

Laser Distanzmessung Erde-Mond

Inhalt:

1	Anlass und Einleitung	1
2	Messprinzip und Anwendungen	2
3	Theorie	3
3.1	Link-Budget für Messung ohne Retro-Reflektor	3
3.2	Link-Budget für Messung mit Retro-Reflektor	4
4	Erwartete und gemessene Werte	5
5	Zusammenfassung und Schlusswort.....	7
6	Referenzen	8

1 Anlass und Einleitung

Kurz nachdem die USA am 20. Juli 1969 die erste bemannte Mondlandung meldeten und Bilder von den dort platzierten Laser-Retro-Reflektor veröffentlichten, wurde auch von erfolgreichen Laserdistanzmessungen Erde-Mond berichtet. Erste Messungen schon ab dem 1. August 1969 zeigten offenbar, dass der Retro-Reflektor die tiefen Mond-Nachttemperaturen ausgehalten hatte und bestens funktionierte [A11_PSR_1969 [1] Seite 166f]. Seither hört und liest man immer wieder von solchen Laser-Distanzmessungen auf Retro-Reflektoren auf dem Mond.

Die allererste Laser-Distanzmessung zum Mond hatte übrigens schon 1962 im Projekt *Luna See* des MIT stattgefunden [The laser in astronomy, New Scientist [12]]; dabei war der Laserstrahl nur von der Mondoberfläche reflektiert resp. gestreut worden.



Abbildung 1-1 Laser Retroreflektor von Apollo 11 (AS11-40-5952.jpg, [3])

Hier sollen diese Resultate auf ihre Authentizität überprüft werden.

2 Messprinzip und Anwendungen

Bei der Laser-Distanzmessung zum Mond wird die Zeit gemessen, die ein Laserpuls braucht, um vom Sender auf der Erde zum Mond und zurück zu „fliegen“:

$$z = \frac{c \cdot \Delta T}{2} \quad (1)$$

mit z: Distanz zwischen Messstation und Messobjekt (Mond)
 c: Lichtgeschwindigkeit $\approx 300'000$ km/s
 ΔT : Flugzeit des Laserpulses

Nach diesem Prinzip funktionieren

- Laser-Höhenmesser in Flugzeugen, die die Höhe über Grund ermitteln
- Laser Altimeter, die die Höhe eines Satelliten über der Oberfläche des zu vermessenden Himmelskörpers ermitteln und so das Bodenprofil vermessen
- Satellite Laser Ranging (SLR): Messung der Distanz von einer Bodenstation zu einem Satelliten, z.B. LAGEOS (Laser Geodynamics Satellite)



Abbildung 2-1 LAGEOS, gemacht für SLR [Wikipedia: LAGEOS]

Ein anderes Messprinzip mit dem Laser ist die Interferometrie. Diese wird bei meist kurzen Distanzen und hohen Genauigkeitsanforderungen angewendet. Dieses Messprinzip wird hier nicht betrachtet, da es für die betrachtete Anwendung nicht verwendet wird.

Um ein stärkeres Empfangssignal zu haben, werden oft Retro-Reflektoren eingesetzt. Diese werfen das empfangene Licht genau in die Richtung zurück, aus der es auf den Reflektor trifft.

Laser-Höhenmesser von Flugzeugen und Laser-Altimeter von Satelliten messen ohne Retro-Reflektoren, wogegen beim SLR ausschliesslich auf Satelliten gemessen wird, die mit Retro-Reflektoren bestückt sind.

Dass es auch ohne Retro-Reflektor ein Rücksignal gibt, demonstriert übrigens ein Laserpointer, mit dem an eine Wand geleuchtet wird: der Rückreflex ist gut sichtbar.

Messungen zum Mond können grundsätzlich mit oder auch ohne Retro-Reflektor funktionieren. Doch für Langzeitmessungen ist ein Retroreflektor zwingend, da man nur so sicher ist, dass man auf den gleichen Referenzpunkt misst.

3 Theorie

Der Sendepuls muss genug Energie oder eine genügende Anzahl Photonen enthalten, damit beim Empfänger noch mindestens ein Photon ankommt.

„Ein Photon“ tönt nach wenig; doch es gibt heute Empfänger, die einzelne Photonen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (>70%) detektieren können (z.B. [4]). Da es gute Empfangsdetektoren für grünes Licht gibt, wird in der Regel mit der Wellenlänge 532nm gearbeitet. 532nm ist die Hälfte von 1064nm, der Wellenlänge von NdYAG-Lasern.

Hier soll der Unterschied zwischen Messungen mit und ohne Retro-Reflektoren betrachtet werden. Deshalb wird für beide das entsprechende Link-Budget aufgestellt.

3.1 Link-Budget für Messung ohne Retro-Reflektor

Bei diesem Messprinzip wird das Laserlicht an der Oberfläche des Messobjektes, hier an der Mondoberfläche, in alle Richtungen gestreut (Lambert-Streuung). Pro Fläche wird wenig Licht in Richtung des Senders zurückgestreut; dafür wird von der gesamten beleuchteten Fläche Licht zum Sender zurückgestreut. Der Öffnungswinkel des Empfängers ist dabei gross genug, um von der gesamten beleuchteten Fläche das Licht einsammeln zu können.

Das Link-Budget errechnet sich nach [BELA_2007, [5], Formel (5)] für Vakuum:

$$E_{RX} = E_{TX} \cdot T_{RX} \cdot \frac{A_{RX}}{z^2} \cdot \frac{Albedo}{\pi} \quad (2a)$$

mit	E_{RX} :	Empfangene Puls-Energie
	E_{TX} :	Gesendete Puls-Energie
	T_{RX} :	Transmission des Empfängerteleskopes
	A_{RX} :	Fläche des Empfangsteleskopes
	z :	Distanz vom Seder zum Messobjekt
	Albedo:	Reflektivität der gemessenen Oberfläche

Bei einer Messung durch die Atmosphäre kommt noch die atmosphärische Transmission T_{atm} für den Hin- und für den Rückweg dazu. Hat das Empfangsteleskop eine runde Eintrittsöffnung, so kann A_{RX} als $R_{RX}^2 \cdot \pi$ geschrieben werden, wenn eine allfällige Zentralabschattung vernachlässigt wird. Wird die Sendeleistung vor dem Sendeteleskop gemessen, so kommt auch noch dessen Transmission (T_{TX}) dazu. Ebenso wird die Quanteneffizienz η_q (≈ 0.7) des Detektors eingeführt. Die angepasste Gleichung (2a) sieht dann wie folgt aus:

$$\frac{E_{RX}}{E_{TX}} = \eta_q \cdot T_{TX} \cdot T_{RX} \cdot T_{atm}^2 \cdot \frac{R_{RX}^2}{z^2} \cdot Albedo \quad (2b)$$

Als Zahlenwerte wird für alle Transmissionen 0.707 eingesetzt. Diese Werte scheinen einerseits vernünftig und vereinfachen andererseits die Rechnung, da $0.707^2=0.5$. Für die atmosphärische Transmission gilt dies gemäss [Degnan_1993 [6] Fig.7] für recht gute Verhältnisse. Für die optische Transmission durch ein Teleskop wird auch 0.707 angenommen; diese berücksichtigt vor allem die Zentralabschattung und beim Sendeteleskop zusätzlich das gaussförmige Stahlprofil [Klein_Degnan_1974 [7] Fig.3]. Für die Albedo des Mondes wird 0.1, und für die Distanz Erde-Mond 380'000km eingesetzt (Messdistanz, nicht Zentrumsdistanz).

Daraus resultiert (2c) mit Zahlenwerten für das Lunar Ranging wie folgt:

$$\frac{E_{RX}}{E_{TX}} = 0.7 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot \frac{R_{RX}^2}{(380'000km)^2} \cdot 0.1 = 0.0175 \cdot \frac{R_{RX}^2}{(380'000km)^2} \quad (2c)$$

3.2 Link-Budget für Messung mit Retro-Reflektor

Bei diesem Messprinzip wird das Licht, das auf den Retro-Reflektor trifft, sehr stark in die Richtung des einfallenden Lichts zurückreflektiert. Je grösser die Messdistanz, desto weniger Licht trifft noch auf den Reflektor. Dieses Messprinzip muss dem obigen Prinzip also nicht in jedem Fall überlegen sein.

Das Link-Budget wird mit Hilfe von [Degnan_1993 [6] Gleichung 3.1.1] für eine homogene Atmosphäre sowie senkrechten Lichteinfall aufgestellt:

$$n_{RX} = \eta_q \cdot n_{TX} \cdot T_{TX} \cdot G_{TX} \cdot \sigma_{RR} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot z^2} \right)^2 \cdot A_{RX} \cdot T_{RX} \cdot T_{atm}^2 \cdot T_{Cir}^2 \quad (3)$$

mit	n_{RX} :	Anzahl empfangener Photonen
	η_q :	Quanteneffizienz des Detektors (Empfänger)
	n_{TX} :	Anzahl gesendeter Photonen
	T_{TX} :	Transmission des Sendeteleskopes
	G_{TX} :	Antennen-Gain des Senders
	σ_{RR} :	Optische Querschnittsfläche eines Retro-Reflektors (siehe unten)
	z :	Distanz vom Sender zum Messobjekt
	A_{RX} :	Fläche des Empfangsteleskopes
	T_{RX} :	Transmission des Empfängerteleskopes
	T_{atm} :	Einweg-Transmission durch die Atmosphäre
	T_{Cir} :	Einweg-Transmission durch allfällige Zirruswolken

T_{Cir} wird 1 gesetzt, d.h. es wird angenommen, dass keine Zirruswolken die Messung stören.

σ_{RR} ist in [Degnan_1993 [6] Gleichung 6.1.1] für einen einzelnen Retro-Reflektor wie folgt definiert:

$$\sigma_{RR} = R_{RR} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{RR}}{\Omega_{RR}} = R_{RR} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{RR}^2}{\lambda^2} \quad (4)$$

mit	R_{RR} :	Reflektivität der Retro-Reflektoren (≥ 0.9 ; im Folgenden nehme ich 0.9 an)
	A_{RR} :	Fläche des Retro-Reflektors ($=D_{RR}^2 \cdot \pi/4$)
	Ω_{RR} :	Ausgeleuchteter Raumwinkel des Retro-Reflektors
	λ :	Wellenlänge: hier 532 nm (grün)

Gleichung (3) wird nun wie folgt erweitert:

1. σ_{RR} wird gemäss Gleichung (4) eingesetzt
2. für G_{TX} wird der beugungsbegrenzte Gain von $\frac{4 \cdot \pi \cdot A_{TX}}{\lambda^2}$ eingesetzt
3. es wird ein zusätzlicher Wirkungsgrad η_{add} eingeführt
4. es wird berücksichtigt, dass mehrere (n_{RR}) Retro-Reflektoren vorhanden sind:

$$\frac{n_{RX}}{n_{TX}} = \eta_{add} \cdot \eta_q \cdot T_{TX} \cdot n_{RR} \cdot R_{RR} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{TX}}{\lambda^2} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{RR}^2}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot z^2} \right)^2 \cdot A_{RX} \cdot T_{RX} \cdot T_{atm}^2 \quad (5a)$$

$$\frac{n_{RX}}{n_{TX}} = \eta_{add} \cdot \eta_q \cdot T_{TX} \cdot T_{RX} \cdot T_{atm}^2 \cdot n_{RR} \cdot R_{RR} \cdot \frac{A_{TX} \cdot A_{RR}^2 \cdot A_{RX}}{\lambda^4 \cdot z^4} \quad (5b)$$

Die Gleichung (5b) gibt die Verhältnisse noch zu idealisiert wieder, da der Sendestrah, welcher nur einen Teil von A_{RX} ($A_{TX} < A_{RX}$) belegt oder absichtlich aufgeweitet wird, durch die (turbulente) Atmosphäre weiter aufgeweitet werden könnte und dadurch der

Antennengewinn reduziert werden könnte. Statt der wirklichen Antennenfläche wird in Anlehnung an [Degnan_1993 [6] Gleichung 3.9.9] eine Antenne mit einem Radius gleich der lateralen atmosphärischen Kohärenzlänge ρ_0 gewählt. Statt ρ_0 sieht man oft den Fried Parameter r_0 ($\approx 2 \cdot \rho_0$). ρ_0 ist bei guten Verhältnissen $> 10\text{cm}$ [WHT Seeing, [10]]; ist die Bodenstation auf Meereshöhe, ist jedoch ein kleinerer Wert einzusetzen, etwa $1..2\text{cm}$:

$$\frac{n_{RX}}{n_{TX}} = \eta_{add} \cdot \eta_q \cdot T_{TX} \cdot T_{RX} \cdot T_{atm}^2 \cdot n_{RR} \cdot R_{RR} \cdot \frac{(\rho_0^2 \cdot \pi) \cdot A_{RR}^2 \cdot A_{RX}}{\lambda^4 \cdot z^4} \quad (6)$$

Bei Apollo 11 besteht der Retro-Reflektor aus 100 (n_{RR}) Einzelreflektoren mit einem Durchmesser (D_{RR}) von 3.8 cm [A11_PSR_1969 [1] Seite 167].

Für η_q und die Transmissionen werden die gleichen Zahlenwerte wie im §3.1 verwendet.

Gleichung (6) ist nun die Grundlage, um die erwartete Anzahl empfangener Photonen zu ermitteln. Dabei werden die folgenden Parameter variiert:

- ρ_0 : Laterale atmosphärische Kohärenzlänge (10cm und 2cm). Falls $R_{TX} < \rho_0$, dann würde R_{TX} statt ρ_0 verwendet. 10cm entspricht jedoch einer Divergenz von 0.7“, die immer noch grösser ist als die von Apache Point, die < 0.5 “ ist.
- η_{add} : Zusätzlicher Wirkungsgrad für allfällige Vernachlässigungen (1 und 0.5)

Die Geschwindigkeitsaberration wird vernachlässigt, da sie deutlich kleiner ist als der Öffnungswinkel eines Retro-Reflektors [A11_PSR_1969 [1] Seite 167]. Dieser und andere Einflüsse können mit dem zusätzlichen Wirkungsgrad η_{add} (1 ... ≈ 0.5) untersucht werden.

4 Erwartete und gemessene Werte

Es werden die drei folgenden Lunar Laser Ranging (LLR)-Messstationen

- Apache Point Observatory, 2'788müM, USA
- Wettzell, 600müM, Deutschland
- Observatorium der Côte d'Azur, 1'270müM, Frankreich

sowie die Abschätzung in [Dickey 1994 [2] Seite 5f]

und die LIDAR Messungen *Luna See* von 1962 miteinander verglichen.

Zuerst wird anhand der Gleichungen (2c) und (6) berechnet, wie viele Photonen pro Sendepuls empfangen werden. Tabelle 4-1 ist für eine Messung ohne Retro-Reflektoren, Tabelle 4-2 enthält die vom Retro-Reflektor zurückreflektierten Photonen. Bei einer Messung auf einen Retro-Reflektor werden die von der Mondoberfläche zurückgestreuten Photonen natürlich mitgemessen.

Tabelle 4-1 Erwartete Anzahl Photonen infolge Streuung an der Mondoberfläche

	Apache Point	Wettzell	Ø1m Teleskop	Côte d'Azur	Luna See
Teleskop-Ø	3.5 m	0.75 m	1 m	1.5 m	1.22 m
Gesendete Anzahl Photonen pro Puls	$3 \cdot 10^{17}$	$10^{19} (1)$	$10^{21} (2)$	$8 \cdot 10^{17}$	$1.75 \cdot 10^{20}$
Erwartete Anzahl empfangener Photonen (Gleichung 2c)	0.11	0.17	30	0.06	8

(1) Pulschette bestehend aus mehreren Einzelpulsen

(2) Fiktives Beispiel, siehe auch Tabelle 4-2

Tabelle 4-2 Erwartete Anzahl empfangener Photonen infolge Reflexion an den Retro-Reflektoren

	Parameter		Apache Point	Wettzell	Ø1m Teleskop	Côte d'Azur
	η_{add}	ρ_0				
Teleskop-Ø			3.5 m	0.75 m	1 m	1.5 m
Gesendete Anzahl Photonen pro Puls			$3 \cdot 10^{17}$	10^{19} (1)	10^{21} (2)	$8 \cdot 10^{17}$
Erwartete Anzahl empfangener Photonen (Gleichung 6)	1	0.1 m	1'100	1'680	300'000	540
	0.5	0.1 m	550	840	150'000	270
	0.5	0.02 m	22	34	6'000	11 ⁽³⁾

(1) Pulschette bestehend aus mehreren Einzelpulsen

(2) Fiktives Beispiel: [Dickey 1994 [2] Seite 5f] prognostiziert hier einen Verlust von 10^{-21} , erwartet also ein einziges Photon statt der hier minimal berechneten 6'000

(3) In [11] sind 32 abgeschätzt (Abschwächung von $4 \cdot 10^{-17}$ - ohne Atmosphäre). Dies passt gut zum Wert von 11, der die atmosphärische Abschwächung mit einem Faktor 2 berücksichtigt.

In der Tabelle 4-2 sind zwei Werte parametrisiert, d.h. bei guten Bedingungen sollten die Messwerte zwischen den beiden Extremwerten oder darüber liegen.

Die folgende Tabelle zeigt, was in Apache Point, Wettzell (hier nur approximative Resultate) und an der Côte d'Azur gemessen wurde:

Tabelle 4-3 Gemessene Anzahl empfangener Photonen infolge Reflexion an den Retro-Reflektoren plus Rückstreuung an der Mondoberfläche

	Apache Point	Wettzell	Côte d'Azur	Luna See
Teleskop-Ø	3.5 m	0.75 m	1.5 m	1.22 m
Gesendete Anzahl Photonen pro Puls	$3 \cdot 10^{17}$	10^{19} (1)	$8 \cdot 10^{17}$	$1.75 \cdot 10^{20}$
Gemessene Anzahl empfangener Photonen pro Puls	0.1087 ⁽²⁾	< 1	≈ 0.01 ⁽⁶⁾	12 ⁽⁷⁾
	0.135 ⁽³⁾			
	0.25 ⁽⁴⁾			
	0.6 ⁽⁵⁾			

(1) Pulschette bestehend aus mehreren Einzelpulsen

(7) Nur Streuung: ≈ wie oben berechnet

(2) [APOLLO_2007 [8] Fig.10]

(3) [APOLLO_2007 [8] §8] „record returns“ in October 2005

(4) [APOLLO_2007 [8] §8] „rates in subsequent months“

(5) [APOLLO_2007 [8] §8] „peaks on Apollo 15 array“

(6) Weniger als von der Rückstreuung her erwartet. Dies kann auf ein (zu) kurzes Zeitfilter (Range Gate, Messtiefe oder Verschlusszeit) zurückzuführen sein.

Die gemessenen Werte stimmen gut mit den durch die Streuung an der Mondoberfläche erwarteten Photonen überein. Folglich konnte keine Verstärkung des Rücksignales durch Retro-Reflektoren gemessen werden.

Die ersten drei Apache Point Messungen in Tabelle 4-3 liegen etwa auf einen Faktor 2 genau im erwarteten Bereich von 0.11. Die 0.135 Photonen/Puls wurden sogar als „Rekordmessung“ bezeichnet, d.h. frühere Messungen waren weniger ergiebig; dabei wird nicht gesagt, ob diese Aussage absolut oder relativ zur Teleskopgrösse gemeint ist. Die kurzzeitigen Peaks von 0.6 Photonen pro Puls liegen einen Faktor 5.5 über dem Streuungsbudget, jedoch immer noch einen Faktor 110^1 unter dem, was man bei dem angepeilten Retroreflektor von Apollo 15 minimal zu erwarten hätte.

¹ $110 = 3 \cdot 22 / 0.6$; Der Apollo 15 Retroreflektor- Array besteht aus 300 Einzelreflektoren, ist also 3x grösser als der von Apollo 11, für den das Budget aufgestellt wurde.

Ein gemessener Peak von einem Faktor 5.5 über Streuungsbudget wäre hoch, aber er kann immer noch im Unsicherheitsbereich liegen. Einerseits kann insbesondere die atmosphärische Transmission auch besser sein, andererseits ist die Albedo des Mondes nicht über den ganzen Mond konstant. Man kann also auf eine besser reflektierende Fläche gemessen haben und zusätzlich noch vom Oppositionseffekt, das heisst einer Vergrößerung des Rückstrahlvermögens bei identischer Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung profitiert haben. Dieser Effekt beruht im Wesentlichen darauf, dass die ganze beobachtete Fläche beleuchtet ist, dass man also keine schattigen Stellen sieht – im Gegensatz zur allgemeinen Konstellation, bei der die Albedo ermittelt wird.

Bei der Messung [APOLLO_2007 [8] Fig.10] ist die Längenstreuung sehr klein, wie sie etwa bei der Messung auf einen Retroreflektor zu erwarten ist. Der gleiche Effekt wird jedoch erreicht, wenn auf eine Fläche senkrecht zur Messrichtung gemessen wird. Dies ist durchaus möglich, da der Strahl gemäss [Degnan_1993 [6] Gleichung 3.9.9] einen Öffnungswinkel von $\pm \frac{\lambda}{\pi \cdot \rho_0}$ aufweist, was bei $\rho_0=2\text{cm}$ einem Radius auf dem Mond von 3.2 km entspricht. Bei $\rho_0=10\text{cm}$ ist der Radius noch 640m und die entsprechende Spotfläche 1.3 km² gross.

Wie schon die Einführung des zusätzlichen Wirkungsgrades η_{add} sowie die nicht so einfache Abschätzung des Einflusses der Atmosphäre zeigen, ist die genaue Vorhersage der Anzahl empfangener Photonen bei einer Retro-Reflektormessung auf den Mond nicht trivial. Ein wahrscheinlich gewichtiger Punkt wurde noch nicht angesprochen: ein flacher Retro-Reflektor ist empfindlich auf die Einfallrichtung. Das zurückgestreute Licht nimmt sehr schnell ab, wenn die Einfallrichtung nicht senkrecht ist. Dies sieht man in [Degnan_1993 [6] Fig.23]: bei einer Abweichung des Einfallswinkels von 13° wird noch 50% zurückgestreut und bei einer Abweichung von $\geq 40^\circ$ gar nichts mehr. Doch wenn man die Positionen der Retro-Reflektoren so genau kennte inkl. deren Bauweise, dann könnte man erwarten, dass dies in den Link-Budgets entsprechend berücksichtigt würde resp. dass dann gemessen würde, wenn der Einfallswinkel etwa senkrecht wäre.

5 Zusammenfassung und Schlusswort

Bei den untersuchten Laserdistanzmessungen zum Mond wird zwar von Messungen auf Laser-Retroreflektoren berichtet, jedoch wurde nie ein entsprechend verstärktes Rücksignal gemessen. Mit anderen Worten: man hatte bei allen Messungen nur das von der Mondoberfläche zurückgeworfene Licht gemessen. Dass man bei Laser-Retroreflektoren viel mehr Licht empfangen sollte, zeigen neben der hier gemachten Analyse auch diejenige vom Observatorium der Côte d'Azur deutlich.

Die Laserdistanzmessungen auf Retroreflektoren auf dem Mond sind also offenbar ein Teil des Schauspiels, die Apollo Mondlandungen als real darzustellen. Die damit erzählten Geschichten sind gut erfunden:

- Die Retro-Reflektoren arbeiteten auch nach 25 Jahren normal [Dickey 1994 [2] S. 3]
- Der Mond entferne sich 3.8 cm pro Jahr von der Erde [Dickey 1994 [2] Seite 34]

Der Wert von 3.8 cm pro Jahr kann völlig falsch sein, da man nicht genau weiss, von welcher Stelle des Mondes das reflektierte Licht jeweils stammte. Um diese Unsicherheit auszugleichen, müsste man über eine viel längere Zeit messen.

Kritisches Hinterfragen von hochkarätig publizierten Resultaten hat in der heute gelebten Wissenschaft offenbar keinen Platz.

Bei [APOLLO_2007 [8] §8] wird zwar die Inkonsistenz zum erwarteten Link-Budget angesprochen, jedoch gleich wieder heruntergespielt: „... *we have not seen returns at the rate anticipated by a simple link budget.*...“. Wie oben gezeigt, ist das Link-Budget, vor allem wenn man die richtigen Zahlen einfüllen will, alles andere als simpel.

6 Referenzen

- [1] Apollo 11 Preliminary Science Report (1969)
<http://history.nasa.gov/alsj/a11/a11psr.html>
- [2] Dickey 1994: Lunar Laser Ranging: A Continuing Legacy of the Apollo Program
<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/32452/1/94-0193.pdf>
- [3] Apollo 11 Image Library
<http://www.history.nasa.gov/alsj/a11/images11.html#Mag40>
- [4] <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-05/features/improved-apd-design-boosts-photon-counting-detector-efficiency.html>: „typical detection efficiency of ... 70% at 532 nm“
- [5] The BepiColombo Laser Altimeter (BELA): Concept and baseline design
http://www.ipgp.fr/~wieczor/MyPapers/Thomas_et_al_2007.pdf
- [6] Degnan_1993: Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review
http://edc.dgfi.badw.de:8080/science_analysis/docs/degnan/Milimeter/MillimeterAccuracySatelliteLaserRangingReview.pdf
- [7] Klein_Degnan_1974: Optical Antenna Gain. 1: Transmitting Antennas
Applied Optics / Vol. 13, No.9 / September 1974
- [8] APOLLO_2007: the Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation: Instrument Description and First Detections
<http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/0710.0890v2.pdf>
- [9] Wettzell: Die Hochpräzisionsvermessung der Mondbewegung
<http://www.fesg.bv.tum.de/91872---fesg-forschung-llr.html>
- [10] The Intrinsic Seeing Quality at the WHT Site (William Herschel Telescope, La Palma, 2'344m) <http://www.ing.iac.es/Astronomy/development/hap/dimm.html>
- [11] méthode historique d'évaluation de la distance Terre-Lune et du diamètre de la Lune
<http://eduscol.education.fr/bd/urtic/phy/?commande=aper&id=2156>
- [12] New Scientist (No. 344) 20. Juni 1963, Seiten 672&673
<http://books.google.ch/books?id=0hWpWSF7e7YC> Suche nach „laser moon“

Autor:
Andreas Märki
Ingenieur ETH
Föhrenstrasse 9
CH-8703 Erlenbach ZH
andreas@apollophotos.ch
www.apollophotos.ch

Märki
Analytics
for **Space**

