten Designs des Taletale der *InSight*-Mission).

Die Ursache für derartige Beschädigungen ist in Abbildung 8 zu sehen, in der zufällig gleich drei größere Staubteufel aufgenommen werden konnten. Solche, im Deutschen als Kleintromben bezeichneten, Luftwirbel entstehen durch eine Überhitzung der bodennahen Luftschicht. Dabei steigen Thermikblasen vom Boden auf, die bei ihrem Aufstieg eine eventuell vorhandene, schwache Rotation der Atmosphäre zum Zentrum des Wirbels hin konzentrieren können. Die Drehimpulserhaltung führt dann zu einer stark ansteigenden Windgeschwindigkeit. Im Gegensatz zu Tornados kommt es bei Staubteufeln jedoch zu keinem großräumigen, konvektiven Aufstieg feuchter Luftmassen (Wikipedia, 2025).



Abbildung 8: Aufnahme von 3 Staubteufeln durch den Rover *Perseverance* am 25.01.2025 (Sol 1398). Die Aufnahme erfolgte durch die Navigationskameras, so dass die Auflösung relativ beschränkt ist. Im Vordergrund ist, schwach erkennbar, ein vierter Staubteufel zu sehen, der sich links des großen Exemplars befindet und gerade mit diesem verschmilzt. Der große Staubteufel im Vordergrund hat einen Basisdurchmesser von etwa 65 m.

Warum es trotz der nur sehr dünnen Atmosphäre und der begrenzten Sonneneinstrahlung offenbar recht häufig zur Entwicklung von Staubteufel auf dem Mars kommt, lässt sich mit einem einfachen Modell ergründen. Ausgangspunkt ist dabei der Umstand, dass die Marsatmosphäre sich in guter Näherung als ideales Gas beschreiben lässt, so dass gilt:

$$p = \rho R_{CO_2} T.$$

Der Aufstieg eines Pakets der Marsatmosphäre lässt sich nun nachverfolgen, wobei sich dieses jeweils recht schnell dem Umgebungsdruck anpasst. Letztlich erhält man für die Geschwindigkeit in vertikaler Richtung die Beziehung

$$v \approx \sqrt{2gh \frac{\Delta T}{T}}.$$

Mit für den Mars typischen Werten von $g = 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $T = 240 \text{ K}$, $\Delta T = 5 \text{ K}$ und der Aufstiegshöhe $h = 1\,000 \text{ m}$ ergibt sich ein Aufwind von $v = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Eine solch hohe vertikale Geschwindigkeit kann zu sehr weit aufragenden Staubteufeln führen. *Perseverance* hat bereits solche Kleintromben mit einer Höhe von ca. 2 km dokumentiert. Der ausführliche Lösungsweg des hier nur kurz beschriebenen Vorgangs findet sich in der Lösung zur Aufgabe „Marsrover *Curiosity*: Staubteufel“.

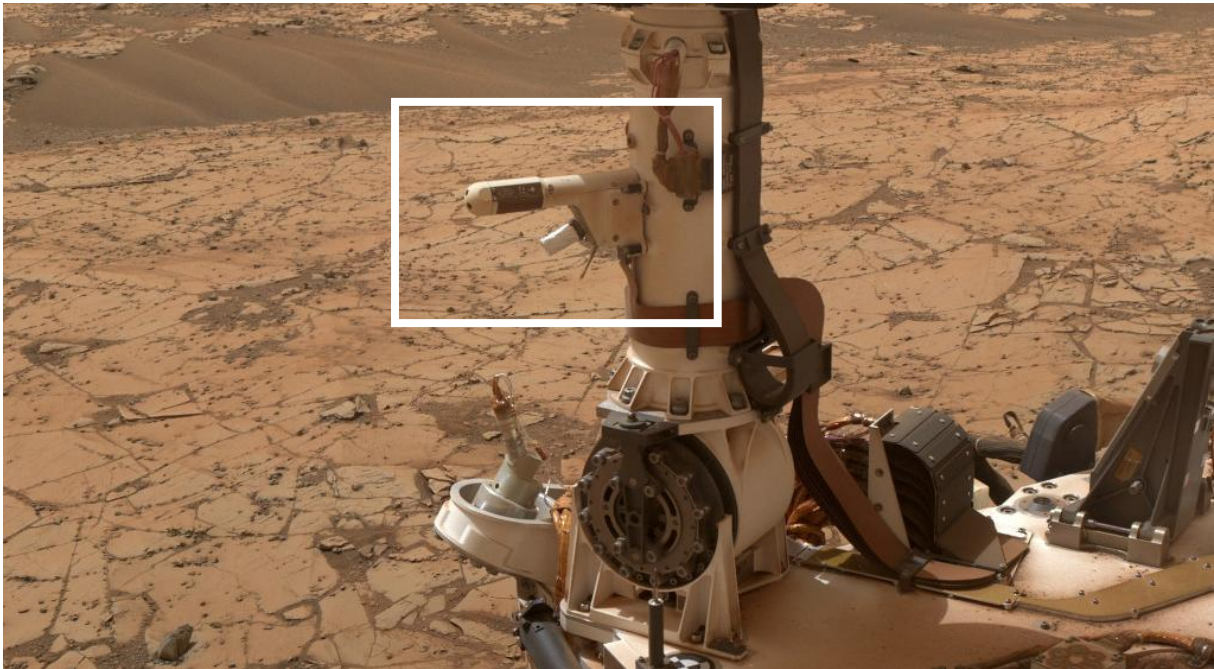


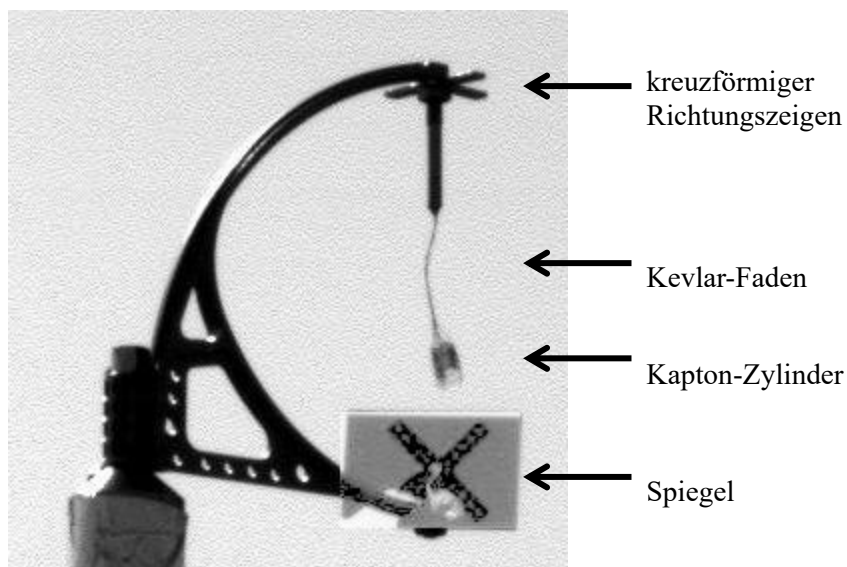
Abbildung 9: Der Arm des Rovers *Curiosity* mit dem Instrument REMS für meteorologische Messungen (Quelle: NASA, Lizenz: public domain, Hervorhebung durch den Autor).

Zumindest ebenfalls randständig mit den Eigenschaften der Atmosphäre verbunden ist auch das Instrument *InSight radio science experiment* (RISE). Die hochgenaue Auswertung der Radio-Übertragungen von InSight erlaubten die exakte Vermessung der Rotationsperiode des Mars, bzw. von deren Veränderung, d. h. der Veränderung der Tageslänge (Length-Of-Day (LOD), siehe z. B. auch Kraus, 2025 für eine Anwendung dieses Verfahrens für die Bestimmung früheren Tageslänge der Erde), die auf den Austausch von Drehmoment zwischen der Atmosphäre des Mars und seiner Oberfläche zurückzuführen ist (Spiga et al., 2018). Aus astronomischer Sicht ist zudem interessant, dass mit RISE die genaue Amplitude der Nutation des Planeten bestimmt werden konnte, woraus sich wiederum ableiten ließ, dass der Kern des Mars flüssig ist und die Rotationsachsen von Kern und Mantel nicht miteinander übereinstimmen (Le Maistre et al., 2022). Mit Hilfe der Daten des Magnetometers von *InSight* konnte zudem die sogenannte Carrington-Rotation, d. h. die Rotation der Sonne, von der Oberfläche des Planeten aus nachgewiesen werden (Mittelholz et al., 2023).

Aufgaben

Windgeschwindigkeitsmessung mit dem Lander *Phoenix*

Die Raumsonde *Phoenix* führte zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit und Richtung ein zunächst einfach anmutendes Gerät mit sich, welches an einen sogenannten Windfaden erinnert, wie er auf Segelbooten zu finden ist. Dieses, im Englischen als *Telltale* bezeichnete Instrument besteht aus einem extrem leichten Zylinder aus dem Material Kapton, welcher an einem sehr dünnen Kevlar-Faden aufgehängt ist. Oberhalb der Aufhängung befindet sich eine kreuzförmige Struktur, anhand derer die Richtung der Auslenkung abgelesen werden kann. Durch einen gekippten Spiegel etwas unterhalb des Zylinders wird dessen Auslenkung, im Bezug zu der kreuzförmigen Struktur, für die Bordkamera sichtbar (siehe Bild).



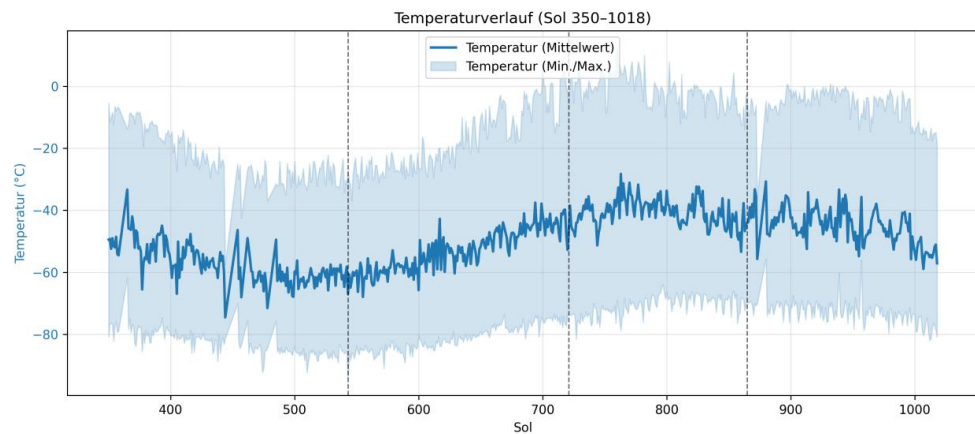
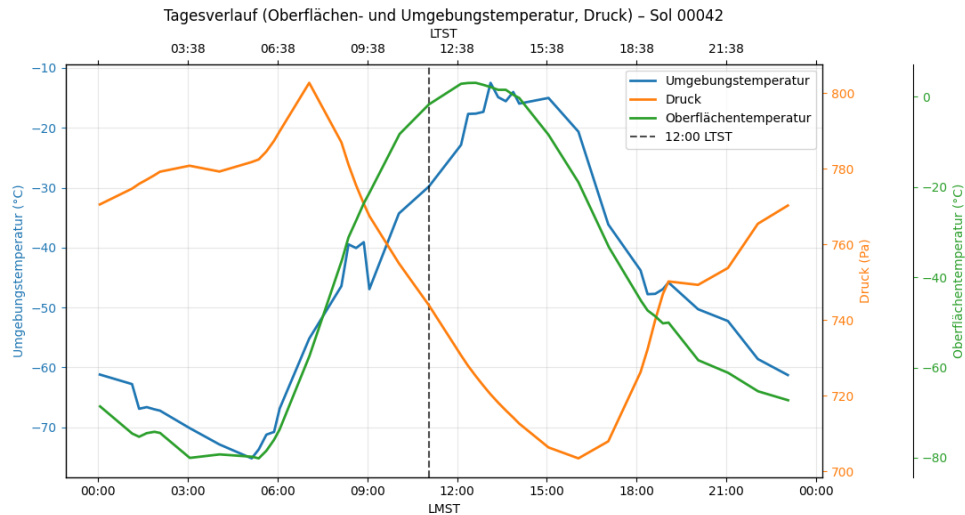
Aufgabe 1: Berechnen Sie die Windgeschwindigkeit auf dem Mars für den Fall, dass das Telltale um einen Winkel von $\theta = 25^\circ$ gegenüber der Vertikalen ausgelenkt wird. Die Masse des Kapton-Zylinders beträgt 10 mg, sein Widerstandsbeiwert C liegt bei 1,2 (gilt für lange Zylinder) und seine wirksame Fläche A beträgt 1 cm^2 .

Hinweise: Die Widerstandskraft F_W der Strömung berechnet sich durch $F_W = \frac{1}{2} \rho C A v^2$, darin ist ρ die Dichte der Atmosphäre und v die Windgeschwindigkeit. Der Knick im Faden entsteht durch seine innere Spannung und kann für die Berechnung außer Acht gelassen werden.

Aufgabe 2: Nennen Sie mindestens zwei Gründe, warum die wahre Windgeschwindigkeit von der berechneten Windgeschwindigkeit abweichen kann. Gehen Sie dazu auf Vereinfachungen ein, die Sie in Ihrem Modell vorgenommen haben.

Marsrover Curiosity: Täglicher und jährlicher Temperaturverlauf

Die Abbildungen zeigen die täglichen und den jährlichen Temperaturverlauf für den Marsrover Curiosity. Sol ist dabei die Bezeichnung für einen Marstag, dessen Länge bei etwa 24 h und 30 min liegt und ab dem Tag der Landung des jeweiligen Rovers bzw. der Sonde gezählt wird.

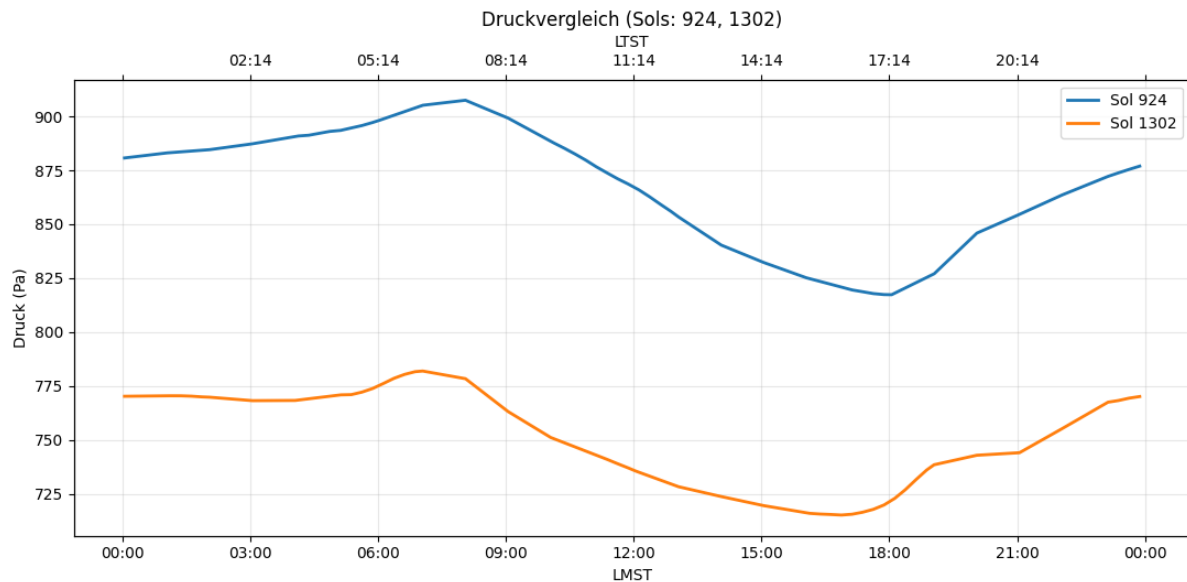


Aufgabe 1: Recherchieren Sie die Begriffe Jahreszeiten- und Tageszeitenklima. Bestimmen Sie, welcher dieser Klimatypen am Standort des Rovers *Curiosity* vorherrscht.

Aufgabe 2: Recherchieren Sie, wo sich das Rover *Curiosity* auf der Marsoberfläche befindet. Vergleichen Sie die klimatischen Verhältnisse eines irdischen Standorts vergleichbarer Breite mit den Verhältnissen am Ort des Rovers. Welcher wesentliche Unterschied fällt Ihnen hier auf? Suchen Sie eine Erklärung, warum trotz dieses Unterschieds an diesem Standort dieser Klimatyp vorherrscht.

Marsrover Curiosity: Atmosphärendruck im Jahresverlauf

Der Marsrover Curiosity misst seit über 13 Jahren eine Vielzahl von Umweltbedingungen auf dem Mars, darunter auch den Atmosphärendruck. Die Abbildung zeigt den Druckverlauf an zwei Marstagen (Sol): Sol 924 (entspricht dem 13.03.2015) und Sol 1302 (04.04.2016). Darin ist LMST die mittlere Sonnenzeit auf dem Mars und entspricht einer Zonenzeit auf der Erde.



Aufgabe 1: Vergleichen Sie den (ungefähren) mittleren Atmosphärendruck auf dem Mars mit den Verhältnissen auf der Erde.

Aufgabe 2: Die Druckverläufe sind typische Beispiele für den Tagesgang des Drucks auf dem Mars. Finden Sie eine Erklärung für diesen Druckverlauf. Hinweis: Beachten Sie dabei auch die typischen Temperaturen, wie sie auf dem Mars auftreten.

Aufgabe 3.1: Vergleichen Sie die Datumsangaben für die beiden Messzeitpunkte mit der Tabelle der Jahreszeiten auf dem Mars. Finden Sie eine Erklärung für die Druckunterschiede.

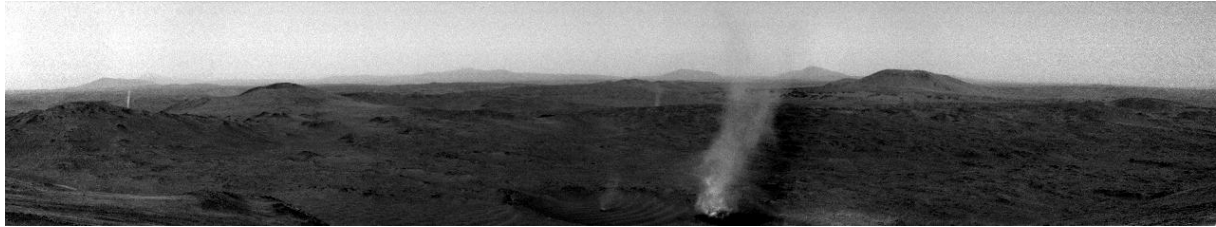
Aufgabe 3.2: Leiten Sie aus dem Druckunterschied ab, welche der Polkappen des Mars die größere Menge an CO_2 - und H_2O -Eis speichert.

Übersicht der Jahreszeitenanfänge auf dem Mars über die Dauer der MSL-Mission (Curiosity) hinweg (Quelle: [The Planetary Society](#)).

Frühjahrs-Äquinoktium $Ls = 0^\circ$	Sommer-Solstitium $Ls = 90^\circ$	Herbst-Äquinoktium $Ls = 180^\circ$	Winter-Solstitium $Ls = 270^\circ$
13.09.2011	30.03.2012	29.09.2012	23.02.2013
31.07.2013	15.02.2014	17.08.2014	11.01.2015
18.06.2015	03.01.2016	04.07.2016	28.11.2016
05.05.2017	20.11.2017	22.05.2018	16.10.2018
23.03.2019	08.10.2019	08.04.2020	02.09.2020
07.02.2021	25.08.2021	24.02.2022	21.07.2022
26.12.2022	12.07.2023	12.01.2024	07.06.2024
12.11.2024	29.05.2025	29.11.2025	25.04.2026
30.09.2026	16.04.2027	17.10.2027	12.03.2028

Marsrover Curiosity: Staubteufel

Das Bild zeigt mehrere Staubteufel, die von der Navigationskamera des Rover Perseverance aufgenommen wurden.



Bei Staubteufeln handelt es sich um sogenannte Kleintromben, wie sie auch von der Erde bekannt sind. Es handelt sich um eher kurzlebige Erscheinungen, die Staub auf der Oberfläche des Planeten aufwirbeln und dadurch sichtbar werden.

Aus Einzelbildern generiertes
Video zur Bewegung der
Staubteufel



Aufgabe: Leiten Sie eine Beziehung für die kinetische Energie eines aufsteigenden Atmosphärenpakets her.

Lösungen

Windgeschwindigkeitsmessung mit dem Lander *Phoenix*

Aufgabe 1

Skizze zu den wirkenden Kräften (F_W : Widerstandskraft der Strömung, F_g : Gewichtskraft, F_S : Seilkraft)

Aus der Skizze ergeben sich die Verhältnisse im Kräfteparallelogramm zu:

$$F_S \cdot \cos \theta = F_g \quad (1)$$

$$F_S \cdot \sin \theta = F_W \quad (2)$$

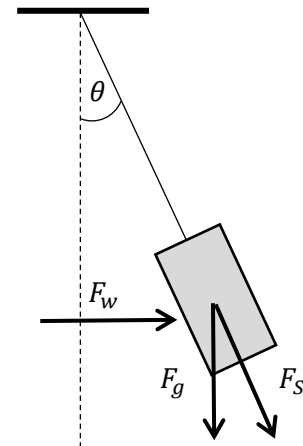
Daraus folgt durch Division:

$$F_W = mg \cdot \tan \theta \quad (3)$$

Die Windgeschwindigkeit v ergibt sich durch Gleichsetzen von (3) mit der Widerstandskraft der Strömung $F_W = \frac{1}{2} \rho C A v^2$:

$$mg \cdot \tan \theta = \frac{1}{2} \rho C A v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho C A} \tan \theta}$$

Bei der Bestimmung der Gewichtskraft ist zu beachten, dass hier der Wert für den Mars ($g = 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) eingesetzt wird. Gleiches gilt für die Dichte ρ der Marsatmosphäre, die zuerst zu recherchieren ist und hier mit $0,02 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen wird. Die wirksame Fläche A ist zuerst in m^2 umzurechnen. Aus diesen Werten ergibt sich dann eine Geschwindigkeit von $v \approx 3,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Aufgabe 2

Mögliche Antworten sind:

- Für die Dichte ρ der Marsatmosphäre wurde die mittlere Dichte von $0,02 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angenommen, wobei der Landepunkt von *Phoenix* bei -4100 m liegt, wo eine deutlich höhere Dichte anzunehmen ist.
- Der Widerstandsbeiwert und die wirksame Fläche sind nicht konstant entsprechen bei einer großen Auslenkung von 25° nicht mehr den angegebenen Werten.
- Es ist sehr wahrscheinlich, dass Schwingungen auftreten, so dass die Bedingung eines Gleichgewichts, wie sie hier implizit angenommen wurde, nicht mehr gegeben ist.

Marsrover Curiosity: Täglicher und jährlicher Temperaturverlauf

Aufgabe 1:

- Jahreszeitenklima: Von einem Jahreszeitenklima spricht man, wenn an einem Standort deutlich ausgeprägte warme und kalte Jahreszeiten nachweisbar sind. Die Schwankungen der mittleren Monatstemperaturen innerhalb eines Jahres sind höher als die mittlere tägliche Temperaturamplitude.
- Tageszeitenklima: Ein Tageszeitenklima herrscht vor, wenn die mittleren Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht größer sind als die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Monaten.

Aufgabe 2:

Der Standort des Rovers befindet sich bei ca. 4° S und damit an einem Ort, der auf der Erde den Tropen entsprechen würde. Diese Klimazone ist auf der Erde von hoher Feuchtigkeit geprägt, die auf dem Mars jedoch fast vollständig fehlt. Zwar sind im jährlichen Temperaturverlauf die Jahreszeiten an der Temperatur ablesbar, jedoch dominiert der Tagesgang den Temperaturverlauf. Dies wird durch die sehr dünne Marsatmosphäre im Zusammenhang mit dem fehlenden von Wasserreservoirs hervorgerufen, die zu sehr großen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht führen. Die Messungen auf dem Mars erfüllt damit zwar die formale Bedingung, um von einem Tageszeitenklima zu sprechen, die Ursache und die Auswirkungen sind jedoch von den irdischen Verhältnissen völlig verschieden.

Marsrover Curiosity: Atmosphärendruck im Jahresverlauf

Aufgabe 1:

Der mittlere Atmosphärendruck liegt, grob geschätzt aus den Daten im Diagramm und für den Standort nahe am Äquator, bei ca. 825 Pa. Das Verhältnis zum irdischen Luftdruck ergibt sich zu $\frac{825 \text{ Pa}}{1000 \text{ hPa}} \approx 0,01 = 1\%$. Dabei wäre jedoch zusätzlich noch der Standort des Rovers im nördlichen Tiefland (bei $-4\,400 \text{ m}$) zu berücksichtigen. Global betrachtet liegt der Druck sogar nur bei ca. 600 Pa.

Aufgabe 2:

Die nächtliche Kälte unterbindet Konvektionsbewegungen und führt zu einer Erhöhung des Drucks naher der Oberfläche. Das Minimum tritt kurz nach dem Eintritt der täglichen Minimaltemperatur ein. Mit der Erwärmung des Bodens und der bodennahen Atmosphärenschichten führen die aufsteigenden Gasmassen zu einer Druckabnahme am Boden. Mit sinkender Temperatur kehrt sich dieser Prozess wieder um.

Aufgabe 3.1:

Die beiden Kurven repräsentieren die Mitte des nördlichen Winters bzw. Sommers. Mit steigender Temperatur auf der Südhalbkugel wird mehr CO_2 und Wasserdampf freigesetzt, was zu einer Erhöhung des Drucks führt.

Aufgabe 3.2:

Aus dem Umstand, dass das Maximum des Drucks sich während des nördlichen Winters, also des südlichen Sommers, einstellt, erkennt man, dass in der südlichen Polkappe deutlich mehr Material eingelagert sein muss als an der nördlichen. Die täglichen Druckvariationen werden von dem globalen Anstieg des mittleren Drucks jedoch nicht beeinflusst.

Marsrover Curiosity: Staubteufel

Die Aufgabe erfordert eine individuell angepasste Hilfestellung. Ein möglicher Zugang sei hier skizziert:

Die dünne Marsatmosphäre verhält sich in etwa wie ein ideales Gas, so dass für den Druck p gilt

$$p = \varrho R_{CO_2} T. \quad (1)$$

Darin ist R_{CO_2} die spezifische Gaskonstante für Kohlenstoffdioxid, als der Hauptbestandteil der Marsatmosphäre. Die bodennahen Schicht kann als eine Konvektionsschicht angenommen werden, in der tagsüber ein sehr hoher vertikaler Temperaturgradient vorliegt. Diese Schicht reicht bis in einige Kilometer Höhe, wo sich eine eher stabile Schicht anschließt.

Ein bodennah erwärmtes Atmosphärenpaket steigt in dieser Konvektionsschicht nach oben (in z -Richtung), wobei sich sein Druck p_P dem Umgebungsdruck p_U anpasst:

$$p_P(z) \approx p_U(z) \quad (2)$$

Durch Konvergenz am Boden sowie durch Windscherung oder Hindernisse wird das Luftpaket, bzw. die entstehende Säule, in Rotation versetzt, wobei durch die Drehimpulserhaltung die Windgeschwindigkeit zum Zentrum hin stark ansteigt. Dabei wird feiner Staub aufgewirbelt und mit nach oben gerissen, wodurch der Staubteufel überhaupt erst sichtbar wird.

Aus dem allgemeinen Gasgesetz (1) ergibt sich für die Umgebung:

$$\varrho_U = \frac{p}{R_{CO_2} T}.$$

Für das Paket selbst ist die Temperatur gegenüber der Umgebungstemperatur um den Betrag ΔT erhöht, so dass sich für seine Dichte ϱ_P ergibt:

$$\varrho_P = \frac{p}{R_{CO_2} (T + \Delta T)}.$$

Für das Dichteverhältnis erhält man dann

$$\frac{\varrho_P}{\varrho_U} = \frac{T}{T + \Delta T},$$

bzw., für kleine Temperaturänderungen $\Delta T \ll T$

$$\frac{T}{T + \Delta T} \approx 1 - \frac{\Delta T}{T}$$

und damit

$$\varrho_P \approx \varrho_U \left(1 - \frac{\Delta T}{T} \right).$$

Für die Druckdifferenz ergibt sich damit

$$\frac{\varrho_U - \varrho_P}{\varrho_U} \approx \frac{\Delta T}{T}.$$

Die auf das Atmosphärenpaket wirkende Netto-Kraft F_{net} ergibt sich aus der Auftriebskraft F_A (entsprechend der von ihm verdrängten Gewichtskraft des Umgebungsvolumens) und der auf es wirkenden Gewichtskraft F_G

$$F_{net} = F_A - F_G = \varrho_U V g - \varrho_P V g,$$

Vereinfachen ergibt dann:

$$F_{net} = (\varrho_U - \varrho_P) V g.$$

Auf das Luftpaket mit der Masse $m = \varrho_P V$ wirkt dann die Auftriebsbeschleunigung

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{(\varrho_U - \varrho_P) V g}{\varrho_P V} = g \frac{\varrho_U - \varrho_P}{\varrho_P}.$$

Für kleine ΔT ist $\varrho_P \approx \varrho_U$ und daher

$$a \approx g \frac{\Delta T}{T}. \quad (3)$$

Auch die kinetische Energie des Pakets lässt sich bestimmen. Anstelle von Auftriebsarbeit W lässt sich mit der spezifischen (d. h. auf ein Kilogramm bezogenen) Arbeit w rechnen:

$$w_{\text{Auftrieb}} = \int_0^h a(z) dz . \quad (4)$$

Darin ist h die Höhe des Pakets, bis zu der es leichter als die Umgebung bleibt. Für die kleinen Höhenänderungen, um die es beim Aufstieg innerhalb der unteren Atmosphäre geht, kann der Ortsfaktor g als konstant angenommen werden, womit sich Formel (3) entsprechend vereinfacht:

$$w_{\text{Auftrieb}} \approx ah .$$

Aus der Kombination von (3) und (4) ergibt sich dann:

$$w_{\text{Auftrieb}} \approx gh \frac{\Delta T}{T} . \quad (5)$$

Die spezifische kinetische Energie ist

$$e_{\text{kin}} = \frac{1}{2} v^2 .$$

Beim Start des Luftpakets aus seiner Ruhelage heraus gilt

$$\frac{1}{2} v^2 \approx w_{\text{Auftrieb}} .$$

und damit mit Gleichung (5)

$$\frac{1}{2} v^2 \approx gh \frac{\Delta T}{T} .$$

Mit für den Mars typischen Werten ($g = 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $T = 240 \text{ K}$, $\Delta T = 5 \text{ K}$, $h = 1\,000 \text{ m}$) ergibt sich ein Aufwind von $v = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, was zu sehr weit aufragenden Staubeufeln führen kann. Perseverance hat bereits Kleintromben mit einer Höhe von ca. 2 km dokumentiert.

Quellen

- Fischer, O. & Müller, T. (2021). Wie konstruiert man eine Zylinder-Sonnenuhr. Wissenschaft in die Schulen(9). <https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2021-11-MSOS-So.pdf>
- Gunnlaugsson, H. P., Holstein-Rathlou, C., Merrison, J. P., Knak Jensen, S., Lange, C. F., Larsen, S. E., Madsen, M. B., Nørnberg, P., Bechtold, H., Hald, E., Iversen, J. J., Lange, P., Lykkegaard, F., Rander, F., Lemmon, M., Renno, N., Taylor, P. & Smith, P. (2008). Telltale wind indicator for the Mars Phoenix lander. Journal of Geophysical Research, 113(E3), Artikel 2007JE003008. <https://doi.org/10.1029/2007JE003008>
- Kraus, S. F. (2022). Wetterbericht vom Mars: Meteorologische Originaldaten und ihre Auswertung. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht*(3), 16–20.
- Kraus, S. F. (2023a). The Method of Observation in Science Education: Characteristic Dimensions from the Educational Perspective. Science & Education. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1007/s11191-023-00422-x>
- Kraus, S. F. (2023b). Beobachtungen zwischen instrumenteller Objektivität und Suggestion: Die Marskanäle und die Möglichkeit von Leben auf dem Mars. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht*(4), 35–39.
- Kraus, S. (2025). Rekonstruktion der Verlangsamung der Erdrotation anhand einer historischen Sonnenfinsternis. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht*(2).
- Kraus, S. F. (im Druck). Teaching with Authentic Data – Discussion Summary. In S. Brown-Sevilla & A. Bhandare (Vorsitz), *Proceedings for the 7th Shaw-IAU Workshop on Astronomy for Education*.
- Latußeck, A. (2019). Arbeiten mit TOPCAT und Aladin, Teil 1. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht*, 56(6), 30–36.
- Le Maistre, s., Rivoldini, A., Caldiero, A., Yseboodt, M., Baland, R.-M., Beuthe, M., van Hoolst, T., Dehant, V., Folkner, W., Buccino, D., Kahan, D., Marty, J.-C., Antonangeli, D., Badro, J., Drilleau, M., Konopliv, A., Peters, M.-J., Plesa, A.-C., Samuel, H. & Tosi, N. (2022). The deep interior of Mars from nutation measured by InSight RISE. EGU22, the 24th EGU General Assembly. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12428>
- Li, C., Zhang, R., Yu, D., Dong, G., Liu, J., Geng, Y., Sun, Z., Yan, W., Ren, X., Su, Y., Zuo, W., Zhang, T., Cao, J., Fang, G., Yang, J., Shu, R., Lin, Y., Zou, Y., Liu, D., . . . Ouyang, Z. (2021). China's Mars Exploration Mission and Science Investigation. *Space Science Reviews*, 217(4). <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00832-9>
- Mittelholz, A., Johnson, C. L., Fillingim, M., Grimm, R. E., Joy, S., Thorne, S. N. & Banerdt, W. B. (2023). Mars' External Magnetic Field as Seen From the Surface With InSight. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(1), Artikel e2022JE007616. <https://doi.org/10.1029/2022JE007616>
- Sotomayor, L. M. (2019). Rover Environmental Monitoring Station REMS: Reduced Data Record (RDR) Software Interface Specification (SIS).
- Spiga, A. (2025). The Planetary Boundary Layer of Mars. In *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.130>
- Spiga, A., Banfield, D., Teanby, N. A., Forget, F., Lucas, A., Kenda, B., Rodriguez Manfredi, J. A., Widmer-Schmidrig, R., Murdoch, N., Lemmon, M. T., Garcia, R. F., Martire, L., Karatekin, Ö., Le Maistre, S., van Hove, B., Dehant, V., Lognonné, P., Mueller, N., Lorenz, R., . . . Banerdt, W. B. (2018). Atmospheric Science with InSight. *Space Science Reviews*, 214(7). <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0543-0>
- The Planetary Society. (o. D.). Mars' Calendar. <https://www.planetary.org/articles/mars-calendar>
- Wikipedia (2025). Kleintrombe. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kleintrombe>

Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse www.wissenschaft-schulen.de (Fachgebiet Astronomie). Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise, Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors (kraus@hda-hd.de) senden könnten.