

Ein lasergestütztes Messsystem zur
Entfernungsbestimmung von Mond und Satelliten
nach dem Puls-Echo-Verfahren

DIPLOMARBEIT

im Studiengang Physikalische Technik
zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (FH)

vorgelegt dem

Fachbereich
Mathematik, Naturwissenschaften und Datenverarbeitung

der

Fachhochschule Gießen-Friedberg

von

MANUEL KREMER

August 2004

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Johannes M. Ohlert
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Klaus Behler

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Friedberg, den 25.08.2004

Manuel Kremer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist die (thematische) Fortsetzung einer Studienarbeit [KM04], die Severin Massa und ich im Rahmen der Lehrveranstaltung „Konstruktion Lasersysteme“ im Wintersemester 03/04 an der Fachhochschule Gießen-Friedberg erstellt haben. Während die Studienarbeit das Thema Laser Ranging nur am Rande und auch nur prinzipiell beschreibt, soll diese Diplomarbeit einen ersten Schritt in Richtung der Realisierung des Projektes leisten.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinen beiden Betreuern Professor Dr. Johannes Ohlert und Professor Dr. Klaus Behler für die Motivation zum Thema dieser Arbeit, sowie für die stete Unterstützung und Hilfsbereitschaft bedanken.

Für die Bereitstellung von technischem Gerät und dem mir entgegengebrachten Vertrauen gebührt mein Dank Professor Dr. Karl-Friedrich Klein, Herrn Dipl.-Ing. Axel Miebach und Herrn Dipl. Phys.-Ing. Guido Pudel.

Bei der Durchführung der zum Teil langwierigen Messungen bekam ich viel Unterstützung. Besonders Andreas Kremer und Matthias Trost muss ich hier für die aufgebraachte Geduld danken.

Meinem guten Freund Martin Müller möchte ich an dieser Stelle besonders für die Unterstützung und die vielen anregenden Diskussionen danken.

Nicht zuletzt möchte ich noch meinen Kommilitonen Sven Frank, Daniel Garth, Severin Massa, Josef Mauer und Christian Schmidt für das Interesse und die vielen hilfreichen Diskussionen und Tips danken.

Friedberg, im August 2004

Manuel Kremer

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit	6
1.1 Aufgabenstellung	6
1.2 Aufbau der Arbeit	7
2 Einleitung	9
2.1 Historie	9
2.2 Anwendungen des Laser Ranging	10
3 Beschreibung des Messprinzips	12
3.1 Detailbetrachtungen „Mond“	13
3.2 Detailbetrachtung „Satellit“	16
3.2.1 ADEOS 1+2	16
3.2.2 ERS 1+2	18
3.2.3 LAGEOS 1+2	20
4 Die Erdatmosphäre	22
4.1 Aufbau der Erdatmosphäre	22
4.1.1 Troposphäre	22
4.1.2 Ionosphäre	22
4.2 Abschätzung der Verluste durch Extinktion	23
4.2.1 Extinktion durch Streuung an Luftmolekülen	23
4.2.2 Dunstextinktion	27
4.2.3 Gesamtverluste	29
4.3 Messkorrektur mit dem Atmosphärenmodell nach MARINI und MURRAY .	30
4.4 Computerprogramm zur Simulation	31
4.5 Atmosphärische Fenster	34

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	4
5 Geeignete Laser	36
5.1 Anforderungen an den Laser	36
5.1.1 Wellenlänge	36
5.1.2 Möglichkeit zur Erzeugung kurzer Pulse und Wiederholrate	37
5.1.3 Strahldivergenz	37
5.1.4 Pulsenergie	37
5.2 Kommerzielle Laseranlagen	38
5.2.1 Laserserie YG900 und YG980 von QUANTEL	38
5.2.2 Lasersystem von Coherent	41
6 Geeignete Empfänger	44
6.1 Treburer-1m-Teleskop	44
6.2 Filterungen	46
6.3 Vergleich verschiedener Detektortypen	46
6.3.1 Photodioden	46
6.3.2 Photomultiplier	46
6.4 Anforderungen an einen Detektor	47
7 Vergleich / Auflistung bestehender Messsysteme	50
7.1 Wettzell Laser Ranging System	52
7.2 Observatorium in Grasse	53
7.3 McDonald Observatorium	54
8 Laboraufbau eines Entfernungsmesssystems	55
8.1 Beschreibung der verwendeten Geräte	55
8.1.1 Argonionen-Laser	55
8.1.2 Chopperrad	56
8.1.3 Photodiode	57
8.1.4 Messdatenerfassung	57
8.2 Versuchsaufbau	57
8.3 Auswertung und Ergebnisse	61
8.4 Fehlerabschätzung	63
9 Kostenabschätzung	66
10 Abschließende Betrachtungen	67
10.1 Zusammenfassung	67
10.2 Ausblick	68

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	5
A Mondkarten der Retroreflektoren	69
A.1 Standort des Apollo 11-Reflektors	71
A.2 Standort des Apollo 14-Reflektors	72
A.3 Standort des Apollo 15-Reflektors	73
A.4 Standort des Luna 17-Reflektors	74
A.5 Standort des Luna 21-Reflektors	75
B Zum Laser Ranging geeignete Satelliten	76
C Datenblatt des ORX 83 A	79
D Datenblatt des Argonionen-Lasers	82
E Berechnungen mit Mathcad	84
F Quellcode	93
F.1 Korrekturformel nach Marini und Murray	93
F.2 Schwerpunktberechnung	112
Literaturverzeichnis	124

Kapitel 1

Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

In diesem Kapitel wird zunächst die genaue Aufgabenstellung der vorliegenden Diplomarbeit formuliert. Danach folgen Erläuterungen zum Aufbau der Arbeit und schließlich noch eine Auflistung der verwendeten Formelzeichen und deren Bedeutung.

1.1 Aufgabenstellung

Der Fachbereich MND der Fachhochschule Gießen-Friedberg plant in Zusammenarbeit mit der Astronomie Stiftung Trebur¹ eine Messstation zur lasergestützten Bestimmung des Erde-Mond-Abstandes und der Entfernung von Satelliten aufzubauen.

Im Rahmen dieser Bestrebungen wurde die vorliegende Diplomarbeit vergeben, die die folgenden Ziele verfolgt:

- Eine detaillierte Beschreibung und Analyse des Messprinzips.
- Abschätzung der Verluste beim Durchgang durch die Erdatmosphäre und daraus Ermittlung der Anforderungen, die an die Systemkomponenten wie z.B. Laserquelle, Detektor, Zeitnormal usw. gestellt werden.
- Vorstellung unterschiedlicher Auswertemethoden der ermittelten Messdaten (z.B. Flankendetektion, Impulsschwerpunkt,...).
- Vergleich mit bereits bestehenden Messstationen.
- Abschätzung der zur Verwirklichung zu erwartenden Kosten.
- Experimenteller Aufbau eines Laserentfernungsmesssystems mit denen in der FH Gießen-Friedberg zur Verfügung stehenden Komponenten.

Eine vollständige Entwicklung eines solchen Messsystems würde den Rahmen einer einzelnen Diplomarbeit bei weitem übersteigen. Deshalb muss an dieser Stelle eine Abgrenzung des Themengebietes vorgenommen werden:

¹Astronomie Stiftung Trebur
Fichtenstraße 7
65468 Trebur

Nicht Teil dieser Diplomarbeit sind Betrachtungen, die sich mit der detaillierten Konstruktion der Messanlage (z.B. mit der Einkopplung des Laserstrahles in das Teleskop und dessen Nachführung während der Messung) oder deren benötigter Infrastruktur (wie z.B. der Starkstromversorgung des Lasers) beschäftigen.

Die Arbeit soll also vor allem als Grundlage dienen, auf der spätere Diplom- oder Studienarbeiten, die sich mit den Problemen der praktischen Umsetzung beschäftigen, aufbauen können.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Abschnitt wird die Strukturierung der Diplomarbeit kurz beschrieben.

Kapitel 1, Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit: Hier wird zunächst die genaue Aufgabenstellung formuliert und auf den Aufbau der Diplomarbeit eingegangen.

Kapitel 2, Einleitung: In diesem Kapitel wird zuerst eine kurze historische Einführung in das Themengebiet der optischen Distanzmessung gegeben. Daran anschließend folgt eine Aufführung der vielen unterschiedlichen Anwendungen solcher Messungen.

Kapitel 3, Beschreibung des Messprinzips: Dieses Kapitel stellt die Grundlage der Arbeit dar und sollte daher unbedingt zuerst gelesen werden. Es werden zu Beginn die gemeinsamen Grundlagen der Messungen zum Mond und nach Satelliten dargestellt. Danach wird auf die Unterschiede eingegangen und es erfolgt die Definition der zu messenden Größen.

Kapitel 4, Die Erdatmosphäre: Die Erdatmosphäre sorgt wegen ihrer Wechselwirkung mit den Photonen sicherlich für die größten Schwierigkeiten bei der genauen Bestimmung des Mond- und Satellitenabstandes. Es wird zunächst der Aufbau der Atmosphäre kurz beschrieben. Danach werden die Intensitätsverluste der Laserstrahlung in der Atmosphäre abgeschätzt und es wird auf das Atmosphärenmodell von MARINI und MURRAY eingegangen. Zum Schluss werden noch die sog. „atmosphärischen Fenster“ betrachtet, deren Kenntnis für eine Auswahl der Laserwellenlänge wichtig ist.

Kapitel 5, Geeignete Laser: Aufbauend auf den Ergebnissen des vorigen Kapitels werden hier die für die Messung notwendigen Anforderungen an den Laser beschrieben. Dazu gehört neben der Wellenlänge und der Ausgangsleistung auch noch die Möglichkeit sehr kurze Impulse zu erzeugen. Danach folgt noch ein Überblick der auf dem Markt befindlichen Laser, welche den benötigten Anforderungen genügen.

Kapitel 6, Geeignete Empfänger: Zunächst erfolgt in diesem Kapitel eine Beschreibung des zur Messung zu verwendenden Teleskops der Astronomie Stiftung Trebur. Der weitere Inhalt dieses Kapitels ist vom Konzept her praktisch identisch mit dem vorherigen: Es werden zunächst die Anforderungen, welche die Messung an die Detektoren stellt, beschrieben. Anschließend werden die Funktionsweise und die charakteristischen Eigenschaften unterschiedlicher Photonendetektoren erläutert. Zum Schluss folgt auch hier ein Überblick der auf dem Markt befindlichen Detektoren.

Kapitel 7, Vergleich / Auflistung bestehender Messsysteme: Bei der Entwicklung eines solchen Messsystems ist es natürlich von großem Nutzen sich bereits bestehende Stationen vor allem hinsichtlich deren Systemkomponenten (Laser, Teleskop, Detektoren,...) anzuschauen. Dieses Kapitel stellt einige Anlagen vor, welche

zum Teil schon seit einigen Jahrzehnten zuverlässige Messungen zum Mond und nach Satelliten durchführen.

Kapitel 8, Laboraufbau eines Entfernungsmesssystems: In diesem Kapitel werden der Versuchsaufbau und die erzielten Ergebnisse einer durchgeführten Entfernungsmessung im Labormaßstab beschrieben. Es wird vor allem auf die Problematik der Messdatenauswertung eingegangen.

Kapitel 9, Kostenabschätzung: Basierend auf den Kapiteln fünf und sechs erfolgt hier eine Abschätzung der bei der Verwirklichung des Messaufbaus zu erwartenden Kosten.

Kapitel 10, Abschließende Betrachtungen: Dieses Kapitel enthält eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse sowie einen Ausblick über die noch ausstehenden Arbeiten.

Kapitel 2

Einleitung

Im folgenden Kapitel werden die geschichtliche Entwicklung der Laserentfernungsmessung (von der ersten Idee bis zur ersten erfolgreichen Messung), sowie die verschiedensten Anwendungen der (astronomischen) Entfernungsbestimmung kurz erläutert.

2.1 Historie

Schon in den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelten einige Forscher unter der Leitung von ROBERT H. DICKE an der Universität in Princeton das Konzept einer optischen Entfernungsbestimmung mit Hilfe einer starken Lichtquelle, wobei bei bekannter Lichtgeschwindigkeit die zurückgelegte Wegstrecke aus der Laufzeit des Lichtstrahls berechnet werden kann [Obs04c].

Nachdem MAIMAN im Jahre 1960 die Entwicklung des ersten Lasers gelang, dauerte es folglich nicht lange, bis erste Entfernungsmessungen mit Hilfe gepulster Laserstrahlung gelangen. Die Gruppe um R. H. DICKE machte auch erste Vorschläge zur Anbringung von Reflektoren an Satelliten um somit deren Entfernung und Flugbahn exakt vermessen zu können.

Durch die ständige Weiterentwicklung von Laser und Empfangselektronik konnte die Messgenauigkeit ständig weiter verbessert werden. Eine Übersicht über die Steigerung der Messgenauigkeit von Entfernungsmessungen zum Mond ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

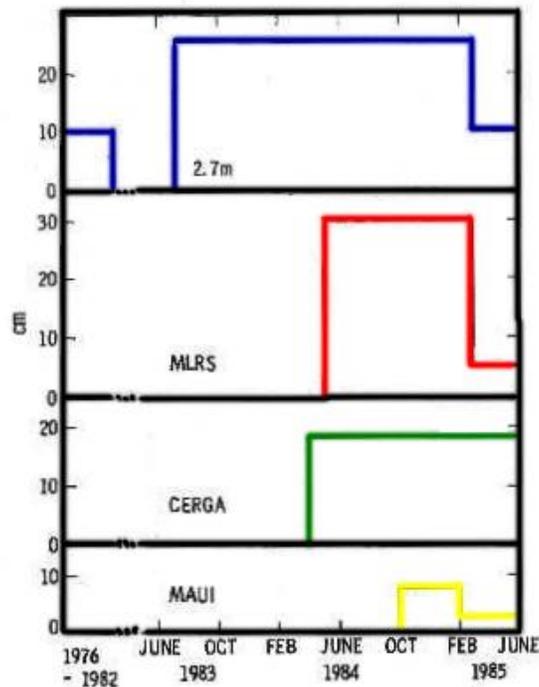


Abbildung 2.1: Entwicklung der Messgenauigkeit [DNW85]

Die vier verschiedenen Kurven stellen die von unterschiedlichen Messstationen erzielten Genauigkeiten dar. Die Abkürzungen bedeuten:

2,7 m: McDonald Observatorium, Texas (siehe hierzu auch Abschnitt 7.3).

MLRS: McDonald Laser Ranging System.

CERGA: Grasse-Teleskop, Frankreich (siehe Unterabschnitt 7.2).

MAUI: Haleakala Site (Insel Maui, Hawaii).

Gut zu erkennen ist die stetige Verbesserung der Messgenauigkeit. War den Messungen beispielsweise noch 1983 eine Unsicherheit von etwa 30 cm angehaftet, so konnte diese innerhalb der nächsten zwei Jahre auf gut fünf cm verbessert werden. Heutzutage sind Genauigkeiten bis auf etwa einen cm erreichbar.

2.2 Anwendungen des Laser Ranging

Die hochpräzise Vermessung der Distanz zu speziellen Satelliten und zum Mond dient in erster Linie der Bestimmung verschiedenster geophysikalischer Parameter.

Vor allem die Messungen zum Mond liefern wichtige Beiträge zu unter anderem der [DHSS86]:

- Bestimmung geozentrischer Koordinaten der Bodenstation,
- Präzise Erfassung der Polbewegung und der Rotationsphase der Erde,

- Überprüfung von Theorien bezüglich der Präzession¹ und der Nutation² der deformierbaren Erde,
- Ableitung selenozentrischer³ Reflektorkoordinaten,
- Vermessung der Mondrotation,
- Bestimmung des Schwerefeldes des Mondes, sowie
- Überprüfung von relativistischen Gravitationstheorien.

Anhand der Satellitenmessungen können vor allem lokale Effekte, wie z. B. die lokalen Schwankungen des Gravitationsfeldes der Erde erfasst werden.

In den Aufsätzen von J.O. Dickey et al. vom California Institute of Technology wird sehr ausführlich beschrieben, wie die Auswertung der gemessenen Daten sowie daraus die Bestimmung von geophysikalischen Parametern vollzogen werden kann. Vor allem die Einflüsse des Laser Ranging auf die Vermessung der Erdrotation und der Polbewegungen [DWE83, DNW85], sowie zu Untersuchungen bezüglich des Mondeinflusses auf Ebbe und Flut und der Bestimmung von Präzession und Nutation [DWN83] werden diskutiert.

Ludwig Ballani erörtert in [Bal82] die Grundzüge der Modellbildung des dynamischen Erde-Mond-Systems und stellt einige Ergebnisse von Messungen mit dem McDonald Observatorium (siehe hierzu auch Abschnitt 7.3) vor.

¹Präzession: Verlagerung des Schnittpunktes des Himmelsäquators mit der Ekliptik längs der Ekliptik.

²Nutation: Schwankung der Präzession der Erdachse mit einer Periode von etwa 18,6 Jahren. Ursache ist die vornehmlich um 5 ° gegen die Erdbahnebene geneigte Mondbahn.

³selenozentrisch: Auf den Mondmittelpunkt bezogen.

Kapitel 3

Beschreibung des Messprinzips

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der lasergestützten Entfernungsmessung ist relativ simpel: Es werden mit Hilfe eines geeigneten Lasersystems kurze, energiereiche Lichtimpulse erzeugt. Diese Impulse werden auf ein mit Reflektoren versehenes Ziel gelenkt und von dort aus wieder zum Sendeort reflektiert.

Die eigentlichen Messgrößen sind dann der Zeitpunkt des Sendens t_S und der des Empfangens t_E . Für die Distanz s zwischen der Sendestation und dem Ziel gilt dann:

$$s = c \cdot \frac{t_E - t_S}{2} = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im entsprechenden Medium darstellt.

Abbildung 3.1 zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild des Messprinzips.

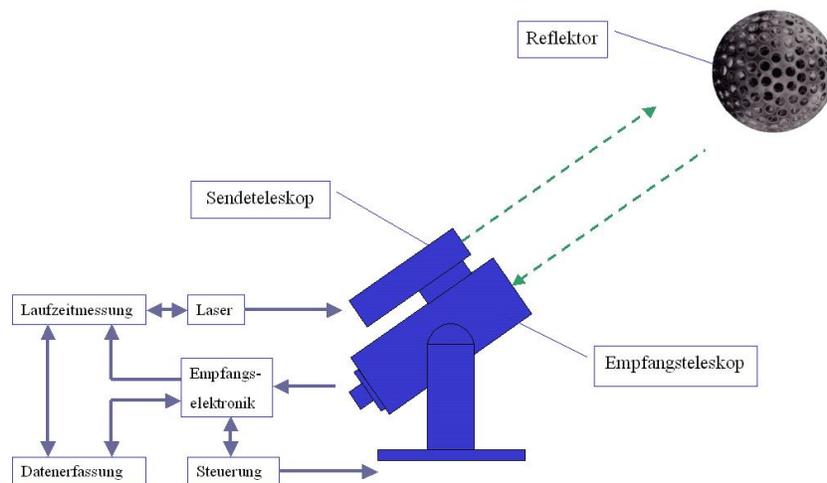


Abbildung 3.1: Zum Messprinzip (nach Seeber [See88])

Für die Messung solch großer Distanzen wie der Entfernung zu Satelliten oder gar zum Mond muss die auszusendende Laserstrahlung zunächst aufgeweitet werden, um die

Strahldivergenz¹ zu verkleinern (vergleiche mit den Energiebetrachtungen in Unterkapitel 3.1). Dazu werden die Laserimpulse zunächst in ein **Sendetelekop**² eingekoppelt. Der ausgehende Laserimpuls erzeugt ein Startsignal in der **Laufzeitmessung**. Wird die zurückkehrende Strahlung durch das **Empfangsteleskop** zur **Empfangselektronik** geleitet, erfolgt das Stoppsignal. Die Zeitmessung erfolgt hierbei üblicherweise durch hochpräzise Atomuhren (z. B. Cäsium-Normal). In der nachfolgenden **Datenverarbeitung** werden die Messdaten analysiert und ausgewertet.

3.1 Detailbetrachtungen „Mond“

Im Rahmen der ersten bemannten Mondlandung von Apollo 11 am 20. Juli 1969 wurde der erste zur Reflexion von ankommender Laserstrahlung konzipierte Reflektor auf der Mondoberfläche aufgestellt. Dieser Reflektor besteht aus 100 einzelnen Retroreflektoren, welche das einfallende Licht in die gleiche Richtung zurück reflektieren aus der es einfiel.

Die NASA-Missionen Apollo 14 (05.02.1971) und Apollo 15 (30.07.1971) setzten ebenfalls jeweils einen Reflektorarray an ihrem Landeplatz aus. Zwei weitere Reflektoren wurden im Rahmen der französisch-sowjetischen unbemannten Missionen Luna 17 (17.11.1970) und Luna 21 (16.01.1973) auf der Mondoberfläche angebracht.

Die Abbildung 3.2 zeigt den von Armstrong und Aldrin im Rahmen von Apollo 11 auf der Mondoberfläche aufgestellten Reflektor.



Abbildung 3.2: Reflektor auf der Mondoberfläche [NAS04]

Die folgende Abbildung 3.3 zeigt eine detaillierte Prinzipzeichnung, die den Aufbau eines solchen Reflektorarrays darstellt. Gut zu erkennen sind die bereits beschriebenen 100 Einzelreflektoren, sowie die Einstellmöglichkeiten der Neigung des gesamten Panels.

¹ $w \cdot \Theta = konst.$ (w : Strahlradius, Θ : Divergenzwinkel)

²Üblicherweise besteht eine Messanlage aus einem Teleskop, welches sowohl zur Aufweitung als auch zum Empfang der Lichtimpulse dient.

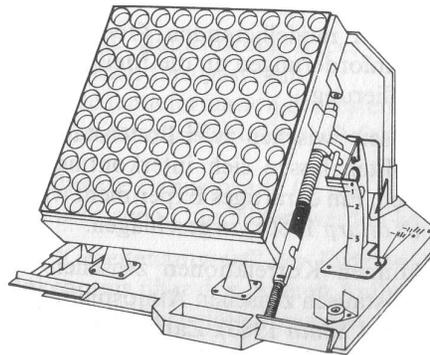


Abbildung 3.3: Prinzipzeichnung eines Reflektors [See88]

Der Reflektor hat eine Kantenlänge von etwa einem Meter und ist daher mit Teleskopen von der Erde aus auf der Mondoberfläche nicht zu erkennen. Um mit einem Laserimpuls den Spiegel dennoch zu treffen, wird die Position des Reflektors mit dem Teleskop angepeilt und dann praktisch „blind“ solange auf die Stelle „geschossen“, bis ein Echo detektiert wird. Dabei wird sich bei der Ausrichtung des Teleskops zum einen an den markanten Kraterstrukturen auf der Mondoberfläche und zum anderen an den von der NASA angegebenen Koordinaten der Reflektoren orientiert. Der jeweilige Landeplatz mit den dazugehörigen lunaren Längen -und Breitengraden, sowie Detailkarten der Mondoberfläche mit den eingezeichneten Standorten sind im Anhang A dieser Arbeit zu finden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Messung der Distanz zu Satelliten und der zum Mond ist selbstverständlich die Entfernung selbst. Während die zur Entfernungsmessung geeigneten Satelliten in etwa 800 - 6000 km Höhe die Erde umrunden, beträgt der Abstand zum Mond ca. 384.400 km.

Der von einer Messstation auf der Erde emittierte Laserimpuls weitet sich mit größer werdender Entfernung in Folge der Strahldivergenz immer stärker auf. Die folgende Rechnung verdeutlicht dies unter Annahme üblicher Strahleigenschaften.

$$\text{Strahldurchmesser (unaufgeweitet): } w_0 = 8 \text{ mm}$$

$$\text{halber Divergenzwinkel (unaufgeweitet): } \Theta_0 = 0,1 \text{ mrad}$$

$$\text{Strahlparameterprodukt: } w_0 \cdot \Theta_0 = \text{konst.} = 0,8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

$$\text{Strahldurchmesser (aufgeweitet): } w = 1200 \text{ mm}$$

$$\text{halber Divergenzwinkel (aufgeweitet): } \Theta = \frac{w_0 \cdot \Theta_0}{w} = 6,667 \cdot 10^{-4} \text{ mrad}$$

Entfernung zum Messobjekt: $\Lambda = \begin{pmatrix} 800 \\ 3.000 \\ 5.000 \\ 384.400 \end{pmatrix} km$

Strahldurchmesser in Abhängigkeit vom Laufweg: $d_i = w + 2 \cdot \Lambda_i \cdot \tan(\Theta)$

Ergebnis: $d = \begin{pmatrix} 1,876 \\ 5,200 \\ 7,867 \\ 513,733 \end{pmatrix} m$

In einer Entfernung von 800 km (entspricht etwa der Flughöhe der Satelliten ADEOS-1 und -2, sowie ERS-1 und -2) hat der auf 1,20 m aufgeweiteter Laserstrahl einen Durchmesser von etwa 1,88 m. Entsprechend größer wird der Durchmesser mit größer werdenden Entfernungen, bis sich schließlich auf der Mondoberfläche der Durchmesser des Laserstrahls von ursprünglich 1,20 m auf knapp 514 m aufgeweitet hat. Der unaufgeweitete Strahl hätte, im Vergleich dazu, einen Durchmesser von knapp 77 km auf der Mondoberfläche.

Da die Retroreflektoren nur eine Kantenlänge von etwa 1 m haben, geht ein Großteil der ausgesandten Photonen verloren. Im folgenden wird rein geometrisch (ohne Berücksichtigung der Erdatmosphäre und den Verlusten an Spiegeln und Reflektoren) abgeschätzt, welcher Prozentsatz der ausgesandten Photonen wieder auf der Erde detektiert werden kann.

Annahme:

Laserenergie: $E = 1 J$

Wellenlänge: $\lambda = 532 nm$

Anzahl der Photonen pro Laserimpuls: $N = E \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} = 2,676 \cdot 10^{18}$

Fläche, die der Strahl auf der Mondoberfläche bedeckt: $A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 2,073 \cdot 10^5 m^2$

Fläche eines Reflektors: $A_{Ref} = 1 m^2$

Anzahl der zurückreflektierten Photonen: $N_1 = N \cdot \frac{A_{Ref}}{A} = 1,291 \cdot 10^{13}$

Annahme: Der Strahl weitet sich auf dem Rückweg ähnlich auf.

Detektorfläche (Fläche des Treburer-1m-Teleskop): $A_{Det} = \pi \cdot \left(\frac{1,20 m}{2}\right)^2 = 1,131 m^2$

Anzahl der detektierbaren Photonen: $N_2 = N_1 \cdot \frac{A_{Det}}{A} = 7,044 \cdot 10^7$

N_2 in Abhängigkeit der Eingangsparameter: $N_2 = E \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \frac{A_{Ref} \cdot A_{Det}}{A^2}$

Prozentsatz der detektierbaren Photonen: $D = \frac{N_2}{N} = 5,456 \cdot 10^{-4} \%$

Anhand dieser stark vereinfachten Abschätzung lässt sich schon die große Problema-

tik solcher Messungen erkennen: Es ist trotz der starken Aufweitung des Lasers beim Senden und der großen Detektorfläche durch das Teleskop äußerst schwierig ein Echo vom Mond zu empfangen.

Das zweimalige Passieren der Erdatmosphäre verschlechtert diese Bilanz noch weiter. Durch die Erfahrungen, die bereits bestehende Stationen bei ihren zum Teil langjährigen Messungen gesammelt haben (siehe Kapitel 7), ist zu erwarten, daß etwa jedes 10^{19} -te Photon wieder am Ausgangspunkt detektiert werden kann. Von jedem ausgesendeten Laserimpuls der - wie bereits weiter oben abgeschätzt - aus etwa 10^{19} Photonen besteht, erreicht also im Mittel eines den Detektor. Dies stellt äußerst hohe Anforderungen an die Nachweiselektronik.

3.2 Detailbetrachtung „Satellit“

Entfernungsmessungen zu Satelliten sind bezüglich der Energiebilanz um einiges unkritischer. Führt man die gleiche Abschätzung wie oben nur mit geringerer Entfernung (hier: 800 km) durch, so erhält man für die Anzahl der detektierbaren Photonen $N_2 = 1,44 \cdot 10^{17}$, was einem Prozentsatz von etwa $D = 5,38 \%$ entspricht. Es kommen also im Vergleich zur Mondmessung etwa $5 \cdot 10^{10}$ mal mehr Photonen zurück.

Die Anzahl der weltweiten Messstationen bestätigt ebenfalls diese Abschätzung: Während es im Moment über 50 Stationen gibt, die Entfernungsmessungen zu Satelliten durchführen, gibt es weltweit nur vier Anlagen, mit denen erfolgreich Entfernungsmessungen zum Mond durchgeführt werden können. Einige dieser Anlagen sind in Kapitel 7 besonders hinsichtlich ihrer technischen Ausstattung beschrieben.

An allen zur Entfernungsmessung konzipierten Satelliten sind, ähnlich wie auf der Mondoberfläche, spezielle Retroreflektoren angebracht, die das einfallende Licht wieder zum Ausgangspunkt reflektieren.

Eingeteilt werden können diese Satelliten nach ihrem Verwendungszweck. Die meisten (z.B. ADEOS 1+2 und ERS 1+2) sind multifunktional, d. h. sie erfüllen neben der Reflektion von Laserstrahlung zur Entfernungsbestimmung noch weitere Aufgaben. Einige Satelliten (z.B. LAGEOS 1+2) sind allerdings speziell für das Laser Ranging entwickelt worden.

In den folgenden Unterabschnitten werden einige der gängigsten Satelliten und deren charakteristische Parameter vorgestellt.

3.2.1 ADEOS 1+2

Die beiden **AD**vanced **E**arth **O**bserving **S**atellites wurden im Jahre 1996 (ADEOS 1), bzw. 2002 (ADEOS 2) gestartet. Neben dem Ermöglichen der Entfernungsbestimmung mittels Laserstrahlung sind die Missionsziele der beiden Satelliten unter anderem [ILR03]:

ADEOS 1: Ermitteln von Daten über globale Umweltveränderungen, wie zum Beispiel:

- Treibhauseffekt
- Abnahme der Ozonschicht
- Abholzung des tropischen Regenwaldes

ADEOS 2:

- Überwachung des globalen Wasser- und Energiekreislaufes
- Quantitative Bestimmung der Biomasse und deren Produktion als Teil des für die globale Erwärmung wichtigen Kohlenstoffkreislaufes

Die folgenden beiden Abbildungen 3.4 und 3.5 zeigen jeweils in Teil a) eine Gesamtansicht des jeweiligen Satelliten und in Teil b) eine Detailansicht des am Satelliten befindlichen Retroreflektors.

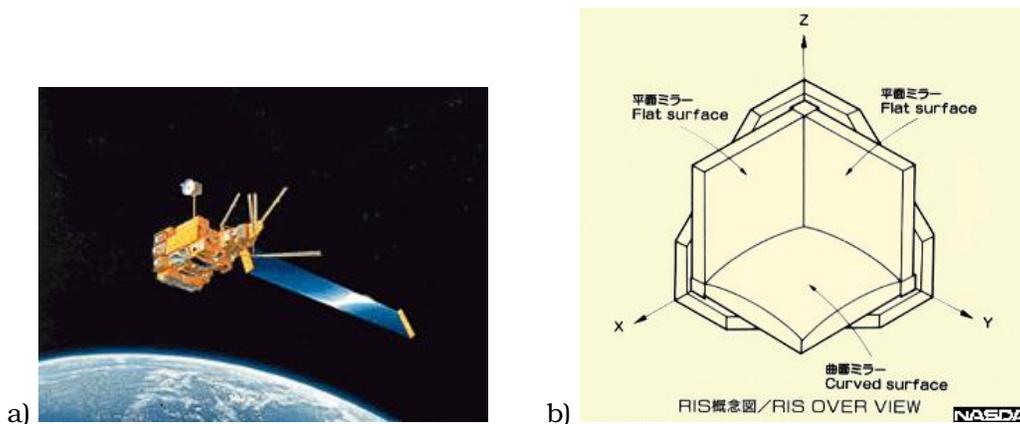


Abbildung 3.4: ADEOS 1 [ILR03]

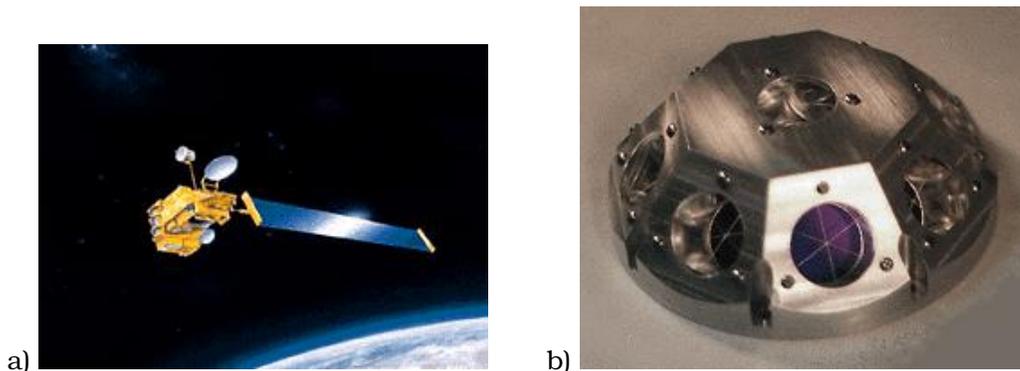


Abbildung 3.5: ADEOS 2 [ILR03]

Der an ADEOS 1 angebrachte Reflektor besteht aus drei rechtwinklig zueinander angeordneten Spiegeln, von denen zwei plan und einer leicht gewölbt (sphärisch) ausgeführt sind. Der Retroreflektor hat einen effektiven Durchmesser von etwa 50 cm.

Das Reflektorarray an ADEOS 2 besteht aus insgesamt neun einzelnen Reflektoren, die aus strahlungsresistentem Suprasil-Quarz gefertigt sind. Die Reflektoren sind für Laserstrahlung der Wellenlänge 532 nm optimiert. Durch die sphärische Anordnung der Einzelreflektoren kann ADEOS 2 auch aus sehr flachen Winkeln (360° Azimut³ und 60° Elevation⁴) noch zum Laser Ranging genutzt werden.

³Azimut: Diejenige Koordinate, deren Koordinatenlinien Breitenkreise sind.

⁴Elevation: Bezeichnet den Winkel zwischen dem Satelliten und dem Horizont.

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Parameter (z. B. Inklination⁵, Exzentrizität⁶, Perigäumshöhe⁷,...) der beiden Satelliten zusammengestellt [ILR03].

	ADEOS 1	ADEOS 2
Eigentümer	(JAXA) Japan	(JAXA) Japan
Starttermin	17. August 1996	14. Dezember 2002
Reflektordurchmesser	50 cm	16 cm
Orbit	circular	circular
Inklination	98,6 °	98,6 °
Exzentrizität	0,000	0,001
Perigäumshöhe	797 km	803 km
Umlaufzeit	101 min	101 min
Masse	1200 kg	1200 kg

Tabelle 3.1: Parameter von ADEOS 1+2 [ILR03]

3.2.2 ERS 1+2

Die **E**uropean **R**emote **S**ensing Satelliten der Europäischen Space Agency (ESA) verfolgen ebenfalls neben ihren Aufgaben zur Entfernungsmessung noch weitere Missionsziele [ILR03]:

ERS 1: Vermessung des Meeresspiegels zur:

- Überwachung von globalen und lokalen Meeresströmungen
- zum Studium des Gravitationsfeldes

ERS 2:

- Fortsetzung der Messungen von ERS 1
- Messung des Ozongehalts in der Atmosphäre
- Beobachtungen von Veränderungen der Vegetation

Die beiden Satelliten sind in Abbildung 3.6 a) (ERS 1) und b) (ERS 2) dargestellt. Eine Detailansicht des bei beiden identischen Reflektorarrays wird in Abbildung 3.7 gezeigt.

⁵Inklination: Neigung des Winkels zwischen der Bahnebene eines Satelliten und der Ekliptik.

⁶Exzentrizität: Zahl zur Charakterisierung einer Ellipse $e^2 = a^2 - b^2$, bzw. $\epsilon = \frac{e}{a} < 1$.

⁷Perigäumshöhe: Erdnächster Punkt in der elliptischen Umlaufbahn eines Körpers (z.B. eines Satelliten).

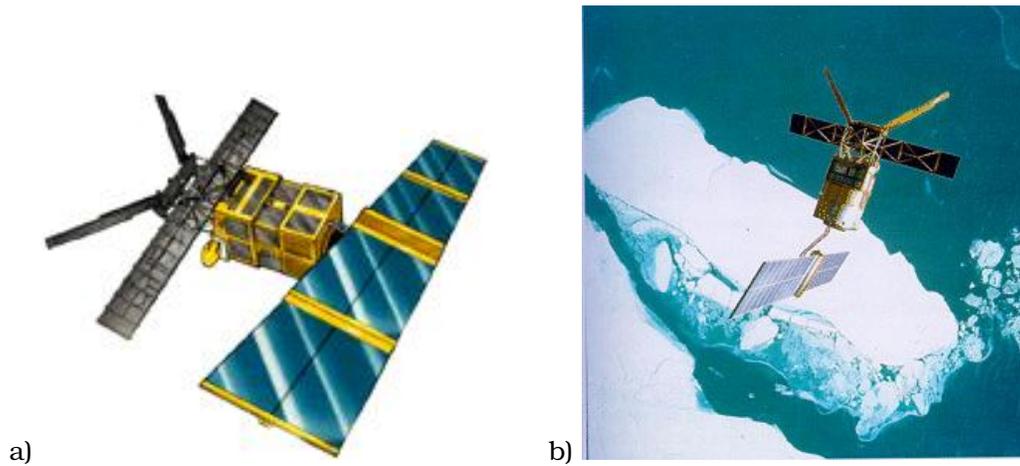


Abbildung 3.6: ERS 1+2 [ILR03]



Abbildung 3.7: Retroreflektor von ERS 1+2 [ILR03]

Die Reflektoreinheit besteht, ähnlich wie bei ADEOS 2, aus insgesamt neun Einzelelementen, die sphärisch angeordnet sind. Diese Reflektoren sind für die Wellenlängen 532 nm und 694 nm optimiert. Durch die Anordnung werden auch hier noch sehr flache Einstrahlwinkel (360 ° Azimut und 60 ° Elevation) erlaubt.

Wie im vorigen Unterabschnitt sind auch hier die wichtigsten Satellitenparameter in nachfolgender Tabelle 3.2 aufgelistet.

	ERS 1	ERS 2
Eigentümer	European Space Agency	European Space Agency
Starttermin	17. Juli 1991	21. April 1995
Reflektordurchmesser	20 cm	20 cm
Orbit	circular	circular
Inklination	98,5 °	98,5 °
Exzentrizität	0,001	0,001
Perigäumshöhe	780 km	785 km
Umlaufzeit	100 min	100 min
Masse	2400 kg	2516 kg

Tabelle 3.2: Parameter von ERS 1+2 [ILR03]

3.2.3 LAGEOS 1+2

Die von der NASA entwickelten Satelliten **LA**ser **GE**odynamic **S**atellite 1+2 sind, im Gegensatz zu den bisher beschriebenen ADEOS- und ERS-Satelliten, einzig für die Entfernungsmessung und Bahnverfolgung durch das Laser Ranging konzipiert und erfüllen daneben keine anderen Aufgaben.

Die Satelliten haben eine kugelförmige Gestalt, wobei die Oberfläche mit je 426 Einzelreflektoren bestückt ist. Der große Vorteil dieser Art von Satelliten besteht darin, dass der Schwerpunkt sehr genau bestimmt werden kann. Dies führt zu erheblichen Erleichterungen bei z.B. der Messung des lokalen Gravitationsfeldes anhand der Flugbahn des Satelliten. Für solche Bestimmungen ist einzig das Massenzentrum entscheidend (bzw. dessen Abstand von der Oberfläche), welches bei einem kugelförmigen Satelliten relativ leicht bestimmt werden kann.

In Abbildung 3.8 ist in Teil a) eine Gesamtansicht eines LAGEOS-Satelliten und in Teil b) eine Detailzeichnung, auf der der prinzipielle Aufbau zu erkennen ist, dargestellt.

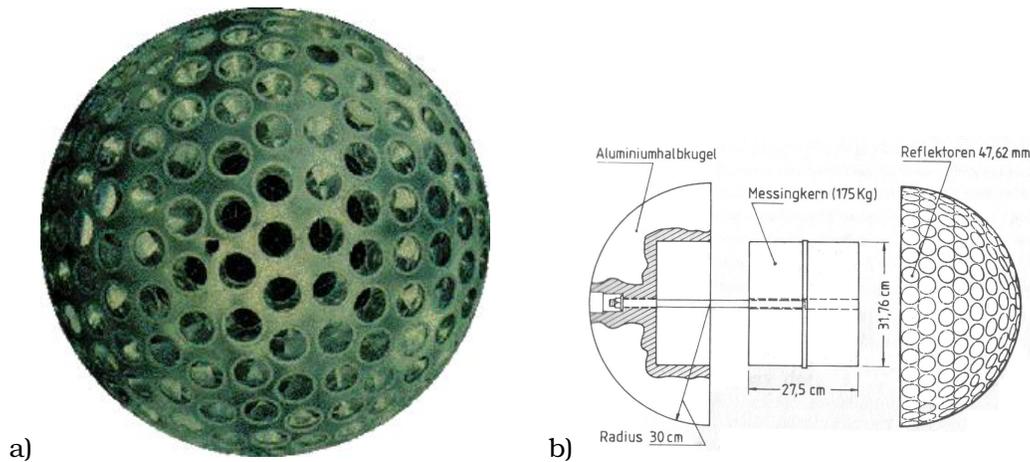


Abbildung 3.8: LAGEOS [ILR03, See88]

Der Satellit besteht im wesentlichen aus einem zylindrischen Messingkern, der von zwei Aluminiumhalbschalen umgeben ist mit den darin eingebetteten Reflektoren.

Die wichtigsten Satellitenparameter sind in nachfolgender Tabelle 3.3 aufgelistet.

	LAGEOS 1	LAGEOS 2
Eigentümer	USA	USA, Italien
Starttermin	04. Mai 1976	22. Oktober 1992
Reflektordurchmesser	60 cm	60 cm
Orbit	circular	circular
Inklination	109,84 °	52,64 °
Exzentrizität	0,0045	0,0135
Perigäumshöhe	5860 km	5620 km
Umlaufzeit	225 min	223 min
Masse	406,965 kg	405,38 kg

Tabelle 3.3: Parameter von LAGEOS 1+2 [ILR03]

Im Vergleich zu den bisher beschriebenen ADEOS- und ERS-Satelliten besitzen die beiden LAGEOS-Satelliten eine mit knapp 6000 km mehr als sechsmal größere Flughöhe.

Aus diesem Grunde ist ihre Umlaufbahn sehr stabil, da sie praktisch nicht durch den Atmosphärenwiderstand (Drag) beeinflusst werden. Die Lebensdauer dieser Satelliten wird auf mehrere Million Jahre geschätzt [See88].

Eine ausführliche Auflistung aller zum Laser Ranging geeigneten Satelliten ist im Anhang B dieser Arbeit zu finden.

Kapitel 4

Die Erdatmosphäre

Wie bereits bei den vereinfachten Energieabschätzungen in Abschnitt 3.1 angesprochen, stellt die Erdatmosphäre die größte Störquelle für die optischen Entfernungsmessungen dar. Zum einen weiten sich die Laserimpulse durch unterschiedliche Streuprozesse stärker auf, was zu einer verschlechterten Energiebilanz führt, und zum anderen müssen für eine präzise Distanzmessung die in Folge der Dispersion auftretenden unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Atmosphärenschichten berücksichtigt werden.

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich daher mit dem Aufbau der Atmosphäre, den unterschiedlichen Streumechanismen sowie der Berücksichtigung der Dispersion durch ein geeignetes Atmosphärenmodell.

4.1 Aufbau der Erdatmosphäre

Die Erdatmosphäre kann als annähernd konzentrische Schichtung verschiedener Bereiche mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften aufgefasst werden.

Hinsichtlich der hier zu betrachteten Signalausbreitung ist es sinnvoll eine Einteilung in zwei Schichten vorzunehmen [Bau97, Man98, See88]: Der Troposphäre und der Ionosphäre. Der Aufbau und die Eigenschaften dieser beiden Schichten werden in den nächsten Unterabschnitten kurz beschrieben.

4.1.1 Troposphäre

Als Troposphäre wird der Teil der Erdatmosphäre von der Oberfläche bis in etwa 40-50 km Höhe bezeichnet. In diesem Atmosphärenanteil spielt sich das gesamte Wettergeschehen ab. 99% der gesamten Erdatmosphäre sind in dieser Schicht enthalten. Die Lufttemperatur nimmt mit steigender Höhe um etwa $6,5^{\circ}\text{C}$ pro km ab.

4.1.2 Ionosphäre

Die Ionosphäre erstreckt sich über einen Bereich von etwa 60-1000 km. In ihr erfolgt durch die UV-Strahlung der Sonne eine Ionisierung von Atomen und Molekülen.

Nach der räumlichen Verteilung von Elektronen und Ionen kann die Ionosphäre in vier Schichten eingeteilt werden [See88]:

Schicht	Höhenbereich [km]	Elektronendichte tagsüber $\left[\frac{el}{m^3}\right]$	Elektronendichte nachts $\left[\frac{el}{m^3}\right]$
D	60...90	$10^2 \dots 10^4$	–
E	85...140	10^5	$2 \cdot 10^3$
F_1	140...200	$5 \cdot 10^5$	10^3
F_2	200...1000	10^6	$3 \cdot 10^5$

Tabelle 4.1: Unterteilung der Ionosphäre

Je nach Sonneneinstrahlung variieren die Schichthöhen im Laufe eines Tages. Die D-Schicht kann sich z.B. nur auf der Tagseite der Erde ausbilden.

4.2 Abschätzung der Verluste durch Extinktion

Beim Durchlaufen der Erdatmosphäre wird ein Laserimpuls ständig an Luftmolekülen und Dunstpartikeln gestreut, was zu recht hohen Energieverlusten im Impuls führen kann.

4.2.1 Extinktion durch Streuung an Luftmolekülen

Die Extinktion durch Streuung an Luftmolekülen kann nach RAYLEIGH durch das LAMBERT-BEERSche Gesetz beschrieben werden. Für diese Betrachtung ist es sinnvoll, sich die Erdatmosphäre aus einzelnen Schichten mit unterschiedlichen meteorologischen Daten aufgebaut zu denken. [Egg85]:

$$E_i = E_{i-1} \cdot e^{-\beta_i \cdot z_i}$$

wobei

β_i	Extinktionskoeffizient in der i-ten Schicht
z_i	Dicke der i-ten Atmosphärenschicht
E_i	Durch die i-te Schicht durchtretende Energie
E_{i-1}	Auf die i-te Schicht auftreffende Energie

bedeuten.

Der Extinktionskoeffizient kann in Abhängigkeit der meteorologischen Daten formuliert werden als [Egg85, JEK66]:

$$\beta(h) \sim \frac{32 \cdot \pi^3 \cdot k \cdot T(h)}{3 \cdot 10^2 \cdot p(h) \cdot \lambda^4} \cdot (n(h) - 1)^2$$

mit

$k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$	Boltzmann-Konstante
$T(h)$	Temperatur in der Höhe h
$p(h)$	Luftdruck in der Höhe h
λ	Wellenlänge des Lasers
$n(h)$	Brechungsindex der Luft in der Höhe h

Nach EGGERT gilt für den Verlauf von Lufttemperatur und Luftdruck:

$$T(h) = \begin{cases} T_S + T_k \cdot h & \text{fuer } h \leq 11\text{km} \\ T_S + T_k \cdot 11\text{km} & \text{fuer } h > 11\text{km} \end{cases}$$

$$p(h) = \begin{cases} p_S \cdot \left(\frac{T(h)}{T_S}\right)^{-\frac{M \cdot g}{T_k \cdot R}} & \text{fuer } h \leq 11\text{km} \\ p_S \cdot e^{-h \cdot \frac{M \cdot g}{R \cdot T_{11}}}, \quad T_{11} = T_S + 11\text{km} \cdot T_k & \text{fuer } h > 11\text{km} \end{cases}$$

Mit den Bezeichnungen:

$p_S = 1013 \cdot \text{mbar}$	Standarddruck
$T_S = 288,15 \cdot \text{K}$	Standardtemperatur
$M = 28,966 \cdot \frac{\text{g}}{\text{mol}}$	Molmasse der Luft
$g = 9,80665 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
$T_k = \frac{dT}{dh} = -6,5 \cdot \frac{\text{K}}{\text{km}}$	Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe
$R = 8,31436 \cdot \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$	allgemeine Gaskonstante
T_{11}	Temperatur ab einer Höhe von 11km

Die grafische Darstellung von Temperatur und Luftdruck ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

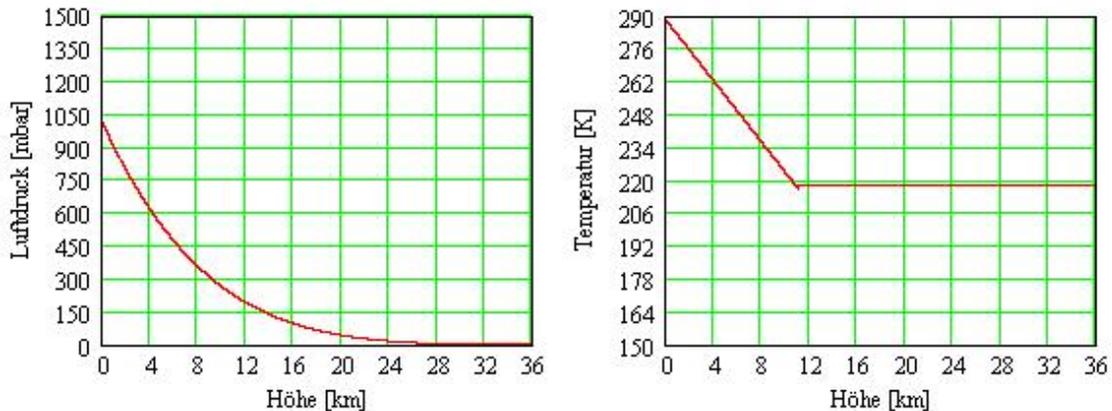


Abbildung 4.1: Luftdruck und Temperatur (nach [Egg85])

Der Brechungsindex der Luft ist abhängig von der Temperatur T , dem Luftdruck p sowie dem Partialdruck des Wasserdampfes p_W [TO98]:

$$n = 1 + 2,8793 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{p}{1 + 0,003671 \cdot T} - 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot p_W$$

Die Temperatur ist hierbei in °C und die Drücke in hPa einzusetzen.

Der Verlauf des Partialdruckes des Wasserdampfes ergibt sich nach [Egg85] zu:

$$p_W = p_{W,S} \cdot \left(\frac{T}{T_S}\right)^{-4 \cdot \frac{M \cdot g}{T_k \cdot R}}$$

wobei $p_{W,S} = 17\text{mbar}$ den Standarddampfdruck bei Sättigung bezeichnet.

Die Verläufe des Partialdruckes des Wasserdampfes, sowie des Brechungsindex von Luft sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

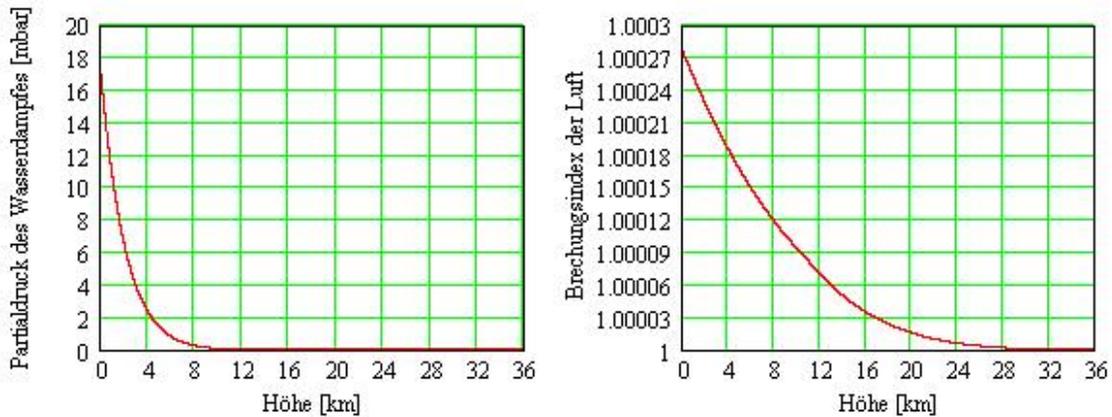


Abbildung 4.2: Partialdruck des Wasserdampfes und Brechungsindex der Luft (nach [Egg85] und [TO98])

Mit diesen Werten kann nun - wie bereits oben beschrieben - der Extinktionskoeffizient für Streuung an Luftmolekülen errechnet werden. Abbildung 4.3 stellt den Verlauf des Koeffizienten in Abhängigkeit der Höhe für einen frequenzverdoppelten Nd:YAG¹-, einen Rubin²- und einen Argonionenlaser³ dar.

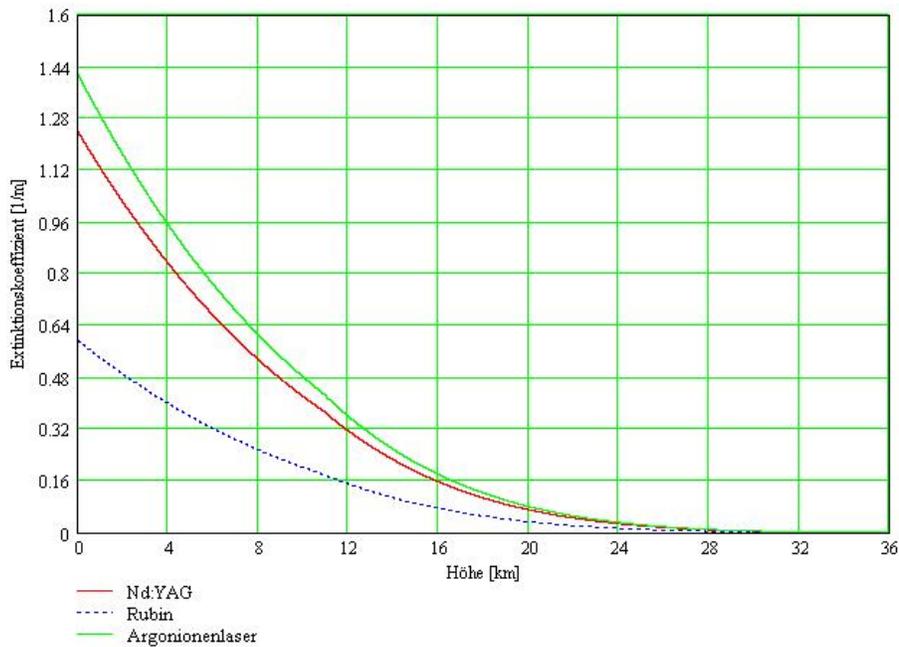


Abbildung 4.3: Extinktionskoeffizient für Streuung an Luftmolekülen (nach [Egg85])

Gut zu erkennen ist der zu erwartende exponentielle Abfall des Extinktionskoeffizienten mit zunehmender Höhe. Die Wellenlänge eines Rubinlasers ist hinsichtlich der Extinktion an Luftmolekülen folglich besser für die Entfernungsmessung geeignet als die eines Nd:YAG- oder eines Argonionenlasers.

¹ $\lambda_{Nd:YAG} = 532 \text{ nm}$
² $\lambda_{Rubin} = 639,4 \text{ nm}$
³ $\lambda_{Ar^{3+}} = 514,5 \text{ nm}$

Das Einsetzen des Koeffizienten in die oben beschriebene LAMBERT-BEERSche-Gleichung liefert den in Abbildung 4.4 dargestellten Kurvenverlauf.

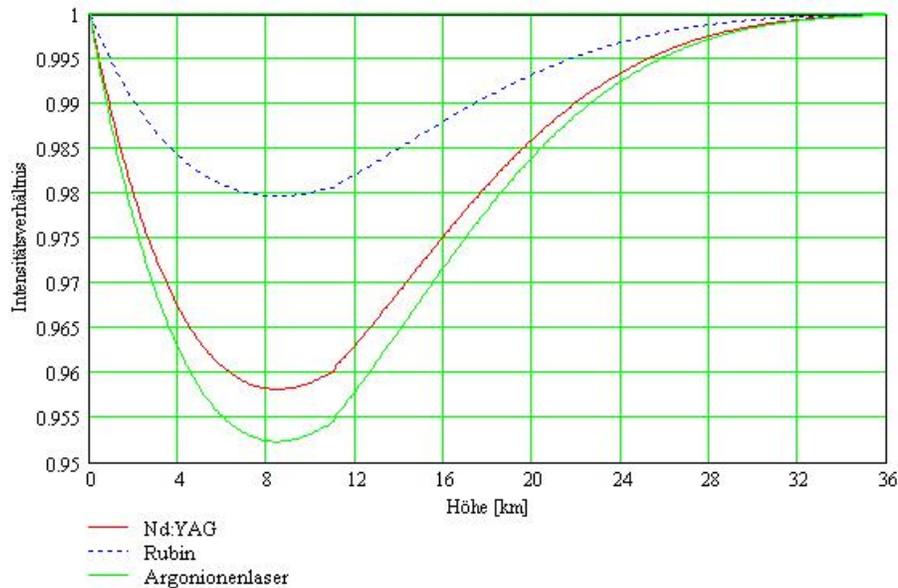


Abbildung 4.4: Abschwächung durch Extinktion

Die Abschwächung ist also in einer Höhe von etwa 8 km für alle drei Wellenlängen am größten.

Um die Gesamtverluste auf Grund der Extinktion durch Luftmoleküle zu bestimmen, wird die LAMBERT-BEERSche-Gleichung iterativ gelöst:

$$E_{i+1} = E_i \cdot e^{-\beta_i \cdot L}$$

Es wird in Iterationsschritten von 100 m jeweils der Extinktionskoeffizient bestimmt und damit die Intensität am Ende der 100-m-Strecke errechnet. Der Verlauf ist in Abbildung 4.5 grafisch dargestellt.

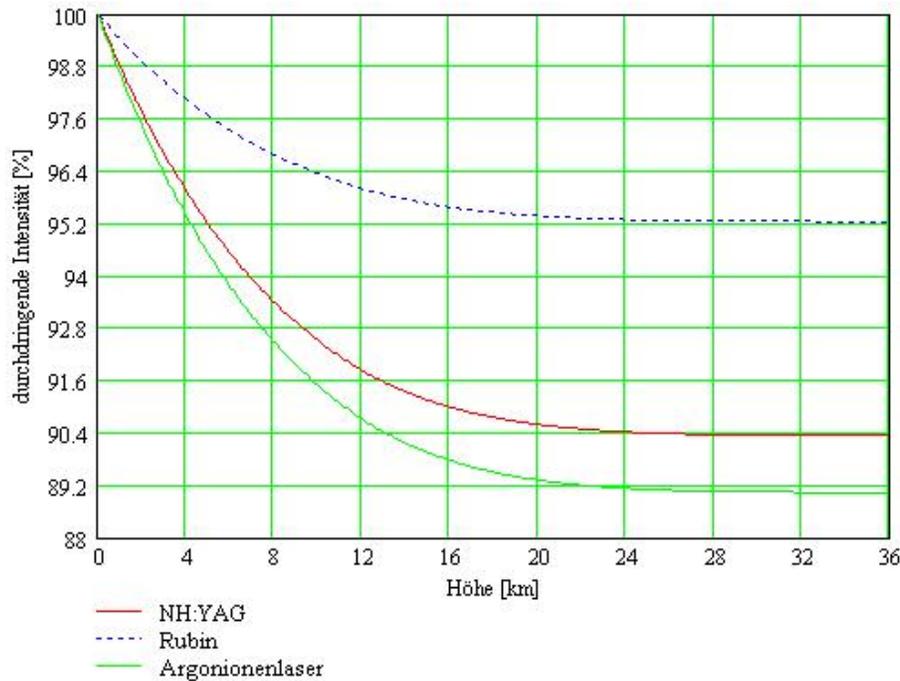


Abbildung 4.5: Durchdringende Intensität

Die durch die Atmosphäre dringenden Laserintensitäten betragen somit:

$$E_{\lambda=532nm} = 90,34\%$$

$$E_{\lambda=639,4nm} = 95,25\%$$

$$E_{\lambda=514,5nm} = 89,04\%$$

Diese Abschätzungen zeigen, dass der Rubinlaser mit einer Wellenlänge von 639,4 nm für die Messungen am günstigsten ist, da dessen Strahlung beim Durchlaufen der Erdatmosphäre am wenigsten abgeschwächt wird.

4.2.2 Dunstextinktion

Die Abschwächung der Laserenergie auf Grund von Streuungen an Dunstpartikeln in Zenitrichtung lässt sich ausdrücken durch [Egg85]:

$$E_i = E_{i-1} \cdot e^{-b \cdot \lambda^a}$$

Darin bedeuten:

- a ein Maß für die mittlere Größe der Dunstpartikel (1, ..., 1,5)
- b ein Maß für die Dunststärke (0,01, ..., 0,2)
- λ Laserwellenlänge in μm
- E_i Durch die i-te Schicht durchtretende Energie
- E_{i-1} Auf die i-te Schicht auftreffende Energie

In Abbildung 4.6 ist für eine mittlere Größe der Partikel⁴ das Intensitätsverhältnis über der Dunststärke für einen frequenzverdoppelten Nd:YAG-, einen Rubin- und einen Argonionenlaser aufgetragen.

⁴Mittlere Größe der Partikel: $a = 1,3$

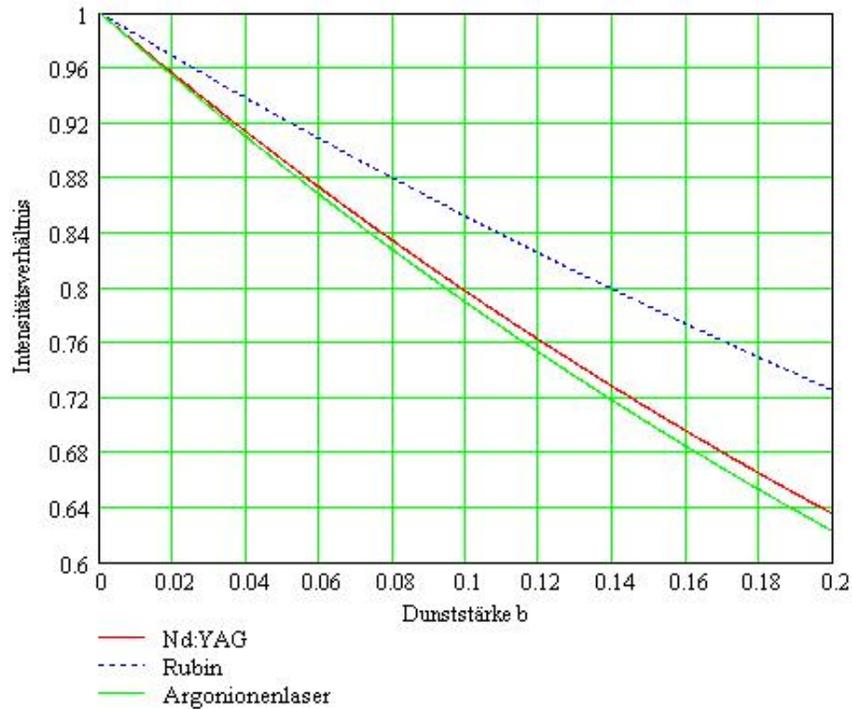


Abbildung 4.6: Dunstextinktion im Zenit (nach [Egg85])

Eine Dunststärke von $b = 0,1$ (leicht getrübt) führt bei einmaligem Durchstrahlen der Erdatmosphäre in Zenitrichtung mit einem Nd:YAG-Laser zu Verlusten von etwa 20%.

Für Strahlungsrichtungen, die nicht in Zenitrichtung verlaufen, muss noch eine weitere Korrektur durchgeführt werden [Egg85]:

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{z\left(\frac{\pi}{2}\right)}{z(\varepsilon)}$$

wobei $z(\varepsilon)$ die zu durchlaufende Weglänge beim Winkel ε angibt. $z(\varepsilon)$ berechnet sich dann nach der Formel

$$z(\varepsilon) = (r_E + h_{atm}) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r_E}{r_E + h_{atm}} \cdot \cos(\varepsilon)\right)^2} - r_E \cdot \sin(\varepsilon)$$

mit

$r_E = 6371km$	Erdradius
$h_{atm} = 50km$	Höhe der Erdatmosphäre
ε	Höhenwinkel

Für Winkel zwischen 0° und 90° ist das Intensitätsverhältnis durch die zusätzliche Dunstextinktion in Abbildung 4.7 für alle drei Wellenlängen aufgetragen.

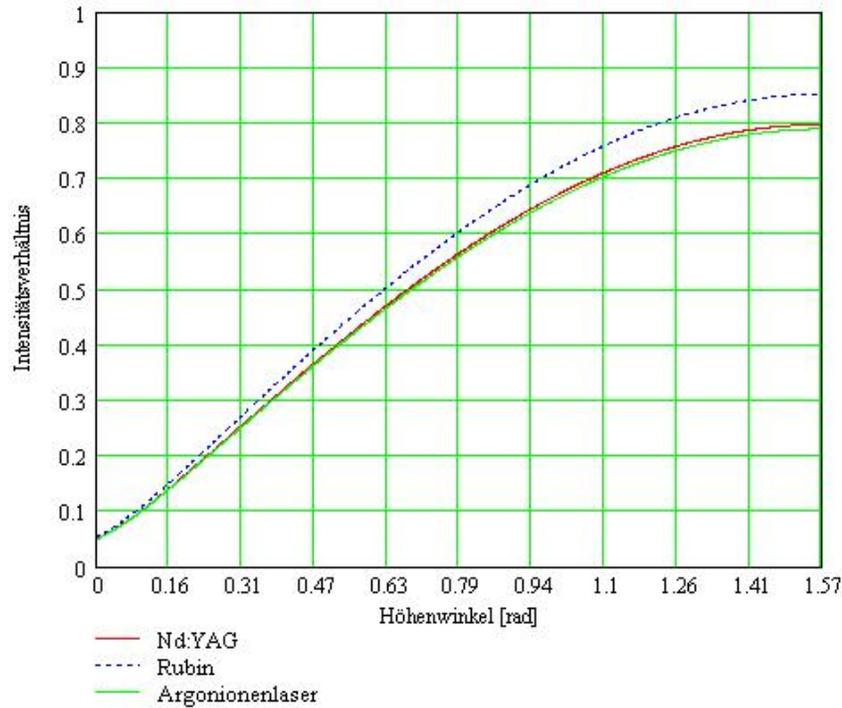


Abbildung 4.7: Zusätzliche Dunstextinktion für $\varepsilon \leq \frac{\pi}{2}$ (nach [Egg85])

Gut zu erkennen ist hierbei, dass auch bei der Dunstextinktion der Rubinlaser für das Durchqueren der Atmosphäre am besten geeignet ist.

4.2.3 Gesamtverluste

Die Gesamtverluste, die durch die Extinktion der Atmosphäre entstehen, lassen sich nun abschätzen. Für eine Durchstrahlung der Erdatmosphäre in Zenitrichtung betragen die Verluste durch Dunstextinktion 20% für Nd:YAG-Laser, bzw. etwa 21% für Argonlaser und etwa 15% für Rubinlaser. Auf Grund der Extinktion durch die Luftmoleküle wird die Intensität der Nd:YAG-Strahlung um etwa 9,7% gemindert, die des Argonlasers um etwa 11% und die der Rubinlaser-Strahlung um ca. 4,7%. Für ein zweimaliges Durchlaufen der Atmosphäre ergeben sich somit:

$$\left\langle \frac{I}{I_0} \right\rangle_{Nd:YAG} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,903 \cdot 0,903 = 0,522 = 52,2\%$$

$$\left\langle \frac{I}{I_0} \right\rangle_{Argon} = 0,79 \cdot 0,79 \cdot 0,89 \cdot 0,89 = 0,494 = 49,4\%$$

$$\left\langle \frac{I}{I_0} \right\rangle_{Rubin} = 0,85 \cdot 0,85 \cdot 0,953 \cdot 0,953 = 0,656 = 65,6\%$$

Das Resultat dieser Betrachtungen ist, dass der Nd:YAG-Laser und der Argonionenlaser durch die stärkere Abschwächung weniger gut dazu geeignet sind ein solches Entfernungsmesssystem zu realisieren als der Rubinlaser. Neben der Forderung nach möglichst geringen Verlusten gibt es allerdings noch eine Reihe weiterer Eigenschaften⁵, die ein geeigneter Laser aufweisen muss. Diese werden in Kapitel 5 diskutiert.

⁵Wie z.B. Ausgangsleistung, Möglichkeit zur Erzeugung kurzer Impulse und Wiederholfrequenz.

Die durchgeführten Betrachtungen sind allerdings immer noch idealisiert. In der Realität treten an jedem optischen Element⁶ zusätzliche Verluste in Form von Absorption oder Reflexion an der Grenzschicht von Linsen auf, so dass sich die Werte noch weiter verschlechtern. Unklar ist auch, in welchem Zustand sich die Mondreflektoren befinden. Sie sind, da der Mond keine schützende Atmosphäre besitzt, teilweise seit über 30 Jahren der kosmischen Strahlung ausgesetzt.

4.3 Messkorrektur mit dem Atmosphärenmodell nach MARINI und MURRAY

Um die Verzögerung der Signalausbreitung bei der Auswertung der Messergebnisse zu berücksichtigen, ist eine genaue Kenntnis des Atmosphärenzustandes⁷ nötig.

Für eine Messung der Entfernung zweier auf der Erdoberfläche befindlichen Objekte sind diese Daten (Druck, Temperatur und Wasserdampfgehalt), auch relativ problemlos durch die Aufstellung geeigneter Messinstrumente entlang des Messweges zu erfassen.

Bei der Messung nach Satelliten oder zum Mond ist ein solches Vorgehen nicht mehr möglich. Es müssten dazu die Daten der Atmosphäre auf der gesamten Wegstrecke ermittelt werden. Bis in gewisse Höhen könnte dies noch mit Wetterballons gelingen, aber eine zuverlässige Messung des Atmosphärenzustandes in Höhen von 500-1000 km ist mit vertretbarem technischen Aufwand nicht möglich.

Um dennoch erfolgreiche Messungen durchführen zu können, wird der Atmosphärenzustand entlang des Messweges mit Hilfe eines physikalischen Modells nachgebildet. Ein solches Atmosphärenmodell liegt auch der Korrekturformel von MARINI und MURRAY [MM73, See88] zu Grunde. Die Eingangsgrößen sind:

- der Druck am Beobachtungsort
- die Temperatur am Beobachtungsort
- die Höhe des Beobachtungsortes über dem Meeresspiegel
- die Elevation des Satelliten

Für das zur Messung verwendete sichtbare Laserlicht ist die Korrektur, wie SEEBER in [See88] beschreibt, unempfindlich gegenüber dem Wasserdampfgehalt. Dieser kann deshalb bei der folgenden Korrekturformel vernachlässigt werden.

Als Ergebnis liefert die Modelrechnung von MARINI und MURRAY einen Korrekturwert Δd_{MM} , der zur gemessenen Distanz aufaddiert werden muss.

$$\Delta d_{MM} = \frac{2,238 + 0,0414 \cdot \frac{P}{T} - 0,238 \cdot H}{\sin(E) + \cot(E) \cdot 10^{-3}}$$

Darin bedeuten:

Δd_{MM}	Entfernungskorrektur [m]
P	Druck am Beobachtungsort [mbar]
T	Temperatur am Beobachtungsort [K]
H	Höhe des Beobachtungsortes [m]
E	Elevation des Satelliten

⁶Spiegel oder Linse.

⁷Darin enthalten sind der Luftdruck, die Lufttemperatur, sowie der Wasserdampfgehalt.

Nahezu alle im Rahmen dieser Arbeit näher betrachteten Messstationen (siehe Kapitel 7) verwenden zur Korrektur ihrer Messdaten das Atmosphärenmodell von MARINI und MURRAY.

4.4 Computerprogramm zur Simulation

Um die Auswirkungen der klimatischen Bedingungen auf die Messung anschaulich simulieren zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Computerprogramm entwickelt, welches mit Hilfe geeigneter Sensoren⁸ die Umgebungsbedingungen erfasst und gemäß der oben beschriebenen Korrekturformel die zu berücksichtigende Längenkorrektur errechnet.

Die analogen Messdaten der Sensoren werden dabei mit Hilfe eines Mikrocontrollers digitalisiert und anschließend an die serielle Schnittstelle eines PC übertragen. Das in der Programmiersprache Visual-Basic erstellte Programm erfasst diese Daten, stellt sie grafisch dar und errechnet die Korrektur nach MARINI und MURRAY.

Da an dieser Stelle nur die Ergebnisse von Belang sind und nicht das Auslesen der Sensoren im Vordergrund stehen soll, sei hier auf die Laborausarbeitung von KREMER und MASSA zum „Datenerfassungssystem für meteorologische Messdaten“ [KM03] verwiesen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Benutzeroberfläche des Computerprogramms. Es werden der momentane Messwert aller drei Sensoren digital dargestellt und der Verlauf wird anhand dreier Diagramme aufgezeichnet. Als Einstellungsmöglichkeiten stehen dem Benutzer die folgenden Optionen zur Verfügung:

- Höhe über dem Meeresspiegel (Höhe über normal Null)
- Möglichkeit der Wahl des Messortes Trebur (H. ü. n. N. = 103 m)
- Elevation des Satelliten

Als Ausgabe erfolgt die errechnete Längenkorrektur.

Alle Daten⁹ lassen sich in tabellarischer Form in einer *.txt-Datei abspeichern.

Die nachfolgende Abbildung 4.8 zeigt einen Screenshot des Computerprogramms. Die Bedeutung der nummerierten Elemente wird in Tabelle 4.2 erklärt.

⁸Temperatur-, Luftdruck- und Luftfeuchtesensor.

⁹gemessene Daten: Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck
errechnete Daten: Entfernungskorrektur

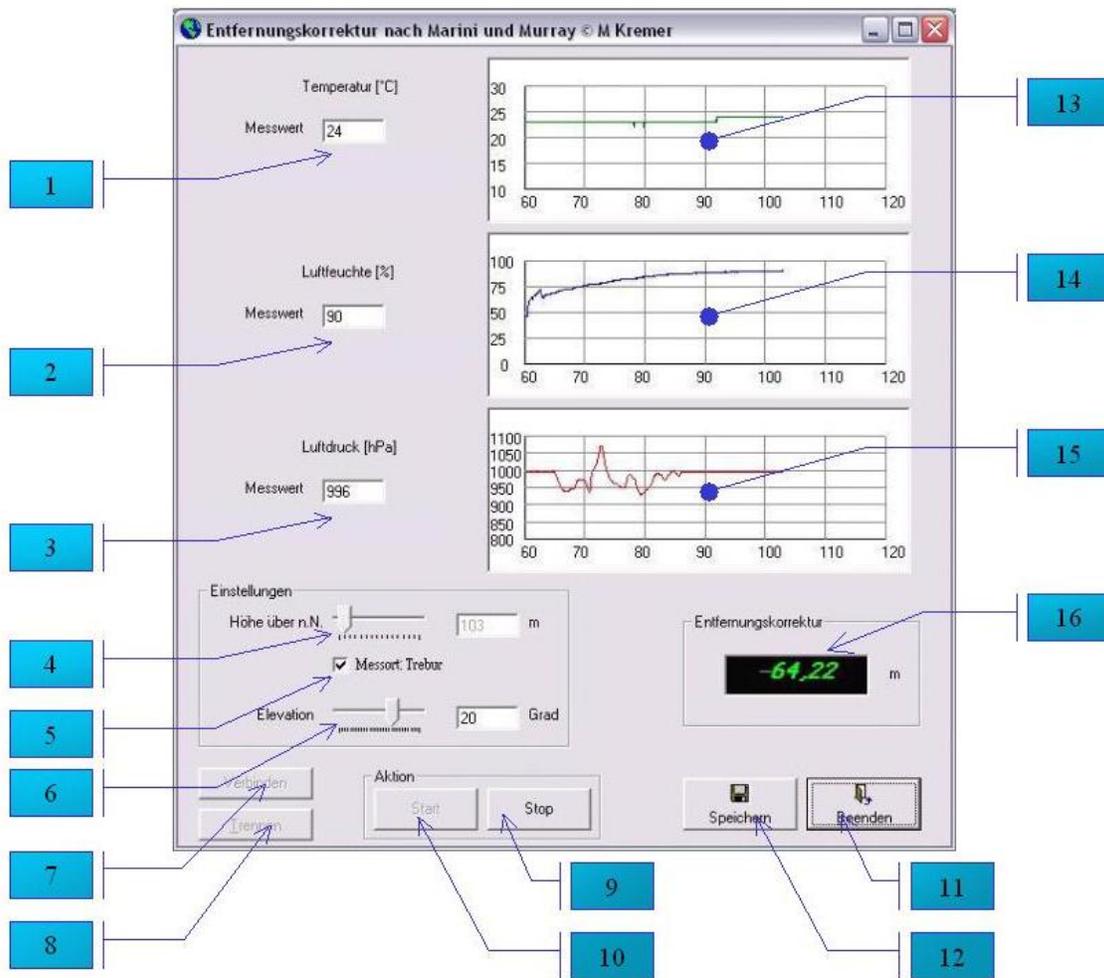


Abbildung 4.8: Screenshot des Wetter-Programms

Nummer	Bezeichnung	Funktion
1	Textfeld	digitale Anzeige der aktuellen Temperatur
2	Textfeld	digitale Anzeige der aktuellen Luftfeuchte
3	Textfeld	digitale Anzeige des aktuellen Luftdrucks
4	Slider	Einstellung der Höhe des Beobachtungsortes über n. N.
5	Checkbox	Einstellung des TIT als Beobachtungsort
6	Slider	Einstellung der Elevation des Ziels
7	Button „Verbinden“	Verbinden mit der COM-Schnittstelle
8	Button „Trennen“	Trennen der Verbindung zur Schnittstelle
9	Button „Stop“	Beenden der Messung
10	Button „Start“	Beginnen der Messung
11	Button „Beenden“	Beenden des Programms
12	Button „Speichern“	Speichern der gemessenen und errechneten Daten
13	Picturebox	Anzeige des Temperaturverlaufs
14	Picturebox	Anzeige des Verlaufs der Luftfeuchte
15	Picturebox	Anzeige des Verlaufs des Luftdrucks
16	Textfeld	digitale Anzeige der Entfernungskorrektur

Tabelle 4.2: Legende zum Wetter-Programm

Der im Screenshot gezeigte Korrekturwert $\Delta d_{MM} = -64,22m$ ¹⁰ ist durchaus realistisch: Angenommen eine Messung ergibt eine Laufzeit des Laserimpulses Δt . Dann berechnet sich die Distanz zum Satelliten über die bekannte Gleichung

$$S_{Messung} = c_0 \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit sei. Nun ist die Aussage der Korrekturformel, dass der wahre Abstand zum Satelliten S_{wahr} kürzer ist, als der gemessene:

$$S_{wahr} = S_{Messung} - 64,22m$$

Daraus folgt, dass auch die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit sein muss, was ja ohnehin in jedem Fall gelten muss.

Mit dem vorgestellten Computerprogramm ist es also möglich sehr schnell die wahre Entfernung zum Messziel zu ermitteln. Auch könnte das Programm zu einem späteren Zeitpunkt leicht in das Datenerfassungssystem in einer Messstation in Trebur integriert werden.

Um die Auswirkungen der Korrekturformel von MARINI und MURRAY anschaulich zu machen, wurde mit Hilfe des Computeralgebraprogramms MathCad eine Grafik erstellt, in der auf der z-Achse die Entfernungskorrektur angezeigt wird und auf der x- und y-Achse die Temperatur bzw. der Luftdruck aufgetragen sind. Die anderen beiden Parameter sind hierbei konstant¹¹ gehalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die Wertebereiche der Temperatur und des Luftdrucks sind hierbei:

$$260 K \leq T \leq 325 K$$

$$950 mbar \leq p \leq 1050 mbar$$

¹⁰vor allem das negative Vorzeichen.

¹¹Elevation E = 20°, Höhe H = 103m

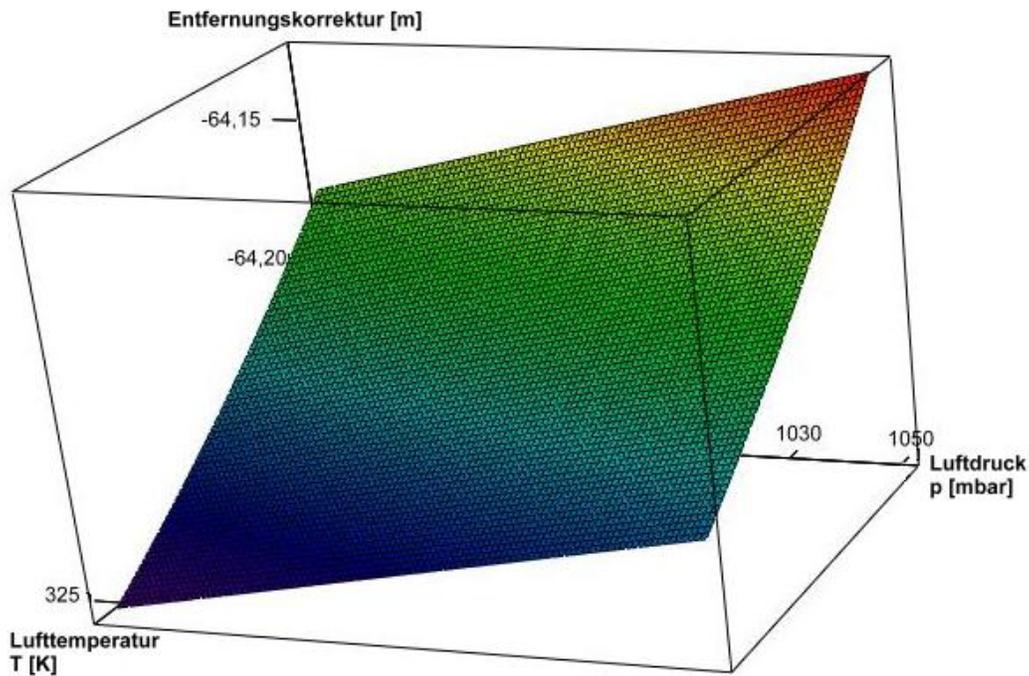


Abbildung 4.9: Auswirkungen der Korrekturformel

Abbildung 4.9 zeigt, dass mit größer werdendem Luftdruck, bzw. mit kleiner werdender Temperatur die Entfernungskorrektur anwächst. Physikalisch ist diese Tendenz folgendermaßen erklärbar:

Je kleiner die Temperatur wird, umso größer wird die Dichte eines Mediums. Die Lichtgeschwindigkeit ist in Stoffen größerer Dichte allgemein kleiner als in Materialien mit geringerer Dichte.

Ein bei konstanter Temperatur steigender Luftdruck bedeutet ebenfalls größer werdende Luftdichte und führt damit zu einer Abnahme der Lichtgeschwindigkeit.

4.5 Atmosphärische Fenster

Durch spektroskopische Messungen lässt sich sehr genau die Absorptionsfähigkeit eines Stoffes in Abhängigkeit von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes bestimmen. Das Ergebnis einer solchen spektroskopischen Untersuchung an der Atmosphäre ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

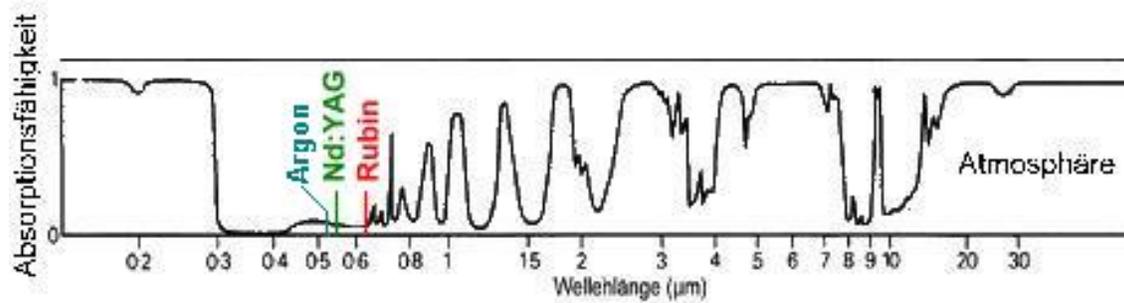


Abbildung 4.10: Wellenlängenabhängige Absorption [Lin03]

Eingezeichnet sind zusätzlich die Wellenlängen eines Argonionen-, eines frequenzverdoppelten Nd:YAG- und eines Rubinlasers.

Gut zu erkennen ist, dass das im Unterabschnitt 4.2.3 erhaltene Ergebnis prinzipiell richtig ist: Der Rubinlaser erfährt weniger Verluste beim Passieren der Erdatmosphäre als der Nd:YAG- und der Rubinlaser.

Ebenfalls zu erkennen sind die sogenannten „atmosphärischen Fenster“ in der Atmosphäre, jene Wellenlängenbereiche, bei denen geringe Absorption auftritt.

Anhand solcher Fenster muss für die Messungen zum Mond und nach Satelliten die Wellenlänge und damit der Lasertyp ausgewählt werden.

Kapitel 5

Geeignete Laser

Dieses Kapitel beschäftigt sich eingehender mit der Beschreibung des benötigten Lasersystems. Zu Beginn werden die an eine solche Anlage gestellten Anforderungen diskutiert. Daran anschließend werden zwei industriell erhältliche Laser der beiden in diesen Bereichen marktführenden Unternehmen QUANTEL¹ und Coherent² vor allem hinsichtlich ihres technischen Aufbaus und ihrer Strahleigenschaften vorgestellt.

5.1 Anforderungen an den Laser

Die Anforderungen, die an einen zur astronomischen Entfernungsbestimmung geeigneten Laser gestellt werden, sind sehr hoch. Besonders das Erzeugen äußerst kurzer und energiereicher Laserimpulse sorgt dafür, dass ein enormer technischer Aufwand betrieben werden muss.

Die Eigenschaften, die ein geeignetes Lasersystem erfüllen muss, sind in den folgenden Unterabschnitten aufgelistet.

5.1.1 Wellenlänge

Die Laserwellenlänge sollte so gewählt werden, dass möglichst wenig Energie beim zweimaligen Durchlaufen der Erdatmosphäre verloren geht. Die Abschätzungen in Unterabschnitt 4.5 haben gezeigt, dass die Wellenlänge des Rubinlasers noch etwas besser geeignet ist, als die des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers oder des Argonionenlasers.

Ein weiterer Punkt muss bei der Auswahl des Lasers beachtet werden: Es müssen geeignete Detektoren auf dem Markt vorhanden sein, welche eine entsprechend hohe Empfindlichkeit für die gewählte Wellenlänge aufweisen. Diese Bedingung schließt z.B. Wellenlängen im UV-Bereich, wie sie z. B. Excimerlaser erzeugen, praktisch aus.

Das Erzeugen einer bestimmten Wellenlänge ist heute mit Hilfe durchstimmbarer Farbstofflaser, die einen Wellenlängenbereich von 300-1000 nm überdecken [EE91], problemlos realisierbar.

¹QUANTEL: 17, avenue de l'Atlantique - Z.A. de Courtaboeuf -BP 23- 91941 Les Ulis Cedex - France.
Deutsche Vertretung durch LOT-Oriel GmbH & Co. KG. Ansprechpartner: Dr. Marc Kunzmann:
kunzmann@lot-oriel.de

²Coherent (Deutschland) GmbH, Dieselstraße 5b, 64807 Dieburg, Ansprechpartner: Dr. Jürgen Kolenda:
juergen.kolenda@coherent.com

Die Wellenlänge ist allerdings nur eine Teilanforderung an den Laser. Weitere Anforderungen werden in den nächsten Unterabschnitten erläutert.

5.1.2 Möglichkeit zur Erzeugung kurzer Pulse und Wiederholrate

Das Erzeugen sehr kurzer Lichtimpulse ist für das hier verwendete Messverfahren von größter Bedeutung. Allgemein lässt sich folgender Zusammenhang zwischen der Impulsbreite Δt und der erreichbaren Messgenauigkeit Δs aufstellen³:

$$\Delta s = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

Die folgende Tabelle 5.1 stellt einige Impulsbreiten und die daraus resultierenden Messgenauigkeiten vor.

Impulsbreite Δt	Messgenauigkeit Δs
10 ps	1,5 mm
100 ps	1,5 cm
1 ns	15 cm
10 ns	1,50 m

Tabelle 5.1: Messgenauigkeit in Abhängigkeit von der Impulsbreite

Für die hochpräzise Vermessung des Mond- und Satellitenabstandes sollte die Impulsbreite daher nicht wesentlich über 100 ps liegen.

Wie in Unterabschnitt 3.1 bereits erwähnt, können die Retroreflektoren auf der Mondoberfläche von einer Messstation auf der Erde nicht direkt gesehen werden. Eine Messung besteht daher aus mehrmaligem Aussenden von Laserimpulsen in Richtung der Reflektoren. Um dieses Verfahren sinnvoll umsetzen zu können, sind in relativ kurzen Abständen erfolgende Laseremissionen nötig. Übliche Werte liegen hierbei im Bereich von etwa 10 Hz (siehe Kapitel 7) [Egg85, ILR03, See88].

5.1.3 Strahldivergenz

Die hier betrachteten großen Entfernungen zwischen der Messstation und dem Messziel von etwa 800 km zu Satelliten bis hin zum 384.400 km weit entfernten Mond sorgen für eine äußerst starke Strahlaufweitung. Die Abschätzungen in Unterabschnitt 3.1 haben gezeigt, dass bei einer Strahldivergenz $\Theta_0 = 0,1 \text{ mrad}$ und einer Aufweitung durch das TIT der Laserstrahl auf der Mondoberfläche bereits einen Durchmesser von mehr als 500 m aufweist. Da in die Berechnung der Strahlfläche der Radius quadratisch einfließt, verschlechtert sich das betrachtete Energieverhältnis mit größer werdender Strahldivergenz drastisch.

5.1.4 Pulsenergie

Die in den vorherigen Kapiteln abgeschätzten Verluste durch die Erdatmosphäre, die starke Strahlaufweitung, sowie durch die optischen Elemente erfordern recht hohe Pulsenergien, damit trotz der enormen Verluste noch ein reflektiertes Lasersignal detektiert werden kann.

³Bei einem zurückkehrenden Photon ist es nicht möglich anzugeben, wann es erzeugt wurde. Es könnte sowohl zum Beginn als auch zum Ende des Laserimpulses gehören. Die zeitliche Impulsbreite gibt also die theoretisch zu erreichende Messgenauigkeit vor.

Das Erreichen der hierfür üblichen Energien im Bereich von 500-1000 mJ stellt die höchste Anforderung an das Lasersystem dar. Zu ihrer Erzeugung ist ein hoher technischer Aufwand nötig. Das erzeugte Lasersignal muss schließlich durch eine Reihenschaltung von mehreren Verstärkerstufen auf die erforderlichen Energien gebracht werden.

Der technische Aufbau solcher Laseranlagen wird an Hand von zwei Beispielsystemen der Firmen QUANTEL und Coherent im nächsten Abschnitt erläutert.

5.2 Kommerzielle Laseranlagen

Um einen Überblick über die derzeitigen technischen Möglichkeiten von Picosekunden-Lasern mit den geforderten Impulsenergien zu erhalten, werden in den folgenden beiden Unterabschnitten zwei in Preis und Umfang recht unterschiedliche Laseranlagen verschiedener Hersteller vorgestellt.

5.2.1 Laserserie YG900 und YG980 von QUANTEL

Die Firma QUANTEL bietet im wesentlichen zwei unterschiedliche Lasersysteme an, welche äußerst kurze und energiereiche Lichtimpulse erzeugen. Beide Systeme sind vom Typ Nd:YAG-Laser, welche die Möglichkeit zur Frequenzverdopplung (532 nm), -verdreifung (355 nm) und -vervierung (266 nm) bieten.

Die Erzeugung der kurzen Impulse erfolgt bei der YG900er Serie durch Modenkopplung und bei der YG980er Serie durch das Q-Switch-Verfahren. Dies lässt schon darauf schließen, daß die Laser der YG900er Serie wesentlich kürzere Laserimpulse liefern.

Zur Verdeutlichung des technischen Aufbaus dieser beiden unterschiedlichen Systeme sollen die Abbildungen 5.1 und 5.2 dienen, auf denen die prinzipielle Funktionsweise des YG901, bzw. des YG980 dargestellt wird.

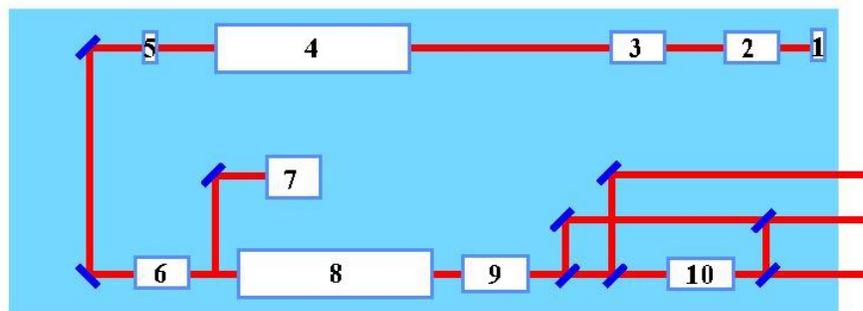


Abbildung 5.1: Technischer Aufbau des YG901 [QUA00]

Die Nummerierungen bedeuten dabei im Einzelnen:

- 1 Spiegel
- 2 Akusto-optischer Modulator
- 3 cavitive Längenanpassung
- 4 Oszillator Laserkopf
- 5 Etalon
- 6 Pulsselektor
- 7 Synchronisator
- 8 Verstärkerstufe
- 9 Generator zur Erzeugung der 2. Harmonischen
- 10 Generator zur Erzeugung der 3. oder 4. Harmonischen

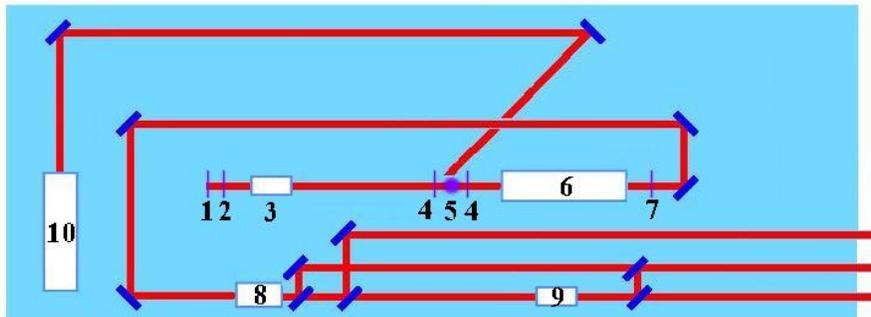


Abbildung 5.2: Technischer Aufbau des YG980 [QUA00]

Mit den Abkürzungen:

- 1 Spiegel
- 2 Shutter
- 3 Pockelszelle
- 4 $\frac{\lambda}{4}$ -Platte
- 5 Glan Polarisator
- 6 Oszillator Laserkopf
- 7 Auskoppler (Gauß)
- 8 Generator zur Erzeugung der 2. Harmonischen
- 9 Generator zur Erzeugung der 3. oder 4. Harmonischen
- 10 optischer Injektor

Die Größenordnung solcher Laser lässt sich gut anhand von Abbildung 5.3 abschätzen, welche einen YG900 von QUANTEL zeigt.



Abbildung 5.3: Ansicht des YG900 [QUA00]

Einige der wichtigsten technischen Daten der Laser der YG900er, bzw der YG980er Serie von QUANTEL sind in Tabelle 5.2 , bzw. in Tabelle 5.3 zusammengestellt [QUA00].

Lasereigenschaften	YG900	YG901			YG901C		YG902C
Wiederholfrequenz [Hz]	10	10	20	30	10	20	10
Energie bei 1064 nm [mJ]	0,7	50	45	35	100	60	150
Energie bei 532 nm [mJ]	0,3	25	20	15	50	30	70
Energie bei 355 nm [mJ]	0,12	10	8	5	17	10	35
Energie bei 266 nm [mJ]	0,06	5	4	2	10	4	15
Pulsdauer bei 1064 nm [ps]	35	35	35	35	35	35	100
Strahldurchmesser [mm]	3	6	6	6	9,5	9,5	9,5
Divergenz bei 1064 nm [mrad]	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5
Leistungsstabilität bei 1064 nm [%]	5	5	5	5	5	5	5

Tabelle 5.2: Technische Daten der YG900er Serie

Lasereigenschaften	YG980			YG980E		YG981
Wiederholfrequenz [Hz]	10	20	30	10	20	50
Energie bei 1064 nm [mJ]	420	380	320	850	700	500
Energie bei 532 nm [mJ]	190	165	125	400	300	170
Energie bei 355 nm [mJ]	85	70	45	200	140	85
Energie bei 266 nm [mJ]	40	30	20	90	60	30
Pulsdauer bei 1064 nm [ns]	6-8			6-8		8-11
Strahldurchmesser [mm]	≤6			≤10		≤6
Divergenz bei 1064 nm [mrad]	≤0,5			≤0,5		≤0,6

Lasereigenschaften	YG981C			YG982E			YG982E
Wiederholfrequenz [Hz]	10	20	30	10	20	30	10
Energie bei 1064 nm [mJ]	1200	1050	900	1600	1600	1400	2400
Energie bei 532 nm [mJ]	600	520	350	820	780	650	1200
Energie bei 355 nm [mJ]	280	220	130	490	420	220	550
Energie bei 266 nm [mJ]	130	100	60	180	-	-	-
Pulsdauer bei 1064 nm [ns]	6-8			8-11			8-11
Strahldurchmesser [mm]	≤10			≤10			≤13
Divergenz bei 1064 nm [mrad]	≤0,45		≤0,6	≤0,6			≤0,6

Tabelle 5.3: Technische Daten der YG980er Serie

Beide Laserserien erfüllen die geforderten Bedingungen nur teilweise. Während die YG900er Serie durch ihre extrem kurzen Laserimpulse (infolge der Modenkopplung) sehr gut für die astronomischen Entfernungsmessungen geeignet wäre, ist die Impulsenergie mit maximal 50 mJ⁴ für die Messungen zu schwach (siehe die technischen Daten bereits bestehender Systeme in Kapitel 7).

Bei der YG980er Serie liegt der umgekehrte Fall vor: Die Pulsenergien sind mit maximal 1200 mJ in jedem Falle ausreichend, allerdings lässt dann die Impulslänge mit 8-11 ns nur eine Genauigkeit von etwa 1,50 m zu (siehe Unterabschnitt 5.1.2). Durch vielfaches Messen der Entfernung lässt sich zwar durch statistische Methoden dieser Wert eventuell noch verbessern, aber prinzipiell ist immer eine möglichst kurze Impulslänge zu bevorzugen.

⁴bei 35 ps Impulsdauer und 532 nm Wellenlänge (YG901C).

Der Vergleich dieser beiden unterschiedlichen Lasersysteme zeigt, dass nur die YG980er Serie (Modell YG982E) für zuverlässige Messungen geeignet ist. Es muss zwar die relativ lange Impulsdauer in Kauf genommen werden, allerdings sind bei Energien von 1200 mJ in jedem Falle reflektierte Signale am Detektor zu erwarten, was bei Impulsenergien von nur 50 mJ zweifelhaft ist.

5.2.2 Lasersystem von Coherent

Coherent ist der weltweit größte Anbieter von industriellen Laseranlagen und stellt unter anderem gepulste Festkörperlasersysteme nach kundenspezifischen Anforderungen her. Im folgenden wird eine bereits von Coherent entwickelte Laseranlage, die den Anforderungen der astronomischen Entfernungsbestimmung genügt, vorgestellt. Dabei werden - ähnlich wie im letzten Unterabschnitt - kurz die Bauweise und anschließend die charakteristischen Eigenschaften diskutiert.

Den prinzipiellen Aufbau zeigt Abbildung 5.4.

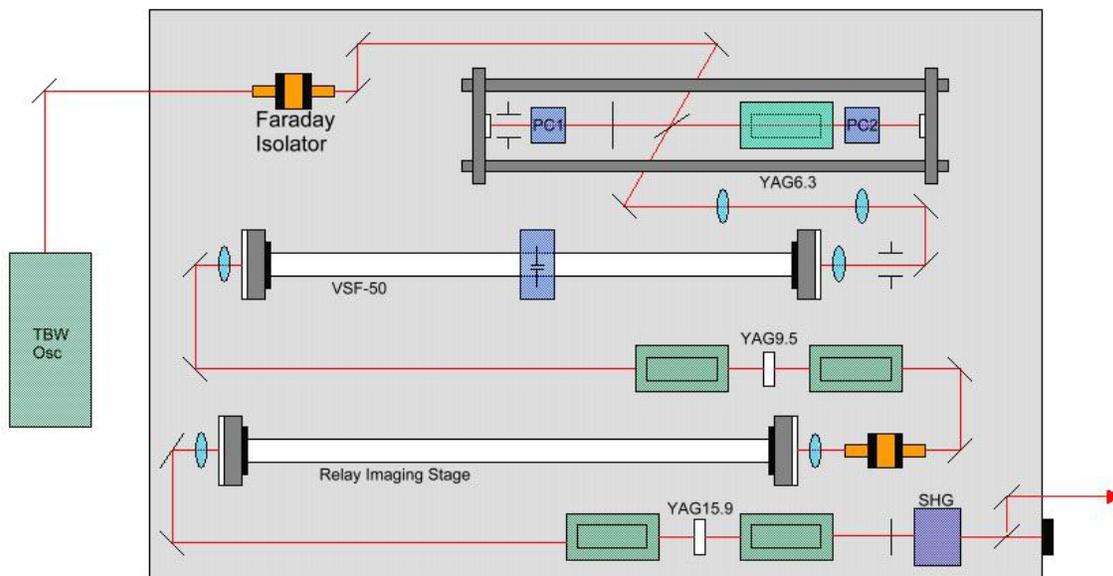


Abbildung 5.4: Technischer Aufbau der Coherent-Laseranlage [Coh04]

Wie auch bei der YG900er Serie von QUANTEL werden die kurzen Lichtimpulse hier über das Modenkoppel-Verfahren erzeugt. Nachdem die kurzen Laserimpulse⁵ erzeugt wurden, wird die Strahlung über einen Faraday-Isolator⁶ in den regenerativen Verstärker geleitet. Dieser sorgt dafür, daß die schnelle Impulsfolge dermaßen umgewandelt und verstärkt wird, dass am Ausgang Impulse der Länge 100 ps mit einer Energie von 20 mJ und einer Wiederholfrequenz von etwa 10 Hz entstehen. Diese Impulse werden anschließend durch einen Ortsfrequenzfilter „gereinigt“ und mit Hilfe zweier Verstärker⁷ auf eine Energie von etwa 1000 mJ verstärkt. Die Impulslänge ändert sich dabei

⁵Übliche Daten am Ausgang des Oszillators sind:

mittlere Leistung: $P=100$ mW

Impulslänge: $\Delta t=100$ ps

Impulsfolge: $f=80$ MHz \rightarrow Abstand zwischen zwei Impulsen ≈ 12 ns.

⁶Der Faraday-Isolator dient hierbei der Vermeidung von Rückkopplungen in den Resonator.

⁷Verstärker: Blitzlampengepumpte YAG-Stäbe, Durchmesser von 9,5-15,9 mm sind hierbei üblich.

nicht wesentlich. Die Strahlung wird nun noch mit Hilfe eines Kristalls⁸ von 1064 nm auf 532 nm frequenzverdoppelt. Dabei werden etwa 50-60% der infraroten Strahlung in sichtbares grünes Licht umgewandelt.

Eine solche Anlage liefert also am Ausgang Laserstrahlung mit den folgenden Eigenschaften:

- Wellenlänge $\lambda = 532nm$
- Impulslänge $\Delta t = 100ps$
- Impulsenergie $E = 500...600mJ$
- Wiederholfrequenz $f = 10Hz$

Das Strahlprofil entspricht hierbei einem „top hat“. Die Erzeugung eines solchen Profils aus einem Gauß-Profil ist in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt.

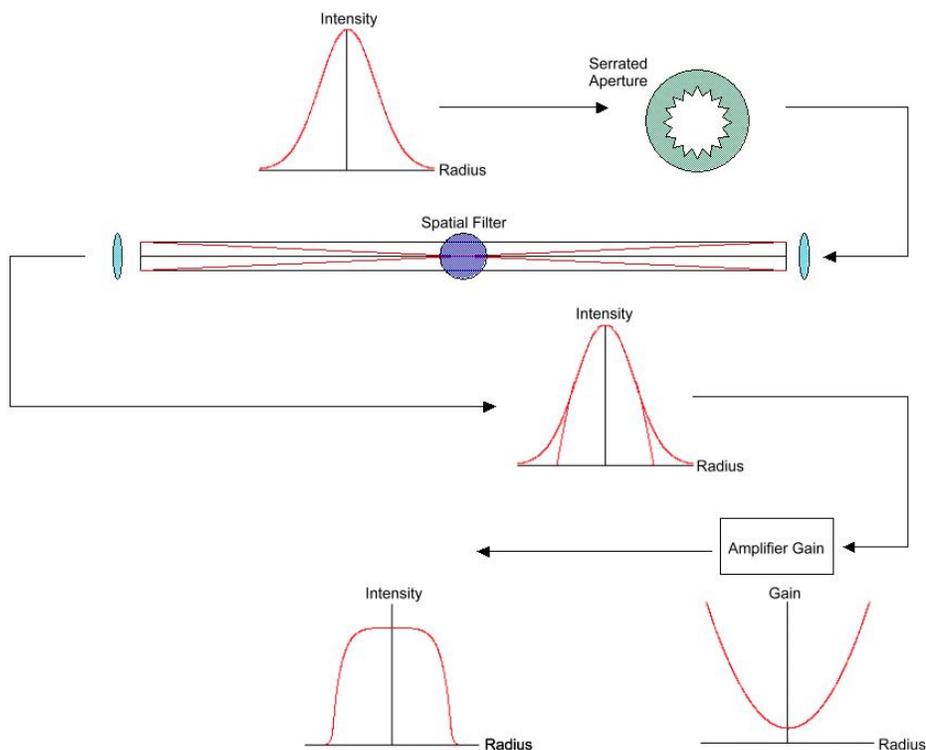


Abbildung 5.5: Erzeugung eines „top hat“ [Coh04]

Mit Hilfe einer speziell geformten Blende und eines Raumfilters werden an dem gaußförmigen Strahlprofil die äußeren Bereiche entfernt. Da die beiden YAG-Stäbe der Laseranlage durch das Pumpen mit Blitzlampen am äußeren Rand eine stärkere Besetzungsinversion aufbauen können als in der Mitte, wird dieser Bereich des durchdringenden Laserstrahls mehr verstärkt als dessen Zentrum. Das Ergebnis ist ein „top hat“-Strahlprofil, wie es in Abbildung 5.5 zu erkennen ist.

⁸geeignet hierfür sind z.B. KD*P-Kristalle.

Diese nahezu rechteckigen Laserimpulse sind natürlich wesentlich besser zur Entfernungsmessung geeignet als beispielsweise ein gaußförmiger Impuls.

Die hier vorgestellte Laseranlage der Firma Coherent eignet sich auf Grund der wesentlich höheren Impulsenergien bei gleicher Impulsbreite wesentlich besser zur Durchführung astronomischer Messungen als die beiden vorgestellten Produkte von QUANTEL.

In den vorigen Kapiteln wurde bereits festgestellt, dass ein Rubinlaser auf Grund seiner Wellenlänge etwas günstiger hinsichtlich der Abschwächung durch die Erdatmosphäre ist als die hier aufgeführten Nd:YAG-Laser. Nahezu alle industriellen Lasersysteme mit den eben vorgestellten Merkmalen sind jedoch auf Basis der Nd:YAG-Laser aufgebaut. Rubinlaser mit solchen Eigenschaften⁹ sind nicht anzutreffen.

Die Wellenlänge der in diesem Kapitel aufgeführten Laser ist mit 532 nm außerdem gut zur Detektion geeignet, da nahezu alle gängigen Photomultiplier oder Photodioden in diesem Wellenlängenbereich genügend empfindlich sind. Es wird also keine größeren Probleme bei der Auswahl geeigneter Detektoren geben.

⁹Impulslänge 100 ps und Pulsenergie von 500-1000 mJ.

Kapitel 6

Geeignete Empfänger

In diesem Kapitel werden die optischen und elektronischen Empfänger und deren Eigenschaften vorgestellt. Zunächst wird ein kurzer Überblick über das Treburer-1m-Teleskop gegeben. Anschließend werden die Vor- und Nachteile verschiedener Detektortypen und deren Verwendbarkeit für die lasergestützte Entfernungsmessung diskutiert.

6.1 Treburer-1m-Teleskop

Dieser Abschnitt beschreibt das Teleskop der Astronomie Stiftung Trebur¹, welches den Kern der zu entwickelnden Entfernungsmessstation darstellen wird.

Das Treburer-1m-Teleskop (T1T) gehört zur Klasse der Cassegrain-Teleskope. Diese Teleskoparten bestehen aus einem kurzbrennweitigen parabolischen Hauptspiegel, in dessen Zentrum eine Bohrung angebracht ist. Diesem gegenüber befindet sich ein kleinerer konvexer Sekundärspiegel (hyperbolisch). Das Prinzip eines Cassegrain-Teleskops ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

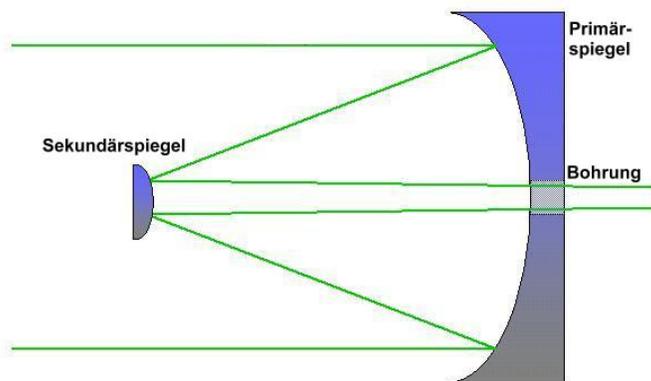


Abbildung 6.1: Prinzip eines Cassegrain-Teleskops

Das einfallende Licht wird dabei durch die Bohrung auf die dahinter liegende Empfangselektronik (z.B. CCD-Kamera) fokussiert.

¹Informationen unter: <http://www.t1t-trebur.de>

Die technischen Daten sowie die geografische Lage des T1T sind in nachfolgender Tabelle 6.1 aufgelistet [Obs04b].

Technische Daten	
Primärspiegeldurchmesser	1200 mm
Sekundärspiegeldurchmesser	450 mm
Fokusslänge	9500 mm
geografische Lage	
Höhe über n. N.	(103 ± 4) m
geografische Breite	49° 55' 31,6'' Nord (±3 m)
geografische Länge	8° 24' 41,1'' Ost (±3 m)

Tabelle 6.1: Technische Daten und geografische Lage des T1T

Um allerdings hochpräzise Entfernungsmessungen zum Mond und nach Satelliten durchführen zu können, müssen die der geografischen Lage anhaftenden Fehler durch ein genaueres Vermessen um ein Vielfaches² verkleinert werden.

Zur Verdeutlichung soll Abbildung 6.2 dienen, auf der zum einen die geöffnete Kuppel des T1T und zum anderen dessen ungefähre Standort abgebildet sind.



Abbildung 6.2: Lage des T1T [Obs04b]

²Idealerweise sollten die Unsicherheiten im Millimeter- bis Zentimeterbereich liegen.

6.2 Filterungen

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit müssen in einer Entfernungsmessanlage verschiedene Filter eingebaut werden, um nur solche Photonen zu detektieren, welche von den Retroreflektoren auf der Mondoberfläche oder von Satelliten reflektiert wurden. Im wesentlichen gibt es drei unterschiedlichen Filtertypen, die bei einer solchen Anlage verwendet werden [DHSS86]:

- **Zeitlicher Filter:** Um Störsignale weitestgehend zu vermeiden, muss vor der eigentlichen Messung die Laufzeit der Laserimpulse grob abgeschätzt werden. Der Detektor wird dann nur für einen kurzen Augenblick aktiviert, in dem das zurückkehrende Signal erwartet wird.
- **Spektraler Filter:** Da die verwendete Laserstrahlung in hohem Grade monochromatisch ist, kann durch einen richtig dimensionierten Filter nur die Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes durchdringen. Alle Störsignale anderer Wellenlängen können damit eliminiert werden.
- **Räumlicher Filter:** Durch eine räumliche Einengung des Sichtfeldes können weitere unerwünschte Störsignale abgehalten werden.

6.3 Vergleich verschiedener Detektortypen

Im wesentlichen lassen sich die Photodetektoren in zwei Klassen einteilen: Photodioden und Photomultiplier. Die folgenden beiden Unterabschnitte gehen kurz auf den Aufbau und die Funktionsweise dieser beiden Systeme ein.

6.3.1 Photodioden

Als Photodioden werden Silizium-, Germanium- oder andere Halbleiterdioden bezeichnet, deren p-n-Übergang hinter einem Fenster und einer transparenten Elektrode offen liegt. Die Photodiode wird in Sperrrichtung betrieben, was dazu führt, dass einfallende Photonen Ladungsträger erzeugen, was zu einem Stromfluss führt. Dieser Photostrom ist über viele Größenordnungen proportional zur Intensität des einfallenden Lichtes.

6.3.2 Photomultiplier

Ein auf einen Photomultiplier einfallendes Photon löst in der Kathodenschicht ein Elektron heraus. Dieses Elektron wird mit Hilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt und auf die erste Dynode des Photomultipliers gelenkt. Dort ist es in der Lage ebenfalls zusätzliche Elektronen herauszulösen. Diese werden durch ein elektrisches Feld auf eine zweite Dynode gelenkt und lösen dort erneut Elektronen aus. Die Anzahl der Elektronen nimmt somit kaskadenartig zu.

Der Verstärkungsfaktor wächst exponentiell mit der Anzahl der Dynoden. Typische Verstärkungen liegen im Bereich von $10^5 - 10^6$, so dass auch einzelne Photonen noch zuverlässig detektiert werden können.

Das Prinzip der Photomultiplier ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

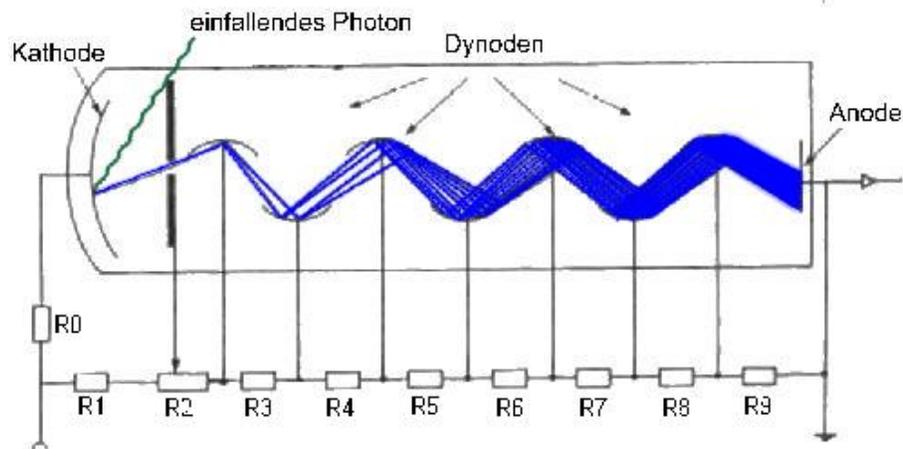


Abbildung 6.3: Prinzip eines Photomultipliers

6.4 Anforderungen an einen Detektor

Die Anforderungen, die an einen Empfänger gestellt werden, der reflektierte Signale vom Mond oder von Satelliten detektieren soll, sind sehr hoch:

- sehr kurze Anstiegszeit
- hohe Empfindlichkeit im entsprechenden Wellenlängenbereich, Möglichkeit der Detektierung einzelner Photonen und hohe Quantenausbeute
- hohe Bandbreite³, bzw. hohes zeitliches Auflösungsvermögen

Für solche Anforderungen eignen sich - vor allem wegen der Detektierung einzelner Photonen - einzig die oben beschriebenen Photomultiplier⁴.

Im Folgenden werden die wichtigsten technischen Daten des Photomultipliers R3809U-50 von Hamamatsu⁵ vorgestellt, welcher sehr gut für die Detektierung der zurückkommenden Laserimpulse geeignet ist.

Abbildung 6.4 zeigt in Teil a) eine Außenansicht des Detektors und in Teil b) die spektrale Empfindlichkeit.

³Die Bandbreite bezeichnet praktisch die Anzahl der aufgenommenen Messwerte pro Sekunde.

Beispiel: Eine Bandbreite von 500 Mhz bedeutet, dass der Detektor 500 Millionen Werte pro Sekunde aufnimmt, also etwa alle 2 ns einen.

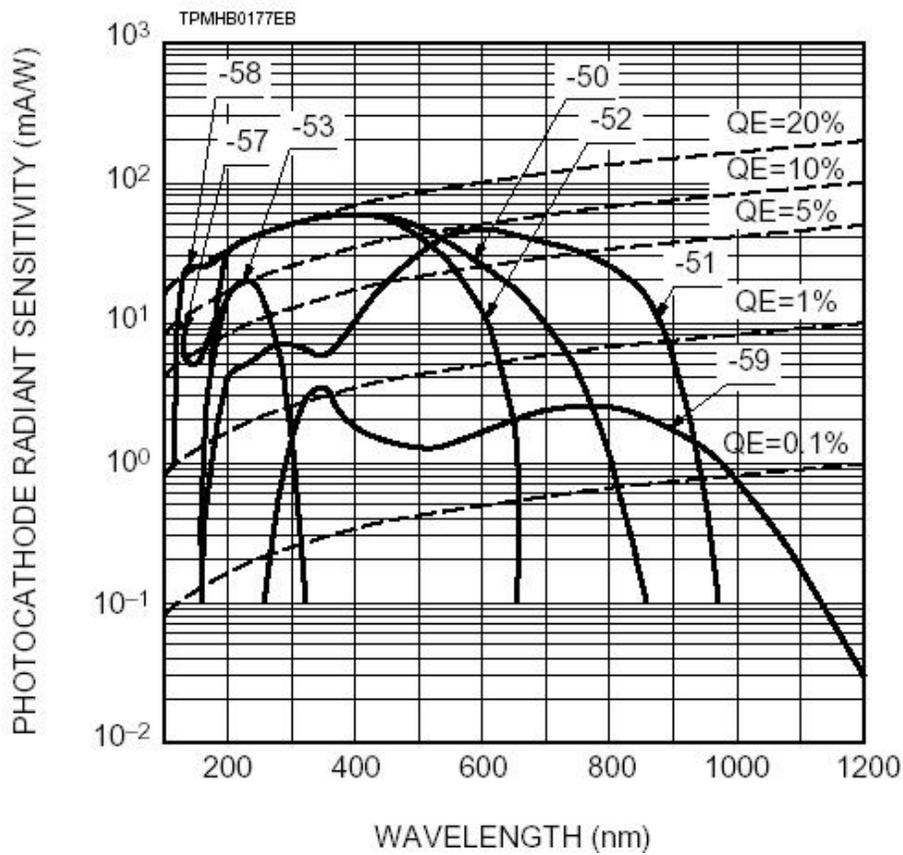
⁴Photodioden kommen vor allem bei der Erfassung der ausgehenden Laserimpulse zur Festlegung der Startzeit zum Einsatz (siehe die Auflistung bestehender Messsysteme in Kapitel 7).

⁵Wird vertrieben durch die Becker & Hickl GmbH.

Ansprechpartner: Dr. Axel Bergmann: bergmann@becker-hickl.de



a)



b)

Abbildung 6.4: Photomultiplier R3809U-50 [Ham97]

Der Detektor weist bei der zur Messung zu verwendeten Laserwellenlänge von 532 nm eine genügend hohe Empfindlichkeit auf.

Eine Zusammenstellung der technischen Daten ist in Tabelle 6.2 zu sehen.

Außendurchmesser [mm]	45
Gesamtlänge [mm]	70,2
Gewicht [g]	98
empfindlicher Detektordurchmesser [mm]	11
zulässige Betriebstemperatur [°C]	-50,...,+50
höchste Empfindlichkeit bei [nm]	430
Rise Time [ps]	150
Transit Time Spread [ps]	≤ 25

Tabelle 6.2: Technische Daten des R3809U-50 [Ham97]

Abbildung 6.5 dient zur Erklärung der Transit Time Spread. Diese Kurve bezeichnet das vom Detektor gelieferte Antwortsignal auf einen Laserimpuls, der eine Breite von 5 ps bei einer Wellenlänge von 596 nm aufweist. Der Wert der Transit Time Spread (25 ps) ist ebenfalls eingezeichnet. Er bezeichnet quasi das minimale Auflösungsvermögen des Detektors.

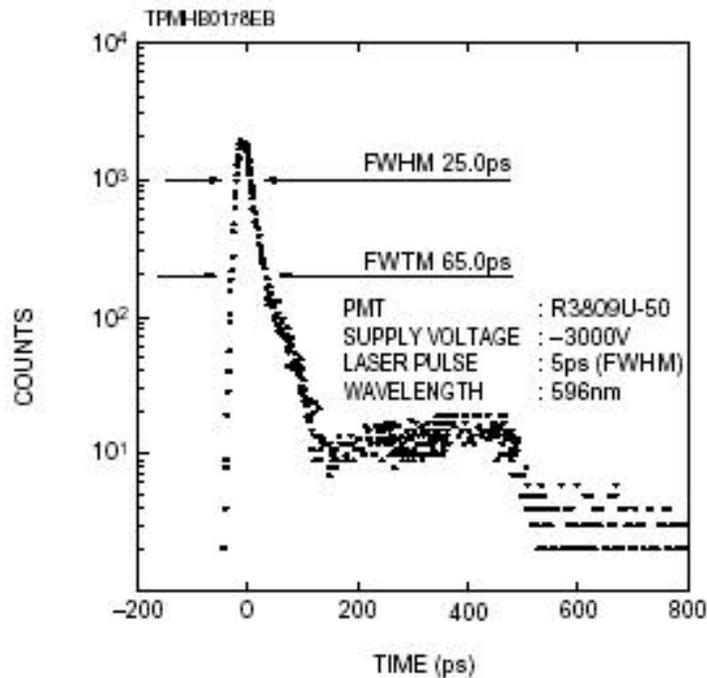


Abbildung 6.5: Zur Erklärung der Transit Time Spread [Ham97]

Weitere Angaben über die benötigte Energieversorgung, den charakteristischen Dunkelstrom, sowie diverse Kennlinien sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Die entsprechenden Informationen können dem Datenblatt des R3809U-50 [Ham97] entnommen werden.

Kapitel 7

Vergleich / Auflistung bestehender Messsysteme

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Beschreibung einiger bereits realisierter und in Betrieb genommener Messstationen. Bei der Komplexität der zu entwickelnden Anlage ist ein Vergleich unterschiedlicher Stationen, die teilweise schon seit mehreren Jahrzehnten zuverlässige Messungen zum Mond und nach Satelliten durchführen, besonders hinsichtlich deren Systemkomponenten wie z. B. Teleskop, Lasersystem, Detektoreinheit, usw. unverzichtbar.

Seit den ersten Messungen nach Satelliten durch die NASA im Jahre 1965 hat sich mit zunehmender Verbesserung der zur Verfügung stehenden Laser und Detektoren die Genauigkeit der Laserentfernungsmessungen ständig erhöht. Betrag der Fehler zu Beginn noch mehr als einen Meter, so arbeiten heutige Messanlagen mit Genauigkeiten im Millimeterbereich. Heutzutage stellt die lasergestützte Entfernungsmessung die exakteste Methode zur Bestimmung astronomischer Distanzen dar. Abbildung 7.1 zeigt die stetige Steigerung der Messgenauigkeit bei Messungen zu künstlichen Erdsatelliten.

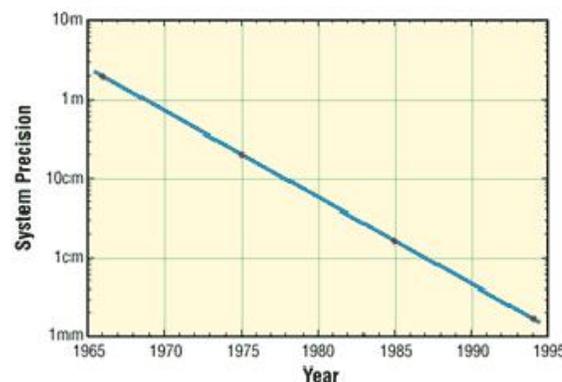


Abbildung 7.1: Messgenauigkeit für Satellitenmessungen [NAS94]

Im September 1998 haben sich die weltweiten Entfernungsmessstationen zum Internationale Laser Ranging Service (ILRS) zusammengeschlossen. Dort werden von zentraler Stelle aus die einzelnen Messprogramme und deren Auswertung koordiniert und

veröffentlicht. Die europäischen Messstationen sind im EUROLAS Consortium of the European Laser Ranging Station zusammengeschlossen.

In Abbildung 7.2 sind alle Stationen des ILRS, von denen Messungen zum Mond oder zu Satelliten durchgeführt werden, aufgezeichnet. Der Stand der Karte datiert vom 26.07.2001.

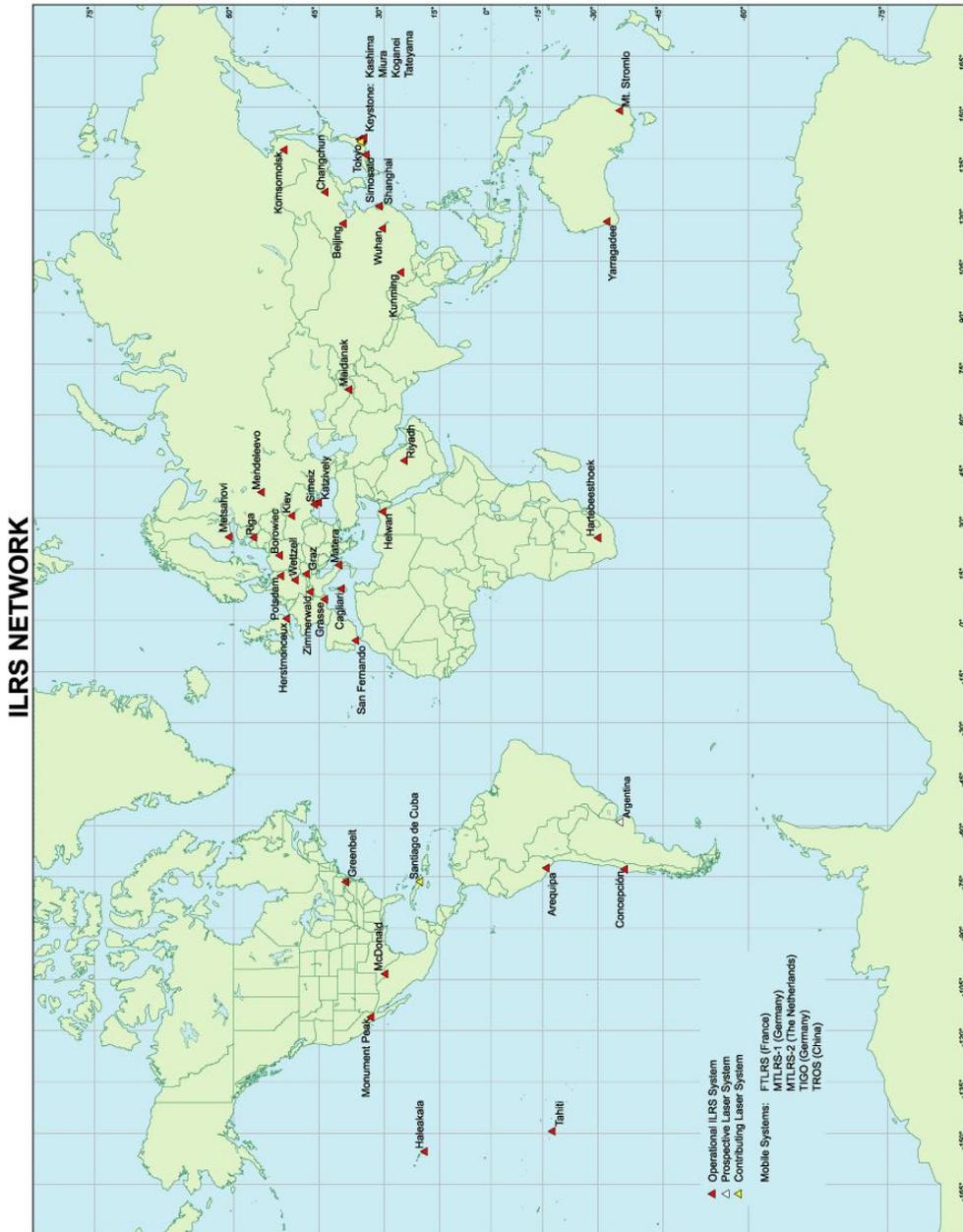


Abbildung 7.2: Messstationen des ILRS [ILR03]

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, gibt es weltweit nur sehr wenige Stationen, die zuverlässige Entfernungsmessungen zum Mond durchführen können. In den folgenden Unterabschnitten werden drei dieser Messstationen eingehender betrachtet und

die technischen Daten der Anlagen vorgestellt.

7.1 Wettzell Laser Ranging System

Die Fundamentalstation Wettzell führt seit Anfang der 1990er Jahre im Rahmen des Wettzell Laser Ranging System (WLRS) Entfernungsmessungen zu Satelliten und zum Mond durch.

Die Besonderheit der Messstation in Wettzell ist, dass dort verschiedene Messsysteme zur Entfernungsbestimmung auf einer Station konzentriert sind. In Wettzell werden neben der lasergestützten Messung noch [DHSS86]

- Radiointerferometrische Messungen nach Quasaren und ggf. nach Satelliten
- Mikrowellenmessungen nach Satelliten (NNSS, GPS)

durchgeführt. Dies ermöglicht es, verschiedene Messtechniken und Verfahren zu vergleichen und redundante Prüfungsmöglichkeiten zu gewährleisten.

Die wichtigsten technischen Daten der Fundamentalstation Wettzell sind in Tabelle 7.1 aufgelistet:

Teleskop	
Durchmesser [m]	0,75
Montierung	Alt/Az
Laser	
Laserart	Nd:YAG-Laser mit drei Verstärkerstufen
Pulsdauer [ps]	50
Pulsenergie bei 1064 nm [mJ]	360
Pulsenergie bei 532 nm [mJ]	180
Empfänger	
1.	Mikrokanal-Photomultiplier (MCP) mit 30 ps Jitter
2.	Infrarot Lawinenphotodiode (IR APD)
3.	hochempfindliche APD

Tabelle 7.1: Technische Daten der Station in Wettzell [Wet04]

Die beiden Avalanche-Photodioden dienen hierbei zur Detektion des ausgehenden Laserimpulses. Dafür wird über einen Strahlteiler ein kleiner Bruchteil der Impulsenergie auf die Photodioden geleitet, deren Signal dann das Start-Ereignis auslöst.

Abbildung 7.3 zeigt das Teleskop, die Detektoren und den Laser der Messstation in Wettzell.

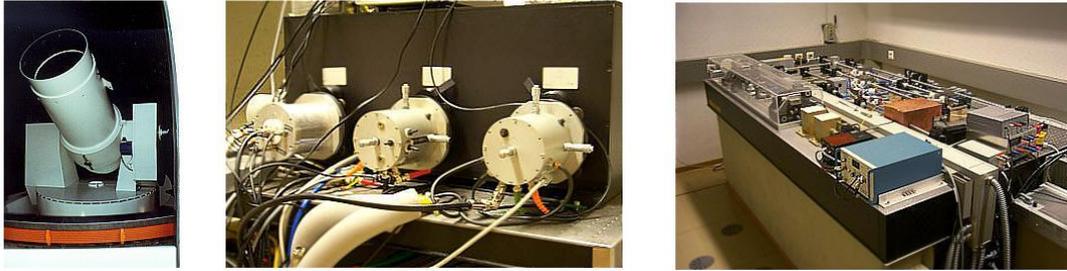


Abbildung 7.3: Technische Anlage in Wettzell [Wet04]

Der von der Fundamentalstation Wettzell verwendete Laser stellt mit einer Pulsdauer von 50 ps bei einer Impulsenergie von 180 mJ quasi einen Kompromiss aus den beiden in Unterabschnitt 5.2.1 vorgestellten Lasersystemen der Firma QUANTEL dar. Zwar ist die Impulsdauer etwas länger als beispielsweise beim Modell YG901C (35 ps Impulsdauer), aber die Energie eines solchen Lichtimpulses ist wesentlich höher als beim YG901C (50 mJ).

Die Spiegelfläche des Wettzeller Teleskops ist mit 75 cm mehr als 2,5mal kleiner als die des Teleskops der Astronomie Stiftung Trebur. Von daher sollte das T1T in jedem Falle für die gestellten Aufgaben ausreichend dimensioniert sein.

7.2 Observatorium in Grasse

Die Messanlage in Grasse (Frankreich) ist, ebenso wie die Fundamentalstation Wettzell, dafür ausgelegt, sowohl Messungen zu künstlichen Erdsatelliten, als auch zum Mond durchführen zu können.

Die technischen Daten der Station Grasse sind in Tabelle 7.2 aufgeführt:

Teleskop	
Bauart	Cassegrain
Hauptspiegeldurchmesser [m]	1,54
Fokusslänge [m]	31
Montierung	Alt/Az
Laser	
Laserart	Nd:YAG
Pulsdauer [ps]	300
Pulsenergie bei 1064 nm [mJ]	400
Pulsenergie bei 532 nm [mJ]	200
Wiederholfrequenz [Hz]	10
Empfänger	
1.	pin-Photodiode InAsGa (IR)
2.	hochempfindliche Lawinen-Photodiode

Tabelle 7.2: Technische Daten der Station Grasse [Gra01]

Die pin-Photodiode hat eine hohe Empfindlichkeit im infraroten Bereich und dient hierbei zur Detektion des ausgesendeten Lichtimpulses (vor der Frequenzverdopplung).

An den vorgestellten technischen Daten ist sehr gut zu erkennen, dass die Laseranlage des Observatorium in Grasse Impulse mit wesentlich größerer Impulsdauer erzeugt. Dies hat allerdings, wie in Unterabschnitt 5.1.2 bereits abgeschätzt, größere Unsicherheiten im Messergebnis zur Folge. Leider sind keine Messdaten mit den ihnen anhaftenden Fehlern bekannt, daher kann an dieser Stelle kein Vergleich der Qualität der Messungen mit denen der Wettzeller Anlage erfolgen.

7.3 McDonald Observatorium

Das McDonald Observatorium in Texas (USA) gehörte zu den ersten Einrichtungen, die bereits kurz nach dem Aufstellen des ersten Retroreflektors durch Armstrong und Aldrin 1969 auf der Mondoberfläche erste Messergebnisse vorweisen konnten.

Die technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

Teleskop	
Bauart	Cassegrain
Hauptspiegeldurchmesser [m]	0,762
Sekundärspiegeldurchmesser [m]	0,305
Laser	
Lasermedium	YG402DP
Pulsenergie bei 532 nm [mJ]	1500
Pulsbreite [ps]	200
Strahldurchmesser [mm]	7
Strahldivergenz [mrad]	0,075
Amplitudenstabilität [%]	±7
Wiederholfrequenz [Hz]	10
Empfänger	
1.	Photodiode
2.	Photomultiplier

Tabelle 7.3: Technische Daten des McDonald Observatoriums [Obs04a]

Das Nd:YAG-Lasersystem des McDonald Observatoriums hat mit 1500 mJ die größte Laserimpulsenergie der drei hier vorgestellten Messstationen. Das Teleskop ist mit einem Durchmesser von 76,2 cm etwa vergleichbar mit dem der Fundamentalstation Wettzell. Vorhaben in neuester Zeit führen allerdings dazu, die Messungen zukünftig mit einem 3,5 m-Teleskop durchzuführen, was natürlich zu einer enormen Verbesserung der Anlage führen wird.

Vergleicht man das Vorhaben der Astronomie Stiftung Trebur und der Fachhochschule Gießen-Friedberg, ein Laser Ranging System mit dem bereits vorhandenen 1,2 m-Teleskop und beispielsweise der in Unterabschnitt 5.2.2 beschriebenen Laseranlage der Firma Coherent aufzubauen, mit den bereits bestehenden Messstationen, so zeigt sich, dass eine solche Anlage durchaus erfolgsversprechende Messresultate erzielen würde.

Kapitel 8

Labora Aufbau eines Entfernungsmesssystems

Neben den in den vorherigen Kapiteln behandelten theoretischen Betrachtungen ist es von großer Wichtigkeit, das Messprinzip auch praktisch zu analysieren. Dazu wird im folgenden Kapitel beschrieben, wie mit denen im Laserlabor der Fachhochschule Gießen-Friedberg vorhandenen Mitteln eine Entfernungsmessung nach dem in Kapitel 3 erläuterten Messprinzip durchgeführt werden kann. Der Aufbau eines solchen Entfernungsmesssystems hat vor allem den Zweck, die prinzipielle Funktionsweise im kleinen Maßstab nachzubilden.

8.1 Beschreibung der verwendeten Geräte

Bei der Auswahl geeigneter Gerätschaften muss auf das bestehende Equipment der Fachhochschule zurückgegriffen werden. Die folgenden Unterabschnitte beschreiben zunächst die zur Entfernungsmessung verwendeten Geräte.

8.1.1 Argonionen-Laser

Als Sendequelle wird bei den praktischen Messungen ein Argonionenlaser der Firma Lexel Laser inc. (Modell 3500) verwendet. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst:

Wellenlänge [nm]	514,5
mittlere Leistung [mW]	3000
Strahldurchmesser [mm]	$\leq 1,3$
Strahldivergenz (voller Winkel) [mrad]	$\leq 0,5$
Amplitudenstabilität [%]	≤ 3

Tabelle 8.1: Technische Daten des Argonionenlasers [Lex]

Das Datenblatt dieses Lasers findet sich in Teil D des Anhangs dieser Arbeit. Abbildung 8.1 zeigt eine Ansicht des verwendeten Lasers.

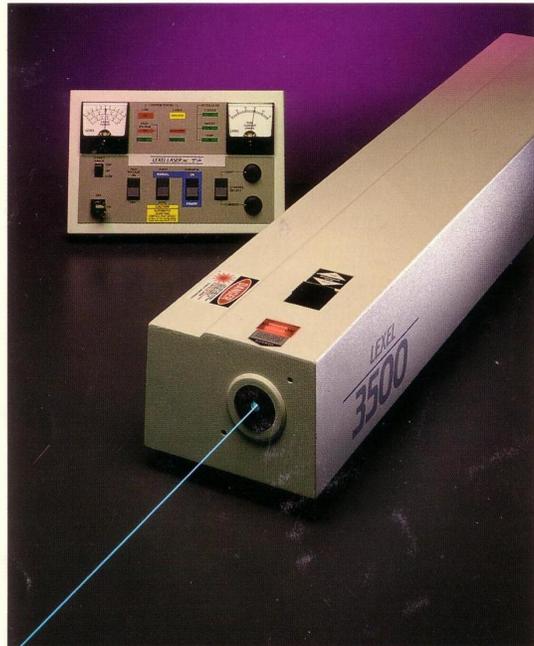


Abbildung 8.1: Ansicht des Argonionenlasers [Lex]

Da dieser Laser nicht über die Möglichkeit eines Q-Switch verfügt, muss das Erzeugen der zur Messung benötigten kurzen Laserimpulse mit Hilfe eines Chopperrades erfolgen.

8.1.2 Chopperrad

Das Chopperrad besteht aus einer mit Schlitzen versehenen Metallscheibe, die von einem Elektromotor angetrieben wird und durch das Einbringen in den Strahlengang die kontinuierliche Strahlung des Argonionenlasers in kurze Impulse „zerhackt“. In Abbildung 8.2 ist die Scheibe mit Bemaßung dargestellt.

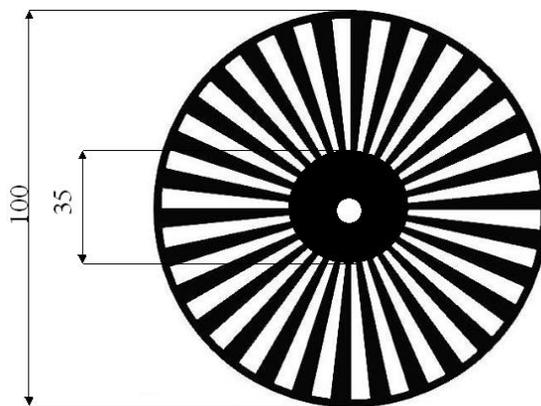


Abbildung 8.2: Chopperrad (Maße in mm)

Die Drehzahl des Rades ist stufenlos einstellbar. Maximal können 4000 Lichtimpulse

pro Sekunde erzeugt werden. Am Chopperrad angebracht ist eine Lichtschranke, welche ein als Referenz nutzbares Messsignal erzeugt.

8.1.3 Photodiode

Als Empfänger steht eine Photodiode zur Verfügung. Bei der Auswahl ist vor allem darauf zu achten, dass die Dioden für die 514,4 nm-Strahlung des Argonionenlasers genügend empfindlich ist und die Diode eine möglichst kurze Anstiegszeit aufweist. Abbildung 8.3 zeigt den verwendeten optischen Breitbandempfänger ORX 83 A der Firma GLM.



Abbildung 8.3: Ansicht des ORX 83 A

Das Datenblatt des Empfängers ist als Anhang C dieser Arbeit angeheftet.

8.1.4 Messdatenerfassung

Zur Erfassung der Messdaten wird der Empfänger sowie das vom Chopperrad erzeugte Referenzsignal an ein Oszilloskop (Tektronix TDS 210) angeschlossen. Dieses Oszilloskop ist über die serielle Schnittstelle mit einem PC verbunden und ermöglicht es, die gemessenen Daten in tabellarischer Form als *.csv-Dateien zu speichern und anschließend auszuwerten.

8.2 Versuchsaufbau

Die größte Schwierigkeit, die bei dieser lasergestützten Entfernungsmessung auftritt ist die, dass die durch das Chopperrad erzeugten Laserimpulse eine größere Pulsdauer haben, als der Laufzeitunterschied bei den hier zu vermessenden Wegstrecken von etwa 100 m ausmacht. Da nur eine geeignete Photodiode vorhanden ist, muss diese sowohl die ausgehenden, wie auch die zurückkommenden Laserimpulse detektieren. Auf Grund der relativ geringen Laufzeiten und der großen Pulsdauern werden sich die beiden Signale überlagern.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8.4 schematisch dargestellt.

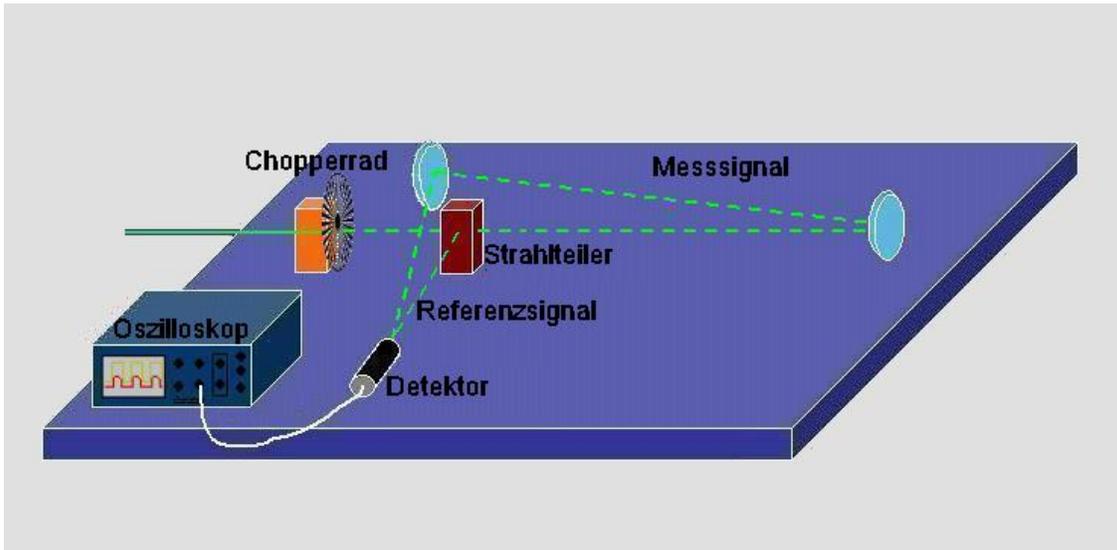


Abbildung 8.4: Prinzipieller Versuchsaufbau

Der kontinuierliche Laserstrahl wird hierbei zunächst durch das rotierende Chopperrad in Laserimpulse aufgeteilt. Diese Impulse gelangen in einen Strahlteiler, von wo aus der „kurze“ Teilstrahl direkt in den Detektor geleitet wird und der „lange“ Teilstrahl zunächst über mehrere Spiegel eine Wegstrecke von knapp 100 m zurücklegt, bevor er ebenfalls den an das Oszilloskop angeschlossene Empfänger erreicht.

Das zu erwartende Signal sollte dann, wie in Abbildung 8.5 gezeigt, aufgebaut sein.

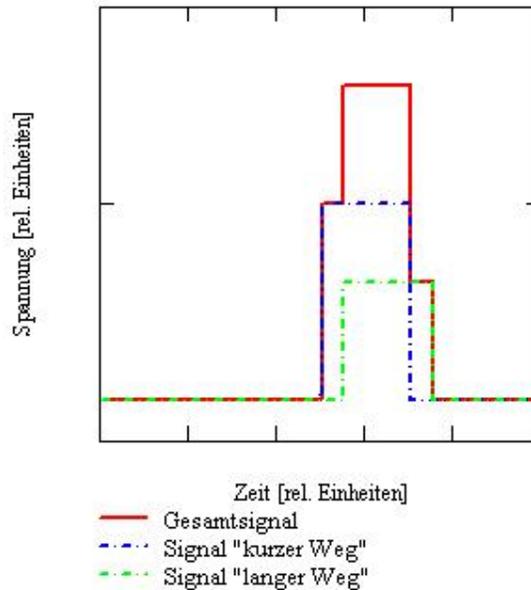


Abbildung 8.5: Prinzipieller Signalverlauf

Das etwas früher ankommende „kurze“ Signal ist auf Grund des geringeren Laufweges weniger stark abgeschwächt, als das kurze Zeit später am Detektor eintreffende „lange“ Signal. Die Überlagerung - also das am Oszilloskop zu erwartende Bild - ist

ebenfalls (rot) eingezeichnet. Durch Vermessen des Versatzes in der ansteigenden oder der abfallenden Flanke des Gesamtsignals lässt sich somit schnell die Laufzeitdifferenz der beiden Teilstrahlen und somit auch die gesuchte Entfernung bestimmen.

Bei der praktischen Umsetzung dieses Prinzips kommt es allerdings zu teils erheblichen Schwierigkeiten:

- Die Laufzeitdifferenz ist in Folge der hohen Lichtgeschwindigkeit sehr gering. Bei einer 100 m kurzen Messstrecke beträgt die Laufzeitdifferenz lediglich $0,33 \mu\text{s}$. Bei einer durch das Chopperrad minimal erreichbaren Impulsdauer von etwa $100 \mu\text{s}$ ist dieser Laufzeitunterschied im Vergleich zur Impulsdauer verschwindend gering. Das Oszilloskop kann nur alle $0,1 \mu\text{s}$ einen Messwert aufnehmen. Eine Differenz von $0,33 \mu\text{s}$ entspricht also quasi nur drei „Pixeln“.
- Die empfindliche Detektorfläche des ORX 83 A ist mit etwa $0,04 \text{ mm}^2$ sehr klein, so dass es sich als äußerst schwierig erweist, beide Teilstrahlen gleichzeitig registrieren zu können.

Aufgrund dieser Tatsachen ist es nicht möglich, einen Versatz in der Signalflanke festzustellen. In Abbildung 8.6 ist das Ergebnis einer solchen Messung dargestellt. Die Impulsbreite beträgt etwa $100 \mu\text{s}$.

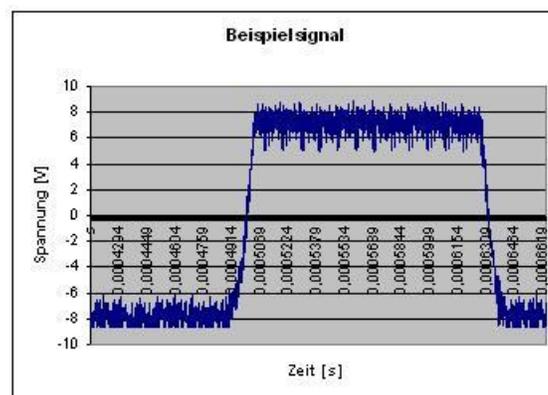


Abbildung 8.6: Ergebnis der ersten Messung

Hierbei ist kein Versatz im Signalverlauf zu erkennen, weder in der ansteigenden, noch in der abfallenden Flanke.

Auf diese Weise kann folglich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln keine Entfernungsmessung durchgeführt werden, das Verfahren muss also modifiziert werden.

Die größte Schwierigkeit bei der beschriebenen Messmethode besteht in dem sehr empfindlichen Justieren der beiden Teilstrahlen in den Detektor. Um dies zu umgehen gibt es zwei Möglichkeiten:

- Verwendung eines zweiten, baugleichen Detektors oder
- Messung der beiden Teilstrahlen nacheinander

Ein zweiter Detektor steht nicht zur Verfügung, also wird im Folgenden die zweite Möglichkeit praktiziert. Beide Teilstrahlen können getrennt voneinander gemessen werden,

wenn man einen immer gleichen, unabhängigen Bezugspunkt hat, auf den die Messung bezogen werden kann. Als ein solcher Bezugspunkt kann das von der im Chopperrad integrierten Lichtschranke gelieferte Signal dienen. Dieses Signal kann in guter Näherung als konstant angesehen werden. Eine Messung kann nun so ablaufen, dass zunächst nur das „lange“ Signal zusammen mit dem entsprechenden Referenzsignal des Chopperrades in den Detektor geleitet wird und die Daten beider Messreihen auf dem PC gespeichert werden. Die gleiche Messung erfolgt anschließend mit dem „kurzen“ Signal und der Referenz. Auch diese beiden Messreihen werden gespeichert. Mit Hilfe einer speziellen Software oder mit einem Computeralgebraprogramm können diese Daten ausgewertet werden.

Dem Messprinzip zu Grund liegt hierbei die Annahme, dass das Referenzsignal bei beiden Messungen identisch ist. Dann kann zunächst der Abstand S_1 z.B. der ansteigenden Flanke des „kurzen“ Signals von der des entsprechenden Referenzsignals rechnerisch bestimmt werden. Durch Berechnung des Abstandes S_2 der Flanke des „kurzen“ Signals von der Referenz und Subtraktion der beiden Abstände kann somit der Laufzeitunterschied Δt ermittelt werden. Die Bezeichnungen sind in Abbildung 8.7 grafisch dargestellt.

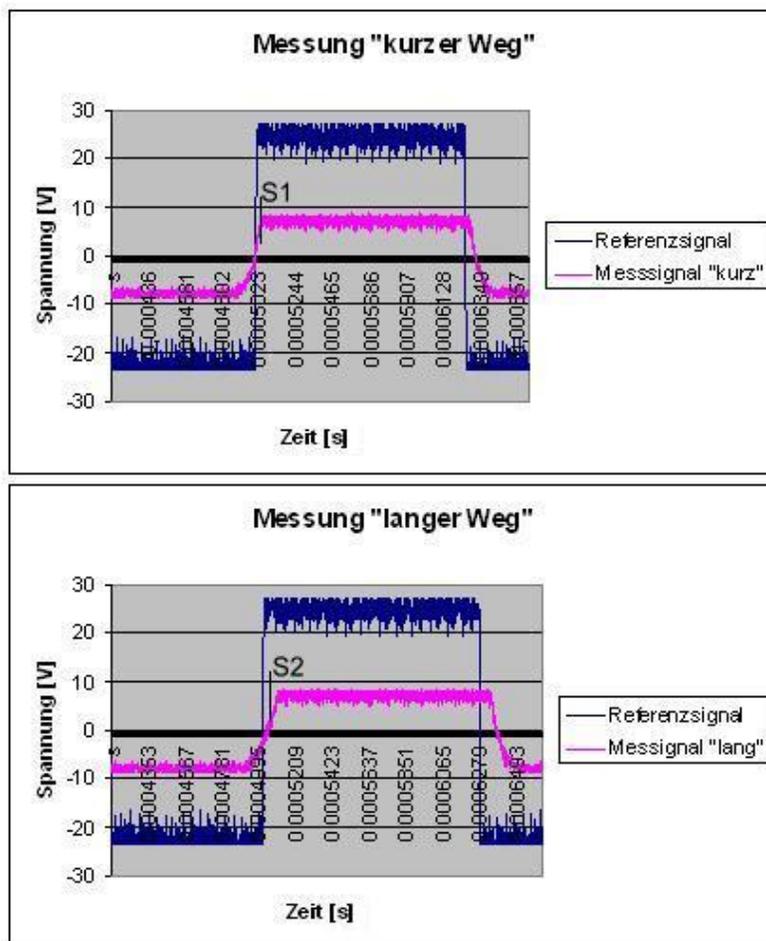


Abbildung 8.7: Zum Messprinzip

Der Laufzeitunterschied berechnet sich dann nach der Gleichung

$$\Delta t = S_2 - S_1$$

Diese Methode führt allerdings in der Praxis zu keinen verwertbaren Ergebnissen. Ursache hierfür sind sicherlich die teils stark schwankenden und verrauschten Messsignale.

Eine andere Auswertemethode ist hier erfolgreicher: Es werden nicht die Abstände der Flanken berechnet, sondern die Abstände der Schwerpunkte der Mess- von den Referenzsignalen. Diese Art der Auswertung ist wesentlich unempfindlicher gegenüber kurzzeitigen Schwankungen und liefert zuverlässigere Ergebnisse als die Flankenauswertung.

Der Laufzeitunterschied Δt berechnet sich dann aus:

$$\Delta t = \underbrace{\left(\frac{\sum t_i \cdot y_{SL_i}}{\sum y_{SL_i}} - \frac{\sum t_i \cdot y_{RL_i}}{\sum y_{RL_i}} \right)}_{\text{Abstand (lang) von der Referenz}} - \underbrace{\left(\frac{\sum t_i \cdot y_{SK_i}}{\sum y_{SK_i}} - \frac{\sum t_i \cdot y_{RK_i}}{\sum y_{RK_i}} \right)}_{\text{Abstand (kurz) von der Referenz}}$$

Der Formel liegt im Prinzip die einfache Gleichung zur Berechnung des x-Koordinate des Schwerpunktes S eines Systems von Punktmassen zu Grunde [BSMM99]:

$$S = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\sum y_i}$$

Die in der obigen Gleichung verwendeten Abkürzungen bedeuten im Einzelnen:

t	Zeitkoordinate
y_{SL}	Spannung des Messsignals „langer Weg“
y_{RL}	Spannung des Referenzsignals „langer Weg“
y_{SK}	Spannung des Messsignals „kurzer Weg“
y_{RK}	Spannung des Referenzsignals „kurzer Weg“

Das zur Messdatenauswertung geschriebene Computerprogramm, sowie die damit erzielten Messergebnisse werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

8.3 Auswertung und Ergebnisse

Um eine bessere Aussage über die Streuung der Messwerte und damit über den Messfehler zu erhalten, sind eine Vielzahl von Einzelmessungen nötig. Zur Erleichterung des Auswertens solch großer Datenmengen wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein Visual-Basic Programm geschrieben, mit welchem die Daten aller Messungen gleichzeitig eingelesen und nach der oben beschriebenen Schwerpunktmethode ausgewertet werden können. Außerdem wird noch mit Hilfe der Standardabweichung eine Aussage über den Messfehler getroffen.

Bei den durchgeführten Messungen wurde 92mal der kurze Weg und 55mal der lange Weg vermessen. Die Daten sind also in insgesamt 143 *.csv-Dateien enthalten.

Die Benutzeroberfläche des erstellten Computerprogramms ist in Abbildung 8.8 aufgezeigt. Die Erklärungen zu den einzelnen Bedienelementen sind gemäß der Nummerierung in Tabelle 8.2 aufgeführt.

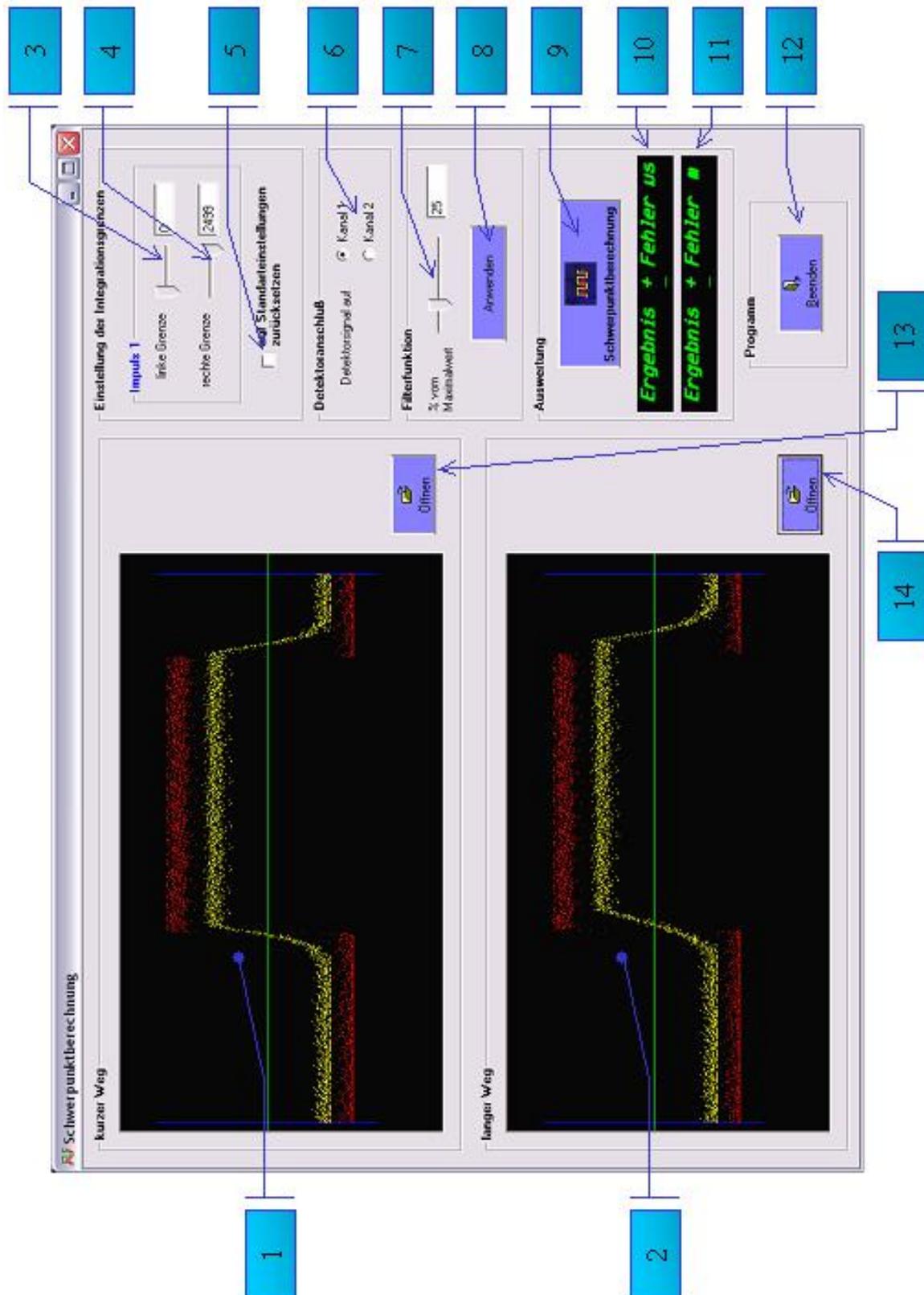


Abbildung 8.8: Screenshot des Programms zur Auswertung der Messdaten

Nummer	Bezeichnung	Funktion
1	Picturebox „kurz“	Darstellung eines Mess- und eines Referenzsignals
2	Picturebox „lang“	Darstellung eines Mess- und eines Referenzsignals
3	Slider „links“	manuelle Festlegung der unteren Integrationsgrenze
4	Slider „rechts“	manuelle Festlegung der oberen Integrationsgrenze
5	Checkbox	zurücksetzen der Integrationsgrenzen auf Standardwerte
6	Option Button	Angabe der Kanalbelegung am Oszilloskop
7	Slider „Filter“	Einstellung der Filterfunktion
8	Button „Anwenden“	Anwenden des Filters
9	Button „Schwerpunkt“	Durchführung der Schwerpunktsberechnungen
10	Textfeld „sek“	Ausgabe des Ergebnisses mit Fehler in μs
11	Textfeld „m“	Ausgabe des Ergebnisses mit Fehler in m
12	Button „Beenden“	Beendet das Programm
13	Button „öffnen_kurz“	Öffnet ein Dialogfenster zum Einlesen der „kurzen“ Daten
14	Button „öffnen_lang“	Öffnet ein Dialogfenster zum Einlesen der „langen“ Daten

Tabelle 8.2: Legende zum Auswerteprogramm

Die Filterfunktion beseitigt zunächst alle negativen Werte, in dem zu jedem Messwert der kleinste Wert hinzuaddiert wird. Anschließend werden alle Werte, die einen bestimmten Prozentsatz des Maximalwertes unterschreiten¹ auf „0“ gesetzt um das störende Untergrundrauschen zu beseitigen.

Zur Überprüfung des geschriebenen Programms wurden alle Messdaten mit Hilfe des Computeralgebraprogramms MathCad nachgerechnet. Die Rechnung ist als Anhang E dieser Arbeit beigefügt.

Beide Verfahren lieferten als Ergebnis der $L = 98,3 m$ langen Messstrecke:

$$\Delta t = (0,3884 \pm 0,37) \mu s$$

was einer Entfernung von

$$L = (116,15 \pm 112,05) m$$

entspricht².

Eine ausführliche Diskussion des großen Fehlers erfolgt im nächsten Abschnitt.

8.4 Fehlerabschätzung

Die Größenordnung des erzielten Messergebnisses stimmt zwar mit dem realen Wert überein, allerdings ist das Ergebnis der Messungen mit einem sehr großen Fehler behaftet. Gründe für das Auftreten der Schwankungen sind unter anderem:

- Ungenaueres Referenzsignal: Wenn das Signal der Lichtschranke des Chopperrades keine konstanten Signale sendet, bzw. wenn das Chopperrad selbst Schwankungen in der Drehzahl aufweist, wirkt sich das natürlich stark auf das Messergebnis aus.

¹Standardmäßig sind 25 % eingestellt.

²Die Umgebungsbedingungen während der Messung waren:
Lufttemperatur $T = 20,7 \text{ }^\circ\text{C}$
Luftdruck $p = 998 \text{ hPa}$

- Gebäudeschwingungen: Der Versuchsaufbau konnte wegen der erforderlichen Größe der Messstrecke nicht auf z. B. einem schwingungsdämpfenden Versuchstisch aufgebaut werden, sondern der Strahlengang musste durch die Flure der FH erfolgen. Auftretende Schwingungen³ können den empfindlichen Versuchsaufbau negativ beeinflussen.
- Wie bereits weiter oben erwähnt, kann das Oszilloskop nur alle $0,1 \mu\text{s}$ einen Messwert aufnehmen. Bei der Geschwindigkeit des Lichtes bedeutet dies eine Laufstrecke von etwa 30 m. Eine starke Streuung der Messwerte und der damit verbundene große Messfehler ist also nicht verwunderlich.
- Den größten Einfluss auf den Messfehler hat allerdings die sehr kleine Detektorfläche und die Tatsache, dass die vom Chopperrad erzeugten Lichtimpulse nicht „homogen“ sind.

Eine zahlenmäßige Angabe über den Anteil der einzelnen Fehlerquellen am Gesamtfehler ist in diesem Fall nicht möglich, so können beispielsweise keine konkreten Angaben über die Laufgenauigkeit des Chopperrades oder eventuell auftretende Gebäudeschwingungen gemacht werden. Im Vergleich zum Fehler, der durch die „Inhomogenität“ der Laserimpulse auftritt, sind die anderen Fehlerquellen allerdings vernachlässigbar.

Abbildung 8.9 verdeutlicht die „Verzerrung“ eines Laserimpulses durch das Chopperrad.

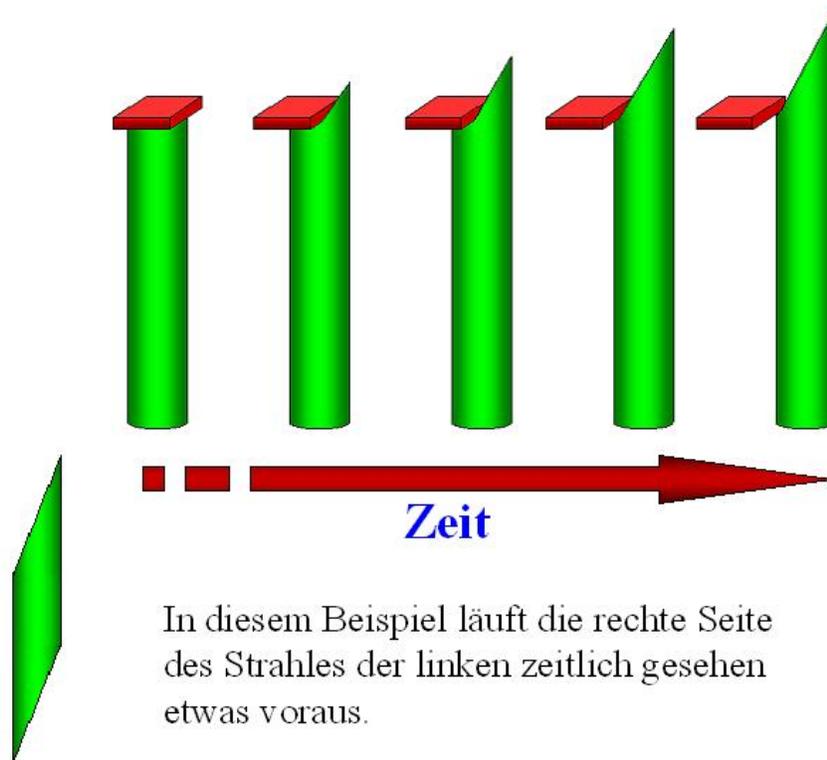


Abbildung 8.9: Verzerrung der Lichtimpulse

Der rote Quader soll dabei eine Speiche des Chopperrades darstellen. Gut zu erkennen ist, dass in diesem Falle die rechte Seite des Laserstrahls der linken zeitlich gesehen

³z. B. durch Trittschall verursacht

etwas vorseilt. Der Messfehler entsteht nun dadurch, dass durch kleinste Veränderungen in der Justierung nicht mehr der komplette Laserimpuls auf die Detektorfläche fokussiert wird und es somit zu einem scheinbaren zeitlichen Wandern des Messsignals kommt. Im Folgenden wird die Größenordnung des daraus entstehenden Fehlers abgeschätzt:

Der Laserstrahl hat einen Durchmesser von $d_L = 2\text{mm}$. Das Chopperrad liefert 4000 Impulse pro Sekunde und besteht aus insgesamt 30 Speichen. Daraus ergibt sich eine Drehfrequenz von $\frac{4000 \frac{1}{s}}{30 \frac{1}{U}} = 13,3 \frac{U}{s}$ oder eine Umlaufdauer von $T = \frac{1}{U} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{s}$. Das entspricht einer Winkelgeschwindigkeit von $\varpi = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 837,76 \cdot \text{Hz}$. Der Laserstrahl tritt in einem Abstand von etwa $r = 35\text{mm}$ vom Zentrum entfernt durch das Chopperrad. Für die Geschwindigkeit an diesem Ort erhält man $v = r \cdot \varpi = 29,32 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Für das Überstreichen des Laserstrahldurchmessers benötigt eine Speiche des Chopperrades demnach $t = \frac{d_L}{v} = 68,2 \cdot \mu\text{s}$.

Diese Abschätzungen zeigen, dass eine Seite des Laserimpulses der anderen um $68,2 \mu\text{s}$ vorseilt. Dieser Wert ist mehr als 20mal so groß wie der zu messende Laufzeitunterschied. Kleinste Schwankungen in der Justierung des Versuchsaufbaues können also zu Fehlern führen, die um ein vielfaches Größer sind als der eigentliche Messwert.

Kapitel 9

Kostenabschätzung

Anhand der in den Kapiteln 5 und 6 erläuterten Anforderungen an Sende- und Empfangseinheit, sowie den dort vorgestellten Lasersystemen und Detektoren wird nun eine Abschätzung der bei der Realisierung des Projektes zu erwartenden Kosten für die instrumentelle Ausstattung durchgeführt. Als Grundlage dieser Abschätzungen dienen die Korrespondenzen mit Coherent¹, QUANTEL² und der Becker & Hickl GmbH³.

In der Folgenden Tabelle sind alle im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Komponenten mit den dazugehörigen Anschaffungskosten aufgelistet.

Lasersysteme	
System	Anschaffungspreis
YG901C von Quantel (Laser + SHG-Option)	etwa 87.000 EUR
Laseranlage von Coherent	300.000-330.000 US\$

Detektorsysteme	
System	Anschaffungspreis
R3809U-50 von Becker & Hickl	12.000-15000 EUR

Tabelle 9.1: Zu erwartende Kosten

Bei der Entscheidung für das Lasersystem von Coherent und die Empfangseinheit von Becker & Hickl belaufen sich die zur praktischen Umsetzung anfallenden Kosten auf etwa 265.000 EUR. Werden noch die zusätzlich entstehenden Kosten für kleinere Bauteile, Peripheriegeräte und die benötigte Infrastruktur beachtet, so beläuft sich die Gesamtsumme auf geschätzte 300.000 EUR.

¹Ansprechpartner: Dr. Jürgen Kolenda: juergen.kolenda@coherent.com

²Ansprechpartner: Dr. Marc Kunzmann: kunzmann@lot-oriel.de

³Ansprechpartner: Dr. Axel Bergmann: bergmann@becker-hickl.de

Kapitel 10

Abschließende Betrachtungen

10.1 Zusammenfassung

Nach einer kurzen historischen Einführung in das Gebiet der laserbasierten Entfernungsbestimmung wurden einige der diversen Anwendungsmöglichkeiten solcher Messungen erläutert. Das diesen Messungen zu Grunde liegende Prinzip und die zur Messung notwendigen Retroreflektoren auf der Mondoberfläche, sowie einige spezielle Erdsatelliten, wurden ausführlich dargestellt und es wurden erste (geometrische) Energiebetrachtungen durchgeführt.

Die Erdatmosphäre stellt für solche Messungen die größte Störquelle dar, daher wurde auf ihren Aufbau und die Zusammensetzung eingegangen und anschließend eine ausführliche Abschätzung der Verluste beim Durchstrahlen der Erdatmosphäre auf Grund von Extinktion durchgeführt. Die dispersive Eigenschaft der Atmosphäre wurde erläutert und das diese beschreibende Atmosphärenmodell von MARINI und MURRAY vorgestellt und diskutiert. Die atmosphärischen Fenster wurden ebenfalls im Hinblick auf die Auswahl geeigneter Wellenlängen und damit auch geeigneter Laser betrachtet.

Die Anforderungen, wie z. B. die geeignete Wellenlänge, die geringe Strahldivergenz oder die kurze Impulsdauer, die ein solches Messverfahren an die Laser stellt, wurden diskutiert und es konnten bereits einige auf dem Markt befindliche Anlagen der Firmen Coherent und QUANTEL hinsichtlich deren technischen Eigenschaften vorgestellt werden.

Anschließend wurden eingehend die zur Detektierung rückkehrender Laserimpulse benötigten Komponenten beschrieben. Zunächst erfolgte eine kurze Beschreibung des TIT der Astronomie Stiftung Trebur und danach wurden verschiedene Detektorkonzepte hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in einem lasergestützten Entfernungsmesssystem untersucht. Hierbei konnte auch ein den recht hohen Anforderungen genügendes Empfängersystem der Firma Becker & Hickl vorgestellt werden.

Bei dem für solche komplexen Entwicklungen unbedingt notwendigen Vergleich mit bereits bestehenden Messsystemen wurde vor allem auf die technischen Komponenten der Messstationen in Wettzell und Grasse, sowie auf die Messanlage des McDonald Observatoriums in Texas eingegangen und mit den vorher beschriebenen Laser- und Detektorsystemen verglichen.

Im praktischen Teil dieser Arbeit wurde, mit den an der Fachhochschule in Friedberg vorhandenen Mitteln, eine Messanlage zur lasergestützten Entfernungsbestimmung nach dem Puls-Echo-Verfahren von Wegstrecken von knapp 100 m Länge aufge-

baut. Es wurden verschiedene Möglichkeiten des Aufbaus und der Messdatenauswertung aufgezeigt und abschließend eine detaillierte Fehleranalyse durchgeführt.

Zum Schluss erfolgte noch eine - für die Entscheidung über die praktische Realisierung dieses Projektes sicher nicht unerhebliche - Abschätzung der anfallenden Kosten. Dabei wurde sich an den ungefähren Anschaffungskosten der in den Kapiteln 5 und 6 vorgestellten Laser- und Detektoranlagen orientiert.

10.2 Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurde bereits darauf hingewiesen, dass hier nur Teilaspekte des Messsystems behandelt werden können. Einige Themengebiete wurden bisher noch nicht oder nur am Rande untersucht. Zu den noch auszuführenden Arbeiten gehören unter anderem:

- Entwicklung einer Einkoppeloptik, um die Laserimpulse zur Verringerung der Strahldivergenz in das TIT einzukoppeln - und zwar unabhängig von dessen Orientierung.
- Integrieren eines Zeitnormals (z. B. Cäsium) in die Messanlage zur hochpräzisen Laufzeitmessung.
- Dimensionierung der benötigten zeitlichen, spektralen und räumlichen Filteranlagen.
- Entwickeln der Software zur automatischen Durchführung der beabsichtigten Messungen. Darin enthalten müssen zum einen die Ausrichtung des Teleskops auf das Zielobjekt, das Erzeugen der Laserimpulse, sowie das Auslesen der Detektoren sein.
- Ebenfalls berücksichtigt werden muss der genaue Strahlengang durch das Teleskop bis zum Detektor. Um Messungen mit einer Genauigkeit von etwa einem Zentimeter durchführen zu können, muss natürlich auch der Standort der Messanlage zuvor entsprechend genau bestimmt sein.

Es steht zwar noch eine ganze Menge Arbeit aus, aber im Rahmen weiterer Diplom- und Studienarbeiten oder Tutorien lässt sich sicherlich der größte Teil dieser Aufgaben erfolgreich erledigen. Wünschenswert wäre auch eine fachbereichsübergreifende Zusammenarbeit, um das vorhandene Know-How auch wirkungsvoll und effektiv einsetzen zu können.

Abschließend lässt sich das komplette Messprinzip der lasergestützten Entfernungsmessung sehr treffend mit einem Zitat von Dieter Egger [Egg85] zusammenfassend beschreiben:

„Man steht im wesentlichen vor dem Problem, eine gesuchte Strecke mit Hilfe eines biegsamen und längenveränderlichen Maßstabes zu bestimmen, bei dem die Anfangsmarkierung verschwommen ist und die Endmarkierung immer mehr verwischt wird.“

Anhang A

Mondkarten der Retroreflektoren

Die in diesem Kapitel abgebildeten Mondkarten zeigen die Standorte der Retroreflektoren auf der Mondoberfläche. Alle Abbildungen stammen aus dem Mondatlas von [Rük90].

Die Koordinaten der Reflektoren sind zusammen mit dem Landedatum und der Landeregion in chronologischer Reihenfolge in nachfolgender Tabelle aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der bemannten und unbemannten Mondmissionen findet sich unter anderem in [Pat96] und [NAS04].

Mission	Landung	Landeplatz	Koordinaten
Apollo 11	20.07.1969	südwestl. des Mare Tranquillitatis	0,6741°N 23,4730°O
Luna 17	17.11.1970	westlich des Mare Imbrium	38,17°N 35,00°W
Apollo 14	05.02.1971	Hochland nördlich von Fra Mauro	3,6453°S 17,4714°W
Apollo 15	30.07.1971	Hadley-Rille und Apenninus	26,1322°N 3,6339°O
Luna 21	16.01.1973	LeMonnie-Krater	25,85°N 30,45°O

Tabelle A.1: Positionen der Retroreflektoren

In Abbildung A.1 ist die gesamte erdzugewandte Mondoberfläche dargestellt. Die 76 Rechtecke entsprechen denen im Mondatlas (siehe [Rük90]) enthaltenen Detailkarten. Die fünf blau umrandeten Gebiete sind weiter unten aufgeführt. Sie geben die Standorte der fünf auf dem Mond befindlichen Retroreflektoren an.

Die Reflektoren befinden sich auf den Detailkarten:

Karte Nr. 10: Luna 17

Karte Nr. 22: Apollo 15

Karte Nr. 24: Luna 21

Karte Nr. 35: Apollo 11

Karte Nr. 42: Apollo 14

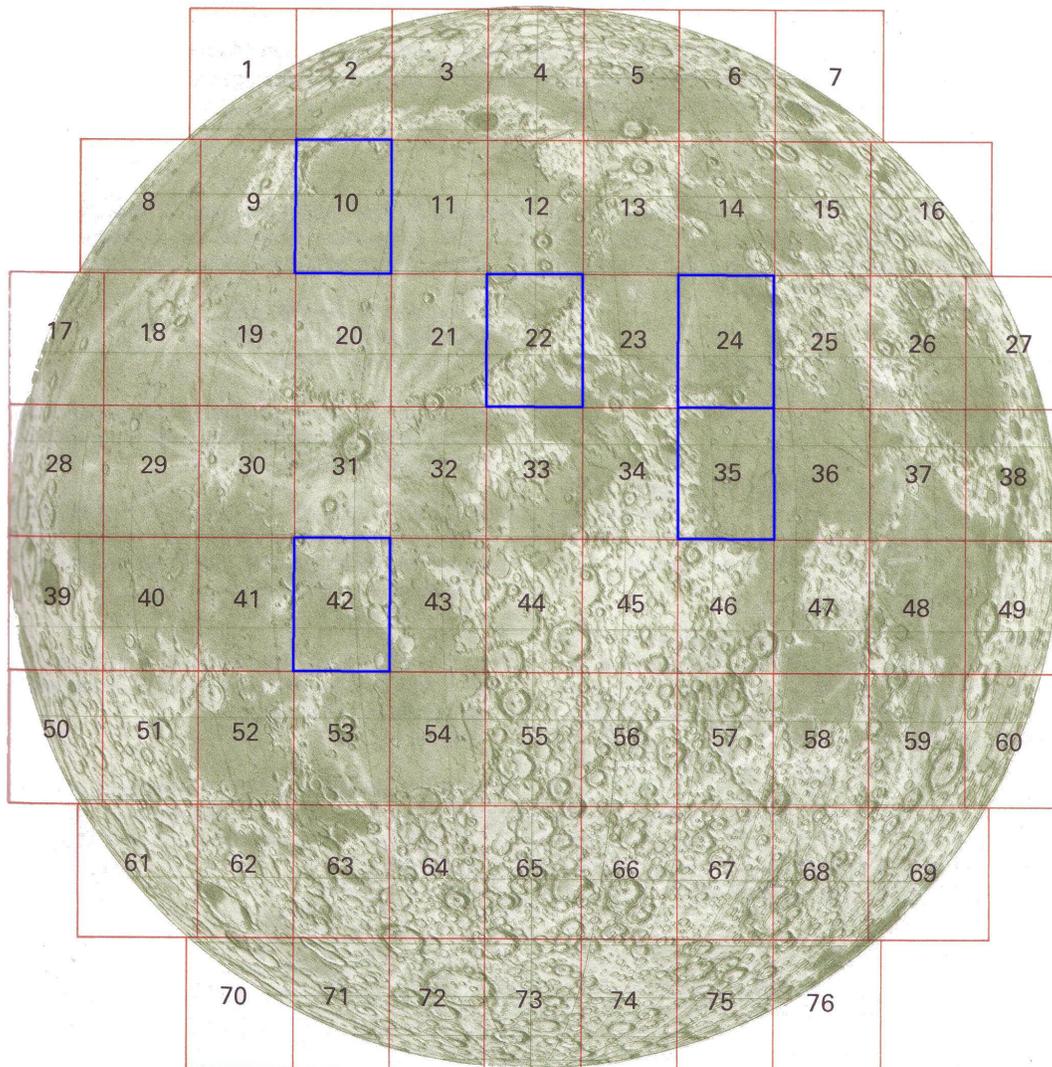


Abbildung A.1: Die erd zugewandte Mondoberfläche [Rük90]

A.1 Standort des Apollo 11-Reflektors

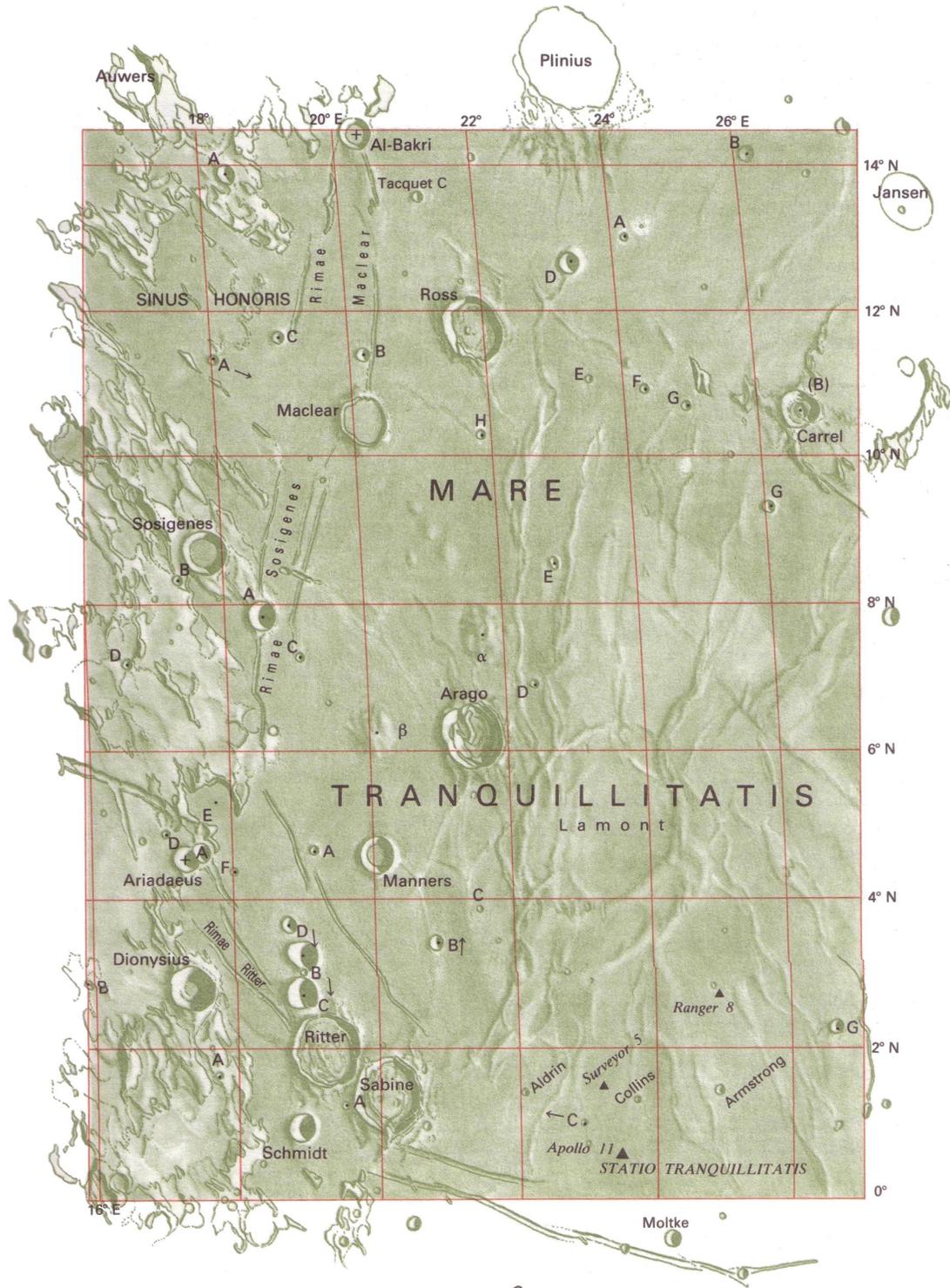


Abbildung A.2: Mondkarte Apollo 11 [Rük90]

A.2 Standort des Apollo 14-Reflektors



Abbildung A.3: Mondkarte Apollo 14 [Rük90]

A.3 Standort des Apollo 15-Reflektors



Abbildung A.4: Mondkarte Apollo 15 [Rück90]

A.4 Standort des Luna 17-Reflektors

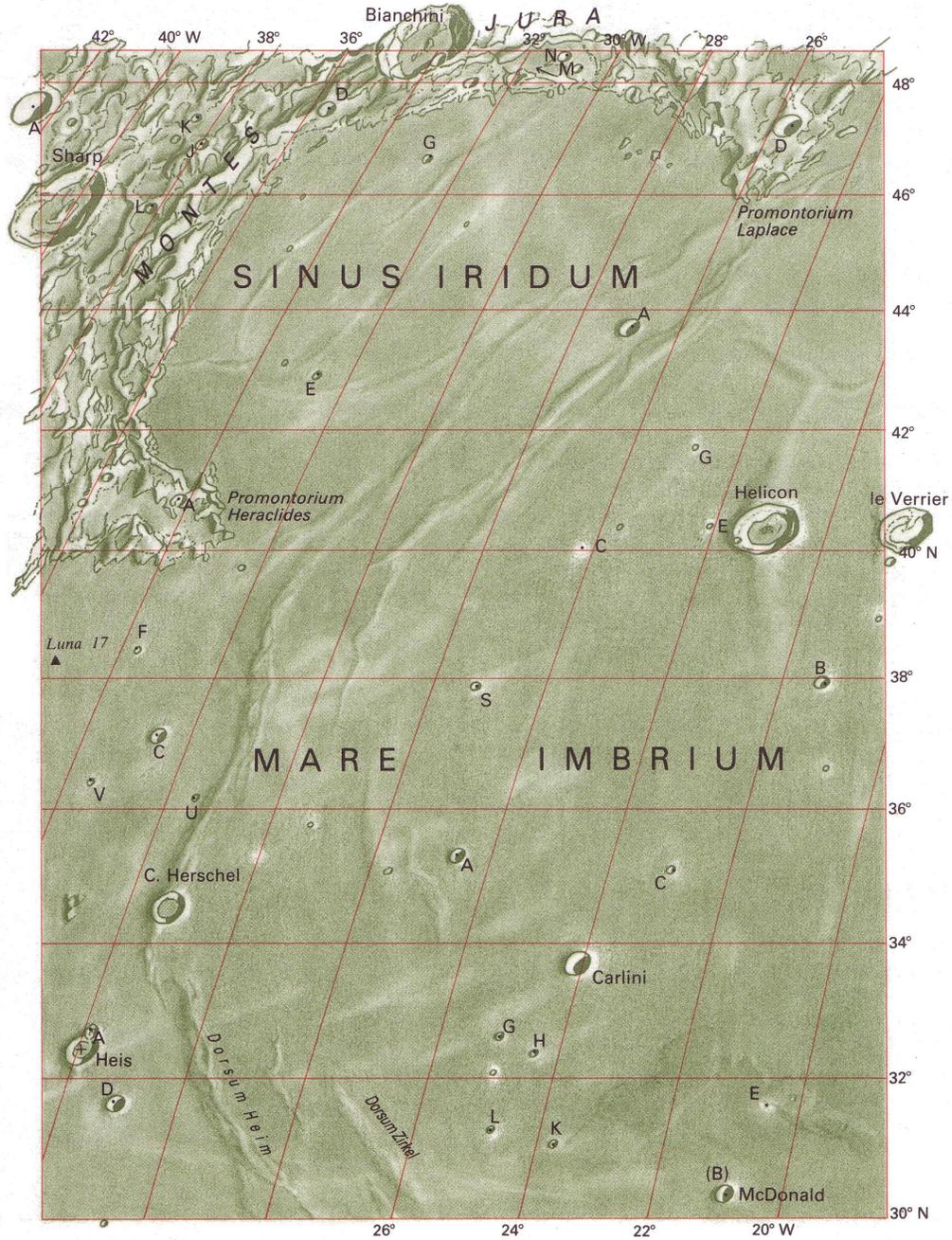


Abbildung A.5: Mondkarte Luna 17 [Rück90]

A.5 Standort des Luna 21-Reflektors

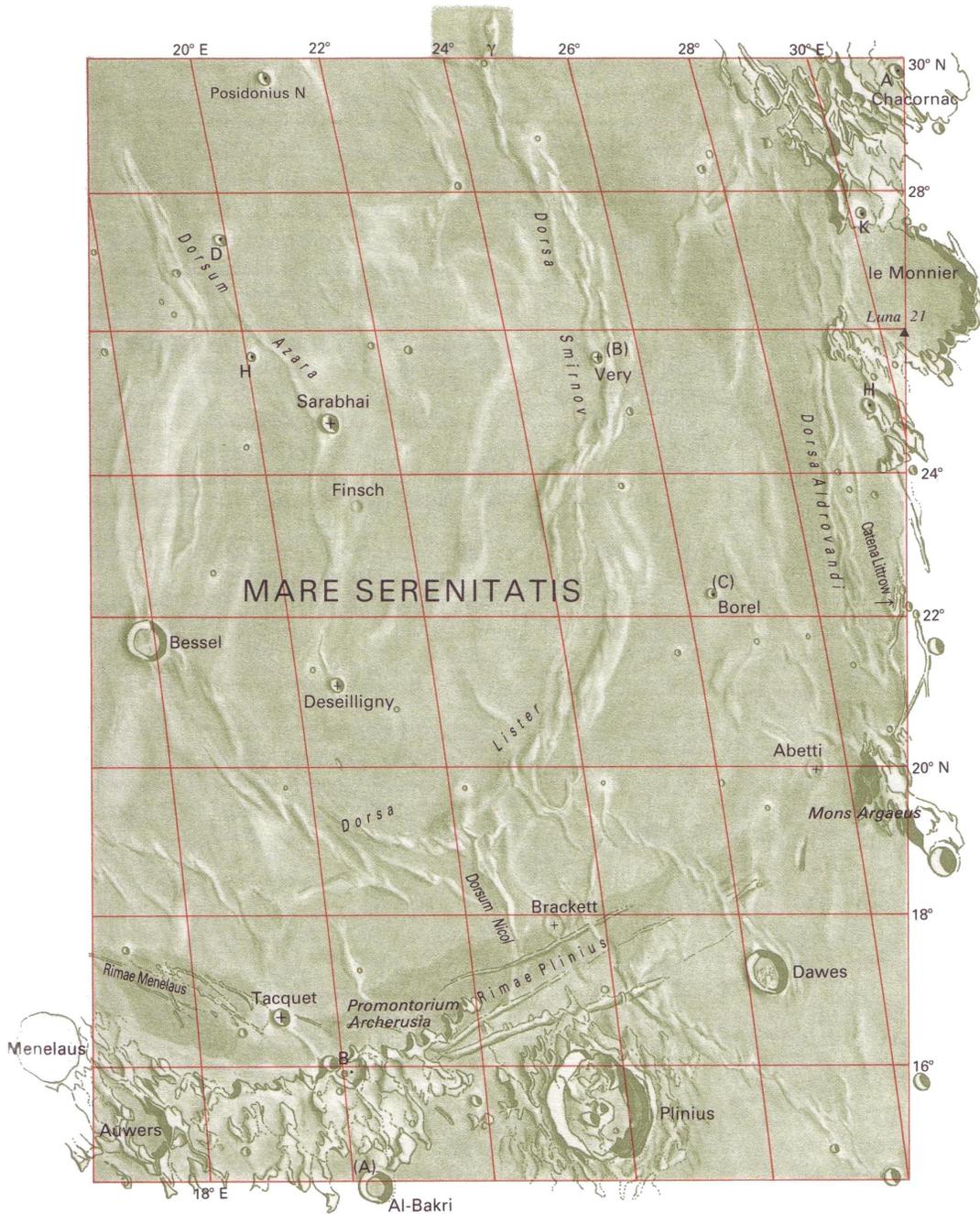


Abbildung A.6: Mondkarte Luna 21 [Rük90]

Anhang B

Zum Laser Ranging geeignete Satelliten

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Satelliten, die mit geeigneten Retroreflektoren ausgestattet sind, und mit denen lasergestützte Entfernungsmessungen möglich sind [ILR03]:

Name	Größe (Bogensekunden)	Perigäumshöhe (km)	Inklination (°)
ADEOS-1	30	815	99
ADEOS-2	15	803	98.62
Ajisai	30	1485	50
Apollo11 Sea of Tranquility	variabel	356.400	5
Apollo14 Fra Mauro	variabel	356.400	5
Apollo15 Hadley Rille	variabel	356.400	5
Beacon-C	15	927	41
CHAMP	5	474	87
DIADEME-1C	15	545	40
DIADEME-1D	15	585	40
Envisat	15	800	98
ERS-1	15	780	99
ERS-2	15	800	99
Etalon-1	300	19.105	65
Etalon-2	300	19.135	65
GEOS-3	30	841	115
GFO-1	15	800	108
GFZ-1	5	385	52

Tabelle B.1: Satelliten zur Entfernungsmessung Teil A

Name	Größe (Bogensekunden)	Perigäumshöhe (km)	Inklination (°)
GLONASS-40	300	19.140	65
GLONASS-41	300	19.140	65
GLONASS-44	300	19.140	65
GLONASS-47	300	19.140	65
GLONASS-49	300	19.140	65
GLONASS-50	300	19.140	65
GLONASS-53	300	19.140	65
GLONASS-56	300	19.140	65
GLONASS-57	300	19.140	65
GLONASS-62	300	19.140	65
GLONASS-63	300	19.140	65
GLONASS-65	300	19.140	65
GLONASS-66	300	19.140	65
GLONASS-67	300	19.140	65
GLONASS-68	300	19.140	65
GLONASS-69	300	19.140	65
GLONASS-70	300	19.140	65
GLONASS-71	300	19.140	65
GLONASS-72	300	19.140	65
GLONASS-78	300	19.140	65
GLONASS-79	300	19.140	65
GLONASS-80	300	19.140	65
GLONASS-81	300	19.140	65
GLONASS-82	300	19.140	65
GLONASS-84	300	19.140	65
GLONASS-86	300	19.140	65
GLONASS-87	300	19.140	65
GLONASS-88	300	19.140	65
GLONASS-89	300	19.140	65
Gravity Probe B	15	650	90
GPS-35	300	20.195	54
GPS-36	300	20.030	55
Grace-A	5	485-500	89
Grace-B	5	485-500	89
ICESAT	TBD	600	94
Jason	15	1336	66
LAGEOS-1	120	5850	110
LAGEOS-2	120	5625	53
LASSO	300	35,9	
Larets	30	691	98.204
LRE	15	250-36.000	28
Luna17 Sea of Rains	variabel	356.400	5
Luna21 Sea of Serenity	variabel	356.400	5
Meteor-2-21/FIZEAU	15	950	83
METEOReteor3M	30	1000	99.64

Tabelle B.2: Satelliten zur Entfernungsmessung Teil B

Name	Größe (Bogensekunden)	Perigäumshöhe (km)	Inklination (°)
MSTI-2	15	432	97
Meteor-3-6/PRARE	30	1200	83
REFLECTOR	30	1018	99.64
RESURS-01/3	15	675	98
SEASAT	n/a	805	108
Starlette	30	815	50
Starshine-3	5	470	67
Stella	30	815	99
SUNSAT	15	400	93
TIPS	30	1025	63
TiPS-Norton	30	1025	63
TIPS-Ralph	30	1025	63
TOPEX/Poseidon	15	1350	66
WESTPAC	15	835	98
ZEIA	5	471	97

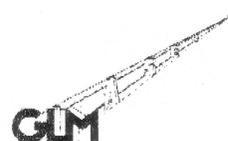
Tabelle B.3: Satelliten zur Entfernungsmessung Teil C

Anhang C

Datenblatt des ORX 83 A

INNO-TEC
Geschäftsbereich Laser-Meßtechnik

INNO-TEC · GLM · Universitätsstraße 142 · D-4630 Bochum 1
Tel.: 0234/9708-450 Fax: 0234/9708-451



Optischer Breitbandempfänger ORX 83 A

-2/93-

hohe Bandbreite (typ. 700 MHz)
SI-PIN-Detektor ($\lambda_p = 830 \text{ nm}$)
kleine Baugröße



Der optische Empfänger **ORX 83 A** ist für die Übertragung breitbandig modulierter optischer Signale bis 700 MHz entwickelt worden. Durch die miniaturisierte Betriebselektronik wird neben der hohen Verstärkung optischer Signale auch die sofortige Betriebsbereitschaft an einer herkömmlichen Spannungsquelle (12 VDC ... 15 VDC) ermöglicht. Der integrierte Detektor besitzt seine maximale Empfindlichkeit bei einer Wellenlänge von $\lambda_p = 830 \text{ nm}$.

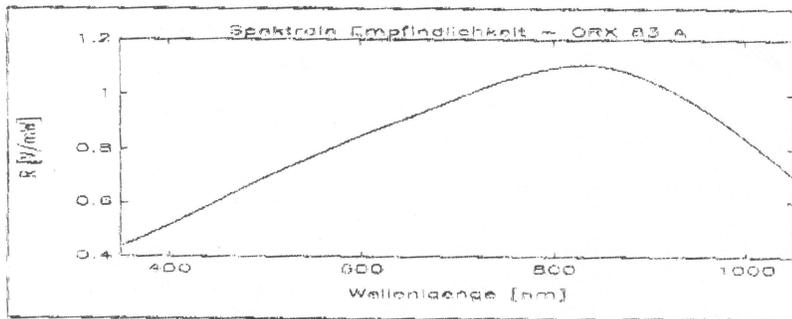
Seine Eigenschaften eröffnen breite Anwendungsmöglichkeiten sowohl in der optischen Messtechnik als auch in der optischen Nachrichtentechnik. Durch die geringen Gehäuseabmessungen ist der **ORX 83 A** mühelos in anwenderspezifische optische Systeme zu integrieren. Für die Verwendung in üblichen optischen Banksystemen stehen entsprechende Adapterringe zur Verfügung.

Für die optoelektronische Wandlung schnell modulierter Signale werden entsprechende Sendermodule angeboten. Verfügbar sind Sender der Serie OTX... bei 650 nm, 670 nm, 790 nm und 830 nm. Diese Halbleiterlasermodule weisen eine interne Leistungsstabilisierung und Modulationsbandbreiten bis 700 MHz auf.

Anwendungsbeispiele:

- analoge und digitale Datenübertragung
- Frequenzgangmessung an optischen Baugruppen
- Abstandsmessung (OTDR, OFDR)
- Schnelle Wandlung von optischen Meßsignalen
- Charakterisierung optoelektronischer Baugruppen
- Aufbau von AC-Lichtschranken

Spektrale Empfindlichkeit (typisch):



optische / elektrische Daten (typisch, $T_U = 23^\circ\text{C}$):

Wellenlängenbereich:	λ	350 ... 1050	nm
Bandbreite:	B_{RF}	0,01 ... 700	MHz
Amplitude HF-Ausgang:	A_{RF}	0 ... 650	mV
Rauschen:	NEP	13	$\mu\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$
Detektorfläche:	A_{DET}	0,04 ¹⁾	mm^2
HF-Ausgangssignal:	R (830 nm)	1,12	V/mW
Betriebsspannung:	V_B	+12 ... +15	VDC

allgemeine Daten:

Hochfrequenzanschluss:	SMA (50 Ω)
Betriebsgehäusetemperatur:	0 ... +50 $^\circ\text{C}$
Gehäuseabmessungen (Durchmesser/Länge):	15 / 40 mm
Gehäusematerial:	Messing, schwarz gebeizt

¹⁾ Empfänger mit 0,2 mm^2 Detektorfläche in Vorbereitung.

- Anmerkung:**
- Gehäuseadapter für gängige Optiksysteime sind verfügbar.
 - Das Gehäuse liegt auf Massepotential.
 - Der ORX 83 A wird auch als DC-gekoppelte Empfängerversion angeboten.

Anhang D

Datenblatt des Argonionen-Lasers



POWER SPECIFICATIONS¹

Guaranteed fundamental mode power²

Wavelength	3500-3	3500-4	3500-5	3500-K ³
Multiline ³	3W	4W	5W	1W
Single line ⁴ (mW)				
528.7 ⁵	200	300	375	
514.5	1450	1750	2100	
501.7	250	350	450	
496.5	500	600	700	
488.0	1100	1400	1600	
476.5	450	550	650	
472.7 ⁶	70	210	310	
465.8 ⁶	80	130	210	
457.9	250	300	375	
454.5 ⁶	50	100	150	
799.3 ⁷				35
752.5 ⁷				150
676.4				200
647.18				700
568.2				200
530.9				250
520.8				100
482.5				40
476.2				60

Notes:

- Listed specifications represent the general performance of standard models. Lexel 5300 series ion lasers guarantee performance at 514.5 nm and 488.0 nm on all argon lasers, and 676.4 nm and 647.1 nm on all krypton lasers. Power and performance guarantees are available for other wavelengths upon request at the time of purchase of a new laser or replacement tube. Contact a Lexel sales office if you have any special requirements.
- Using standard TEM₀₀ reflectors unless otherwise indicated.
- Simultaneous operation of 514.5 through 476.5 and 457.9 nm lines using Model 3502 Multiline Mirror Holder.
- Using Model 3500 Prism Wavelength Selector.
- The 799.3, 752.5 and 528.7 nm lines each require a special set of mirrors. 799.3 and 752.5 nm use Model 3502 Multiline Mirror Holder.
- The 472.7, 465.8 and 454.5 nm wavelengths may require special mirrors to achieve the indicated power.
- Krypton lasers are optimized for the listed red lines. Contact a Lexel Laser, Inc. sales office for performance at 568.2 nm through 456.2 nm.
- Single line 647.1 nm may be obtained by using the Prism Wavelength Selector or by using the Model 3502 Multiline Mirror Holder and reflectors that select 647.1 nm only.

PERFORMANCE SPECIFICATIONS¹

Beam diameter² (@ 1/e² points)

514.5 nm TEM ₀₀ (argon)	≤ 1.3 mm
647.1 nm TEM ₀₀ (krypton)	≤ 1.3 mm

Beam divergence² (full angle)

514.5 nm TEM ₀₀ (argon)	≤ 0.5 mrad
647.1 nm TEM ₀₀ (krypton)	≤ 0.7 mrad

Beam polarization ratio

	> 100:1 E-vector vertical
--	---------------------------

Cavity length³ (L)

with multiline mirror holder	0.96 m
with prism wavelength selector	1.0 m

Longitudinal mode spacing³ (C/2L)

with prism wavelength selector	150 MHz
with multiline mirror holder	156 MHz

Optical resonator

Solid Invar[®] rod structure

Amplitude power stability (½ hour warm-up)

in light control	1 hr: ≤ ± 0.2%/8 hrs: ≤ ± 1.0%
in current control	1 hr: ≤ ± 3.0%

Optical noise

(10 Hz-2 MHz)	≤ 0.2% rms
light control ⁴	≤ 1.0% rms
current control	≤ 1.0% rms

Electrical service requirements

208 VAC, 3 phase, 50A (WYE or DELTA), 50/60 Hz

Input voltage range⁴

187-250 VAC

Cooling water requirements

2.2 gpm at 20 psi (8.3 liters/min at 1.4 Atm)

Filtered tap water. Max. water temp. 35°C. Maximum static pressure 70 psi (4.8 Atm).

Notes:

- The listed specifications represent the general performance of standard models. Unless otherwise indicated, performance is with laser operating at full rated power on 514.5 nm. Contact Lexel for performance under other conditions and at other wavelengths. Stated specifications of performance are based upon engineering and quality control procedures and testing protocols established by Lexel. Reference is made to those procedures and protocols in connection with the interpretation and application of any of the listed performance specifications, particular statements of which are available from Lexel upon request.
- Beam diameter and beam divergence increase slightly with increasing wavelength. If the mirror configuration is not changed, values at other wavelengths will be $d = d_0 \lambda / \lambda_0$, where d is diameter (or divergence) at wavelength λ , d_0 is listed diameter (or divergence) at listed wavelength λ_0 .
- Cavity length is the optical distance between the two mirrors making up the optical cavity. Due to the normal travel of the mirror tuning screws, this length can vary by ± 2 mm. The resulting change in longitudinal mode spacing can be calculated from $\Delta \nu = \pm c/L (0.001)$ where c is 3×10^8 m/sec and L is the listed cavity length.
- Krypton models have 5% lower input voltage range than that listed for the argon models.
- Using Option 7501 light regulator.

Anhang E

Berechnungen mit Mathcad

Zur Überprüfung des zur Messdatenauswertung geschriebenen Visual-Basic-Programm wurden die Daten zusätzlich mit dem Computeralgebraprogramm MathCad ausgewertet.

$K_1 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 01.csv)$	$K_2 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 02.csv)$
$K_3 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 03.csv)$	$K_4 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 04.csv)$
$K_5 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 05.csv)$	$K_6 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 06.csv)$
$K_7 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 07.csv)$	$K_8 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 08.csv)$
$K_9 := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 09.csv)$	$K_{10} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 10.csv)$
$K_{11} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 11.csv)$	$K_{12} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 12.csv)$
$K_{13} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 13.csv)$	$K_{14} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 14.csv)$
$K_{15} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 15.csv)$	$K_{16} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 16.csv)$
$K_{17} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 17.csv)$	$K_{18} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 18.csv)$
$K_{19} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 19.csv)$	$K_{20} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 20.csv)$
$K_{21} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 21.csv)$	$K_{22} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 22.csv)$
$K_{23} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 23.csv)$	$K_{24} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 24.csv)$
$K_{25} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 25.csv)$	$K_{26} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 26.csv)$
$K_{27} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 27.csv)$	$K_{28} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 28.csv)$
$K_{29} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 29.csv)$	$K_{30} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 30.csv)$
$K_{31} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 31.csv)$	$K_{32} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 32.csv)$
$K_{33} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 33.csv)$	$K_{34} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 34.csv)$
$K_{35} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 35.csv)$	$K_{36} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 36.csv)$
$K_{37} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 37.csv)$	$K_{38} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 38.csv)$
$K_{39} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 39.csv)$	$K_{40} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 40.csv)$
$K_{41} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 41.csv)$	$K_{42} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 42.csv)$
$K_{43} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 43.csv)$	$K_{44} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 44.csv)$
$K_{45} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 45.csv)$	$K_{46} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 46.csv)$
$K_{47} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 47.csv)$	$K_{48} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 48.csv)$
$K_{49} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 49.csv)$	$K_{50} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 50.csv)$
$K_{51} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 51.csv)$	$K_{52} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 52.csv)$
$K_{53} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 53.csv)$	$K_{54} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 54.csv)$
$K_{55} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 55.csv)$	$K_{56} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash kurz \backslash 56.csv)$

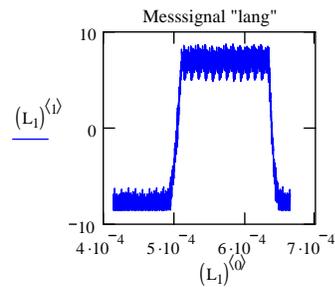
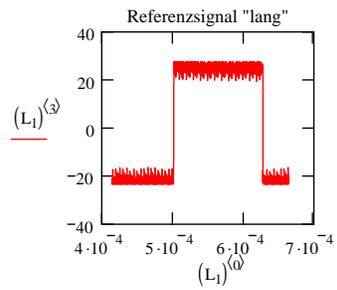
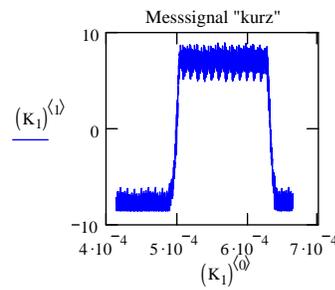
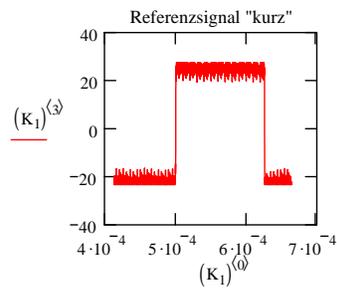
$L_{55} := PRNLESEN(C : \backslash Messung \backslash lang \backslash 55.csv)$

$ZEIT := (K_1)^{(0)}$

$K^{(0)} = K^{(2)} = L^{(0)} = L^{(2)}$: Zeitspalte
 $K^{(1)}, L^{(1)}$: Messsignalpalte
 $K^{(3)}, L^{(3)}$: Referenzsignalpalte

$n := 0..2499$: Anzahl der Messwerte

$N := 2500$



$m := 1..92$ Anzahl der Messdateien "kurzer Weg"

$n := 1..55$ Anzahl der Messdateien "langer Weg"

$K_{row0_m} := (K_m)^{(0)}$ $K_{row1_m} := (K_m)^{(1)}$ $K_{row3_m} := (K_m)^{(3)}$

$L_{row0_n} := (L_n)^{(0)}$ $L_{row1_n} := (L_n)^{(1)}$ $L_{row3_n} := (L_n)^{(3)}$

$$K_{\text{row}1_m} := K_{\text{row}1_m} + \left| \min(K_{\text{row}1_m}) \right|$$

Elimination negativer Werte beim Referenzsignal

$$K_{\text{row}3_m} := K_{\text{row}3_m} + \left| \min(K_{\text{row}3_m}) \right|$$

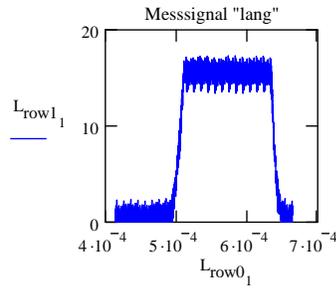
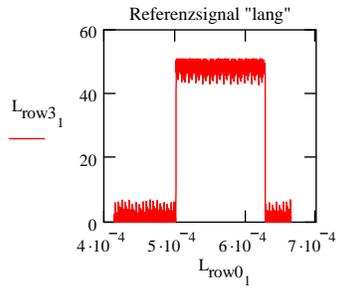
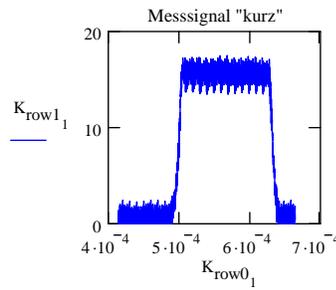
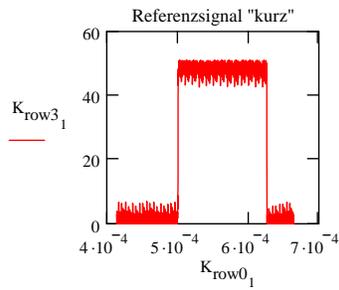
Elimination negativer Werte beim Messsignal

$$L_{\text{row}1_n} := L_{\text{row}1_n} + \left| \min(L_{\text{row}1_n}) \right|$$

Elimination negativer Werte beim Referenzsignal

$$L_{\text{row}3_n} := L_{\text{row}3_n} + \left| \min(L_{\text{row}3_n}) \right|$$

Elimination negativer Werte beim Messsignal



k := 0..2499

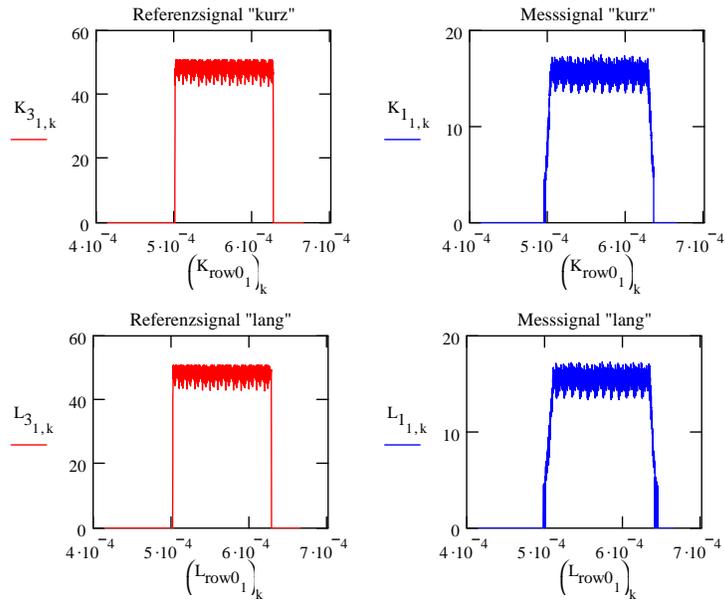
Filterfunktion, um das Untergrundrauschen zu beseitigen:

$$K_{3,m,k} := \begin{cases} 0 & \text{if } (K_{\text{row}3_m})_k < 25\% \cdot \max((K_{\text{row}3_m})) \\ (K_{\text{row}3_m})_k & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K_{1,m,k} := \begin{cases} 0 & \text{if } (K_{\text{row}1_m})_k < 25\% \cdot \max((K_{\text{row}1_m})) \\ (K_{\text{row}1_m})_k & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{3,n,k} := \begin{cases} 0 & \text{if } (L_{\text{row}3_n})_k < 25\% \cdot \max((L_{\text{row}3_n})) \\ (L_{\text{row}3_n})_k & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{1,n,k} := \begin{cases} 0 & \text{if } (L_{\text{row}1_n})_k < 25\% \cdot \max((L_{\text{row}1_n})) \\ (L_{\text{row}1_n})_k & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$S(x_1, x_2, y) := \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_{1_n} \cdot y_n}{\sum_{n=0}^{N-1} x_{1_n}} - \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_{2_n} \cdot y_n}{\sum_{n=0}^{N-1} x_{2_n}}$$

A := 1..55 B := 1..92

$$S\left(\text{submatrix}(L_1, A, A, 0, 2499)^T, \text{submatrix}(L_3, A, A, 0, 2499)^T, \text{ZEIT}\right) =$$

6.485·10 ⁻⁶
7.904·10 ⁻⁷
1.769·10 ⁻⁶
2.109·10 ⁻⁶
1.127·10 ⁻⁶
1.73·10 ⁻⁶
1.333·10 ⁻⁶
2.767·10 ⁻⁶
1.008·10 ⁻⁶
6.802·10 ⁻⁷
2.364·10 ⁻⁶
1.373·10 ⁻⁶
2.528·10 ⁻⁶
1.05·10 ⁻⁶
1.954·10 ⁻⁶
1.641·10 ⁻⁶

$$S\left(\text{submatrix}(K_1, B, B, 0, 2499)^T, \text{submatrix}(K_3, B, B, 0, 2499)^T, \text{ZEIT}\right) =$$

2.331·10 ⁻⁶
2.745·10 ⁻⁶
1.772·10 ⁻⁶
1.424·10 ⁻⁶
1.929·10 ⁻⁷
1.976·10 ⁻⁶
1.118·10 ⁻⁶
-1.594·10 ⁻⁸
2.469·10 ⁻⁶
2.062·10 ⁻⁶
-8.9·10 ⁻⁸
1.988·10 ⁻⁶
2.751·10 ⁻⁸
5.109·10 ⁻⁸
1.095·10 ⁻⁷
1.883·10 ⁻⁶

$$E_L =$$

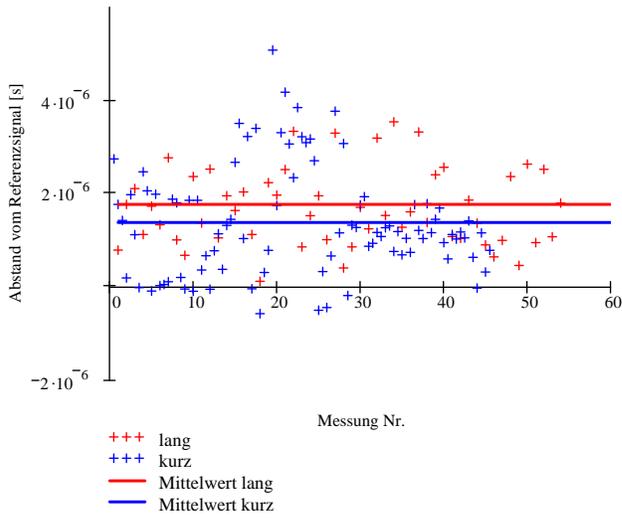
	0
0	$6.485 \cdot 10^{-6}$
1	$7.904 \cdot 10^{-7}$
2	$1.769 \cdot 10^{-6}$
3	$2.109 \cdot 10^{-6}$
4	$1.127 \cdot 10^{-6}$
5	$1.73 \cdot 10^{-6}$
6	$1.333 \cdot 10^{-6}$
7	$2.767 \cdot 10^{-6}$
8	$1.008 \cdot 10^{-6}$
9	$6.802 \cdot 10^{-7}$
10	$2.364 \cdot 10^{-6}$
11	$1.373 \cdot 10^{-6}$
12	$2.528 \cdot 10^{-6}$
13	$1.05 \cdot 10^{-6}$
14	$1.954 \cdot 10^{-6}$
15	$1.641 \cdot 10^{-6}$

$$E_K =$$

	0
0	$2.331 \cdot 10^{-6}$
1	$2.745 \cdot 10^{-6}$
2	$1.772 \cdot 10^{-6}$
3	$1.424 \cdot 10^{-6}$
4	$1.929 \cdot 10^{-7}$
5	$1.976 \cdot 10^{-6}$
6	$1.118 \cdot 10^{-6}$
7	$-1.594 \cdot 10^{-8}$
8	$2.469 \cdot 10^{-6}$
9	$2.062 \cdot 10^{-6}$
10	$-8.9 \cdot 10^{-8}$
11	$1.988 \cdot 10^{-6}$
12	$2.751 \cdot 10^{-8}$
13	$5.109 \cdot 10^{-8}$
14	$1.095 \cdot 10^{-7}$
15	$1.883 \cdot 10^{-6}$

$$M_K := \frac{1}{92} \cdot \sum_{k=0}^{91} E_{K_k} \quad M_K = 1.383 \times 10^{-6} \text{ s} \quad \text{: Mittelwert "kurz"}$$

$$M_L := \frac{1}{55} \cdot \sum_{k=0}^{54} E_{L_k} \quad M_L = 1.772 \times 10^{-6} \text{ s} \quad \text{: Mittelwert "lang"}$$



Standartabweichung: $S(x, x_m, n) := \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - x_m)^2}$

$S(E_L, M_L, 55) = 1.045 \times 10^{-6} \text{ s}$: Standartabweichung "kurzer Weg"

$S(E_K, M_K, 92) = 1.162 \times 10^{-6} \text{ s}$: Standartabweichung "langer Weg"

$t_K := 2.01$: Statistische Sicherheit bei 95% "kurzer Weg"

$t_L := 2.01$: Statistische Sicherheit bei 95% "langer Weg"

$\Delta M_K := t_K \cdot \frac{S(E_K, M_K, 92)}{\sqrt{100}}$ $\Delta M_K = 2.336 \times 10^{-7} \text{ s}$

$\Delta M_L := t_L \cdot \frac{S(E_L, M_L, 55)}{\sqrt{55}}$ $\Delta M_L = 2.832 \times 10^{-7} \text{ s}$

Gaußsche Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta t = \sqrt{\left[\left[\frac{d}{dM_L} (M_L - M_K) \right] \cdot \Delta M_L \right]^2 + \left[\left[\frac{d}{dM_K} (M_L - M_K) \right] \cdot \Delta M_K \right]^2}$$

$\Delta t := \sqrt{\Delta M_L^2 + \Delta M_K^2}$ $\Delta t = 3.671 \times 10^{-7} \text{ s}$

$t := \frac{1}{55} \cdot \sum_{k=0}^{54} E_{L_k} - \frac{1}{92} \cdot \sum_{k=0}^{91} E_{K_k}$ $t = 3.883 \times 10^{-7} \text{ s}$

$s := c \cdot t$ $s = 116.498 \text{ m}$

$\Delta s := c \cdot \Delta t$ $\Delta s = 110.13 \text{ m}$

$s = (116,5 \pm 110,1) \text{ m}$

Anhang F

Quellcode

Die folgenden Unterkapitel beinhalten die verschiedenen Quellcodedateien (*.frm) der zur Verdeutlichung des Atmosphäreneinflusses und zur Auswertung der Messwerte geschriebenen Visual Basic - Programme.

F.1 Korrekturformel nach Marini und Murray

```
VERSION 5.00
Object = "{648A5603-2C6E-101B-82B6-000000000014}#1.1#0"; "MSCOMM32.OCX"
Object = "{F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0"; "comdlg32.ocx"
Object = "{831FDD16-0C5C-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0"; "MSCOMCTL.OCX"
Begin VB.Form Form1
    AutoRedraw = -1 'True
    Caption = "Entfernungskorrektur nach Marini und Murray © M Kremer"
    ClientHeight = 9315
    ClientLeft = 60
    ClientTop = 345
    ClientWidth = 9000
    BeginProperty Font
        Name = "MS Serif"
        Size = 8.25
        Charset = 0
        Weight = 400
        Underline = 0 'False
        Italic = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Icon = "Entfernungskorrektur_nach_Marini_und_Murray.frx":0000
    LinkTopic = "Form1"
    ScaleHeight = 9315
    ScaleWidth = 9000
    StartUpPosition = 3 'Windows-Standard
    Begin VB.Frame Frame3
        Caption = "Entfernungskorrektur"
        BeginProperty Font
            Name = "MS Sans Serif"
            Size = 8.25
            Charset = 0
            Weight = 400
            Underline = 0 'False
            Italic = 0 'False
            Strikethrough = 0 'False
        EndProperty
        Height = 1335
        Left = 5880
        TabIndex = 64
        Top = 6600
        Width = 2775
    End
    Begin VB.TextBox Text_Entfernungskorrektur
        Alignment = 2 'Zentriert
        BackColor = &H00000000&
        BeginProperty Font
```

```
Name = "Sydney"
Size = 14.25
Charset = 0
Weight = 700
Underline = 0 'False
Italic = -1 'True
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor = &H0000FF00&
Height = 495
Left = 480
TabIndex = 65
Top = 480
Width = 1695
End
Begin VB.Label Label19
Caption = "m"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 375
Left = 2400
TabIndex = 66
Top = 600
Width = 255
End
End
Begin VB.Frame Frame2
Caption = "Einstellungen"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 1935
Left = 240
TabIndex = 57
Top = 6240
Width = 4335
Begin VB.CheckBox Check_Trebur
Caption = "Messort: Trebur"
Height = 495
Left = 1560
TabIndex = 69
Top = 720
Width = 1455
End
Begin VB.TextBox Text_Elevation
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 285
Left = 3000
TabIndex = 61
Top = 1440
Width = 735
End
Begin VB.TextBox Text_Höhe
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
```

```
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 285
Left = 3000
TabIndex = 60
Top = 360
Width = 735
End
Begin MSComctlLib.Slider Slider_Höhe
Height = 615
Left = 1440
TabIndex = 67
Top = 240
Width = 1335
_ExtentX = 2355
_ExtentY = 1085
_Version = 393216
LargeChange = 1
Max = 1500
TickFrequency = 100
End
Begin MSComctlLib.Slider Slider_Elevation
Height = 495
Left = 1440
TabIndex = 68
Top = 1320
Width = 1335
_ExtentX = 2355
_ExtentY = 873
_Version = 393216
LargeChange = 1
Min = 1
Max = 30
SelStart = 1
Value = 1
End
Begin VB.Label Label18
Caption = "Grad"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3840
TabIndex = 63
Top = 1440
Width = 375
End
Begin VB.Label Label17
Caption = "m"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3840
TabIndex = 62
Top = 360
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Elevation
Alignment = 1 'Rechts
Caption = "Elevation"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
```

```

Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 375
Left = 120
TabIndex = 59
Top = 1440
Width = 1215
End
Begin VB.Label Label_Höhe
Alignment = 1 'Rechts
Caption = "Höhe über n.N."
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 375
Left = 240
TabIndex = 58
Top = 360
Width = 1215
End
End
Begin MSComDlg.CommonDialog CommonDialog1
Left = 8520
Top = 720
_ExtentX = 847
_ExtentY = 847
_Version = 393216
DefaultExt = ".dat"
Filter = "Text (*.TXT)|*.TXT|alle(*.*)|*.*|Daten(*.dat)|*.dat"
FilterIndex = 1
End
Begin VB.CommandButton SAVE
Caption = "Speichern"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 615
Left = 5880
Picture = "Entfernungskorrektur_nach_Marini_und_Murray.frx":0442
Style = 1 'Grafisch
TabIndex = 53
Top = 8520
Width = 1335
End
Begin MSCommLib.MSComm MSComm1
Left = 8520
Top = 1320
_ExtentX = 1005
_ExtentY = 1005
_Version = 393216
DTREnable = -1 'True
End
Begin VB.CommandButton zu
Caption = "&Trennen"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 375
Left = 240
Style = 1 'Grafisch
TabIndex = 52

```

```
Top = 8880
Width = 1335
End
Begin VB.CommandButton auf
Caption = "Verbinden"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 375
Left = 240
Picture = "Entfernungskorrektur_nach_Marini_und_Murray.frx":07F8
TabIndex = 51
Top = 8400
Width = 1335
End
Begin VB.CommandButton ende
Caption = "&Beenden"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 615
Left = 7320
Picture = "Entfernungskorrektur_nach_Marini_und_Murray.frx":0B02
Style = 1 'Grafisch
TabIndex = 50
Top = 8520
Width = 1335
End
Begin VB.PictureBox Pic_Druck
BackColor = &H00FFFFFF&
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 1935
Left = 3600
ScaleHeight = 1875
ScaleWidth = 4875
TabIndex = 7
Top = 4200
Width = 4935
Begin VB.Label Label_Druck_Y_800
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "800"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 38
Top = 1425
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_Y_850
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "850"
BeginProperty Font
```

```
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 37
Top = 1245
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_Y_900
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "900"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 36
Top = 1035
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_Y_950
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "950"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 35
Top = 825
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_Y_1000
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "1000"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 34
Top = 630
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_Y_1050
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "1050"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
```

```
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 33
Top = 435
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_Y_1100
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "1100"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 32
Top = 240
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_0
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-60"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 360
TabIndex = 31
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_10
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-50"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 960
TabIndex = 30
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_20
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-40"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 1680
TabIndex = 29
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_30
BackStyle = 0 'Transparent
```

```
Caption = "-30"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 2400
TabIndex = 28
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_40
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-20"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3120
TabIndex = 27
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_50
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-10"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3840
TabIndex = 26
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Druck_X_60
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "0"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 4560
TabIndex = 25
Top = 1560
Width = 375
End
End
Begin VB.PictureBox Pic_Feuchte
BackColor = &H00FFFFFF&
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
```

```
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 1935
Left = 3600
ScaleHeight = 1875
ScaleWidth = 4875
TabIndex = 6
Top = 2160
Width = 4935
Begin VB.Label Label_Feuchte_Y_0
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "0"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 120
TabIndex = 43
Top = 1425
Width = 135
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_Y_25
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "25"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 42
Top = 1125
Width = 255
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_Y_50
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "50"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 41
Top = 825
Width = 255
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_Y_75
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "75"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 40
Top = 525
Width = 255
```

```
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_Y_100
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "100"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 39
Top = 225
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_0
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-60"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 360
TabIndex = 24
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_10
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-50"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 960
TabIndex = 23
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_20
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-40"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 1680
TabIndex = 22
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_30
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-30"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
```

```
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 2400
TabIndex = 21
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_40
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-20"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3120
TabIndex = 20
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_50
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-10"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3840
TabIndex = 19
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Feuchte_60
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "0"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 4560
TabIndex = 18
Top = 1560
Width = 375
End
End
Begin VB.PictureBox Pic_Temp
BackColor = &H00FFFFFF&
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 1935
Left = 3600
ScaleHeight = 1875
```

```
ScaleWidth = 4875
TabIndex = 5
Top = 120
Width = 4935
Begin VB.Label Label_Temp_Y_30
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "30"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 48
Top = 240
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_Y_25
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "25"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 47
Top = 540
Width = 255
End
Begin VB.Label Label_Temp_Y_20
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "20"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 46
Top = 840
Width = 255
End
Begin VB.Label Label_Temp_Y_15
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "15"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 45
Top = 1140
Width = 255
End
Begin VB.Label Label_Temp_Y_10
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "10"
BeginProperty Font
```

```
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 0
TabIndex = 44
Top = 1440
Width = 255
End
Begin VB.Label Label_Temp_60
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "0"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 4560
TabIndex = 17
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_50
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-10"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3840
TabIndex = 16
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_40
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-20"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 3120
TabIndex = 15
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_30
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-30"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
```

```
Height = 255
Left = 2400
TabIndex = 14
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_20
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-40"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 1680
TabIndex = 13
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_10
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-50"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 960
TabIndex = 12
Top = 1560
Width = 375
End
Begin VB.Label Label_Temp_0
BackStyle = 0 'Transparent
Caption = "-60"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 360
TabIndex = 11
Top = 1560
Width = 375
End
End
Begin VB.Timer Timer1
Left = 5520
Top = 480
End
Begin VB.CommandButton Stopknopf
Caption = "Stop"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 495
Left = 3600
TabIndex = 4
Top = 8640
```

```
Width = 1215
End
Begin VB.TextBox Text3
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 285
Left = 1680
TabIndex = 3
Top = 5040
Width = 735
End
Begin VB.TextBox Text2
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 285
Left = 1680
TabIndex = 2
Top = 3000
Width = 735
End
Begin VB.TextBox Text1
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 285
Left = 1680
TabIndex = 1
Top = 840
Width = 735
End
Begin VB.CommandButton Start
Caption = "Start"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 495
Left = 2280
TabIndex = 0
Top = 8640
Width = 1215
End
Begin VB.Frame Frame1
Caption = "Aktion"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 855
Left = 2160
```

```
TabIndex = 49
Top = 8400
Width = 2775
End
Begin VB.Label Label11
Alignment = 1 'Rechts
Caption = "Messwert"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 600
TabIndex = 56
Top = 5040
Width = 855
End
Begin VB.Label Label10
Alignment = 1 'Rechts
Caption = "Messwert"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 600
TabIndex = 55
Top = 3000
Width = 855
End
Begin VB.Label Label9
Alignment = 1 'Rechts
Caption = "Messwert"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 600
TabIndex = 54
Top = 840
Width = 855
End
Begin VB.Label Label3
Caption = "Luftdruck [hPa]"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 1440
TabIndex = 10
Top = 4560
Width = 1575
End
Begin VB.Label Label2
Caption = "Luftfeuchte [%]"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
```

```

Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 1440
TabIndex = 9
Top = 2520
Width = 1575
End
Begin VB.Label Label1
Caption = "Temperatur [°C]"
BeginProperty Font
Name = "MS Sans Serif"
Size = 8.25
Charset = 0
Weight = 400
Underline = 0 'False
Italic = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
Height = 255
Left = 1440
TabIndex = 8
Top = 360
Width = 1575
End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
' Kalibrier - Daten
Private druck_kalib(1 To 255) As Integer
Private temp_kalib(1 To 255) As Integer
Private feuchte_kalib(1 To 255) As Integer
' gespeicherte Werte
Private druck(0 To 10000) As Integer
Private temp(0 To 10000) As Integer
Private feuchte(0 To 10000) As Integer
Private Uhrzeit(0 To 10000) As String
' Hilfsvariablen
Private empf As String * 4
Private i As Integer
Private j As Integer
Private anz_werte As Integer
Private Entfernungskorrektur As Double
Private Höhe As Integer
Private Elevation As Double
Private Korrektur(0 To 10000) As Double
Private Elevation_Array(0 To 10000) As Integer
Private Höhe_Array(0 To 10000) As Integer
Private Sub auf_Click()
' COM2 einstellen
MSComm1.CommPort = 1
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.PortOpen = True
MSComm1.InBufferCount = 0
MSComm1.OutBufferCount = 0
MSComm1.RThreshold = 4
MSComm1.InputLen = 4
auf.Enabled = False 'Nach Betätigung "Verbinden"-Knopf deaktivieren
zu.Enabled = True '"Trennen-Knopf" aktivieren
Start.Enabled = True '"Einlesen-Knopf" aktivieren
End Sub
Private Sub ende_Click()
End
End Sub
Private Sub Form_load()
zu.Enabled = False 'Starteinstellung: "Trennen-Knopf" deaktiviert
Start.Enabled = False 'Starteinstellung: "Einlesen-Knopf" deaktiviert
'Timer1.Enabled = False 'Timer ausgeschaltet
Stopknopf.Enabled = False
j = 300 'Anfangswert in X-Richtung zur grafischen Ausgabe
Pic_Temp.AutoRedraw = True
Pic_Feuchte.AutoRedraw = True
Pic_Druck.AutoRedraw = True

```

```

' Kalibrierdaten laden und in Arrays schreiben
Dim var As String
Open "Tables\BARO.TAB" For Input As #1
Open "Tables\kty10.tab" For Input As #2
Open "Tables\hyg.tab" For Input As #3
For i = 1 To 255
Line Input #1, var: druck_kalib(i) = Val(var)
Line Input #2, var: temp_kalib(i) = Val(var)
Line Input #3, var: feuchte_kalib(i) = Val(var)
Next i
Close #1: Close #2: Close #3
Pic_Druck.Cls: Pic_Feuchte.Cls: Pic_Temp.Cls 'löschen der Grafiken
'Abszisse Druck
Pic_Druck.Line (300 + 100, 1500)-(4500 + 100, 1500), QBColor(0)
'Ordinate Druck
Pic_Druck.Line (300 + 100, 1500)-(300 + 100, 300), QBColor(0)
'Abszisse Temp
Pic_Temp.Line (300 + 100, 1500)-(4500 + 100, 1500), QBColor(0)
'Ordinate Temp
Pic_Temp.Line (300 + 100, 1500)-(300 + 100, 300), QBColor(0)
'Abszisse Feuchte
Pic_Feuchte.Line (300 + 100, 1500)-(4500 + 100, 1500), QBColor(0)
'Ordinate Feuchte
Pic_Feuchte.Line (300 + 100, 1500)-(300 + 100, 300), QBColor(0)
For m = 700 To 4200 Step 700 'Senkrechte Linien
Pic_Druck.Line (300 + m + 100, 1500)-(300 + m + 100, 300), QBColor(8)
Pic_Temp.Line (300 + m + 100, 1500)-(300 + m + 100, 300), QBColor(8)
Pic_Feuchte.Line (300 + m + 100, 1500)-(300 + m + 100, 300), QBColor(8)
Next m
For m = 200 To 1200 Step 200
Pic_Druck.Line (300 + 100, 1500 - m)-(4500 + 100, 1500 - m), QBColor(8)
Next m
For m = 300 To 1200 Step 300
Pic_Feuchte.Line (300 + 100, 1500 - m)-(4500 + 100, 1500 - m), QBColor(8)
Pic_Temp.Line (300 + 100, 1500 - m)-(4500 + 100, 1500 - m), QBColor(8)
Next m
Label_Temp_0.Caption = Label_Temp_0.Caption + 60
Label_Temp_10.Caption = Label_Temp_10.Caption + 60
Label_Temp_20.Caption = Label_Temp_20.Caption + 60
Label_Temp_30.Caption = Label_Temp_30.Caption + 60
Label_Temp_40.Caption = Label_Temp_40.Caption + 60
Label_Temp_50.Caption = Label_Temp_50.Caption + 60
Label_Temp_60.Caption = Label_Temp_60.Caption + 60
Label_Feuchte_0.Caption = Label_Feuchte_0.Caption + 60
Label_Feuchte_10.Caption = Label_Feuchte_10.Caption + 60
Label_Feuchte_20.Caption = Label_Feuchte_20.Caption + 60
Label_Feuchte_30.Caption = Label_Feuchte_30.Caption + 60
Label_Feuchte_40.Caption = Label_Feuchte_40.Caption + 60
Label_Feuchte_50.Caption = Label_Feuchte_50.Caption + 60
Label_Feuchte_60.Caption = Label_Feuchte_60.Caption + 60
Label_Druck_X_0.Caption = Label_Druck_X_0.Caption + 60
Label_Druck_X_10.Caption = Label_Druck_X_10.Caption + 60
Label_Druck_X_20.Caption = Label_Druck_X_20.Caption + 60
Label_Druck_X_30.Caption = Label_Druck_X_30.Caption + 60
Label_Druck_X_40.Caption = Label_Druck_X_40.Caption + 60
Label_Druck_X_50.Caption = Label_Druck_X_50.Caption + 60
Label_Druck_X_60.Caption = Label_Druck_X_60.Caption + 60
End Sub
Private Sub SAVE_Click()
'### Speichern der gesamten Messwerte ###
CommonDialog1.ShowSave ' Standard "Speichern unter"-Dialog aufrufen
aus = FreeFile ' Automatische Dateinummerngenerierung
' Datei zum schreiben öffnen
Open CommonDialog1.FileName For Output As #aus
' Kopfzeilen der Datei schreiben. [Chr(9) = TAB, Chr(13) = CR]
Print #aus, "AUSGABEDATEI des Programms 'Entfernungskorrektur_nach_Marini_und_Murray.exe'"
Print #aus, "© M Kremer, 22. Juni 2004"
Print #aus, Chr(13)
Print #aus, "Uhrzeit" & Chr(9) & " Druck [mbar]" & Chr(9) & "Temperatur [°C]" & Chr(9)
& " Luftfeuchte [%]" & "Elevation [Grad]" & " Höhe [m]" & "Korrekturfaktor [m]"
Print #aus, "-----"
' Schleife zum schreiben der Arrays in die Datei
For zahl = 1 To j - 1
Print #aus, Uhrzeit(zahl) & Chr(9) & druck(zahl) & Chr(9) & Chr(9) & temp(zahl)
& Chr(9) & Chr(9) & feuchte(zahl) & Chr(9) & Chr(9) & Elevation_Array(zahl)
& Chr(9) & Chr(9) & Höhe_Array(zahl) & Chr(9) & Chr(9) & Round(Korrektur(zahl), 4)
Next zahl
Close #aus ' Datei schließen
End Sub

```

```

Private Sub Start_Click()
Start.Enabled = False
Stopknopf.Enabled = True
Timer1.Enabled = True
' Timer einstellen
Timer1.Interval = 100
End Sub
Private Sub MSComml_OnComm()
Select Case MSComml.CommEvent
Case comEvReceive
empf = MSComml.Input
anz_werte = anz_werte + 1
If anz_werte > 9999 Then
MsgBox ("Maximale Anzahl der Messwerte erreicht.")
Stopknopf_Click
End If
' Zeichen in Werte umwandeln, speichern, darstellen
druck(anz_werte) = druck_kalib(Asc(Mid(empf, 1, 1)))
temp(anz_werte) = temp_kalib(Asc(Mid(empf, 2, 1))) / 10
feuchte(anz_werte) = feuchte_kalib(Asc(Mid(empf, 3, 1)))
Uhrzeit(anz_werte) = Now
Text1.Text = temp(anz_werte) 'Anzeige der aktuellen Messwrte
Text2.Text = feuchte(anz_werte) ' - || -
Text3.Text = druck(anz_werte) ' - || -
SF_Druck = 4 'Faktoren zur Skalierung
SF_Feuchte = 12 ' - || -
SF_Temp = 60 ' - || -
Pic_Druck.Line (j + 100, 1500 - SF_Druck * (druck(anz_werte) - 1) - 800)
-(j + 7 + 100, 1500 - SF_Druck * (druck(anz_werte) - 800)), QBColor(12)
Pic_Feuchte.Line (j + 100, 1500 - SF_Feuchte * feuchte(anz_werte) - 1)
-(j + 7 + 100, 1500 - SF_Feuchte * feuchte(anz_werte)), QBColor(9)
Pic_Temp.Line (j + 100, 1500 - SF_Temp * (temp(anz_werte) - 1) - 10)
-(j + 7 + 100, 1500 - SF_Temp * (temp(anz_werte) - 10)), QBColor(2)
j = j + 7
PI = 3.141
Slider_Höhe.Enabled = True
Text_Höhe.Enabled = True
Höhe = Slider_Höhe.Value
If Check_Trebur.Value = 1 Then
Höhe = 103
Slider_Höhe.Enabled = False
Text_Höhe.Enabled = False
Slider_Höhe.Value = 103
End If
Elevation = Slider_Elevation.Value * PI / 180
Entfernungskorrektur = ((2.238 + (0.0414 * druck(anz_werte)
/ (temp(anz_werte) + 273)) - 0.238 * Höhe) / (Sin(Elevation)
+ (10 ^ -3 / Tan(Elevation))))
Korrektur(anz_werte) = Entfernungskorrektur
Elevation_Array(anz_werte) = Slider_Elevation.Value
Höhe_Array(anz_werte) = Slider_Höhe.Value
Text_Höhe.Text = Höhe
Text_Elevation.Text = Elevation * 180 / PI
Text_Entfernungskorrektur.Text = Round(Entfernungskorrektur, 3)
'Prüfen auf Messwerteüberlauf
If j > 4500 Then
Form_load
End If
End Select
End Sub
Private Sub Stopknopf_Click()
Timer1.Enabled = False
MSComml.Output = "e"
End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
MSComml.Output = "s"
Stopknopf.Enabled = True
End Sub
Private Sub zu_Click()
Timer1.Enabled = False 'Zähler anhalten
Start.Enabled = False 'Knopf "Einlesen" deaktivieren
Stopknopf.Enabled = False 'Knopf "Stop" deaktivieren
MSComml.PortOpen = False 'Com-Verbindung Trennen
zu.Enabled = False '"Trennen-Knopf" deaktivieren
auf.Enabled = True '"Verbinden-Knopf" aktivieren
End Sub

```

F.2 Schwerpunktberechnung

```

VERSION 5.00
Object = "{F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0"; "comdlg32.ocx"
Object = "{831FDD16-0C5C-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0"; "MSCOMCTL.OCX"
Begin VB.Form Form1
    Caption           = "Schwerpunktberechnung"
    ClientHeight     = 10590
    ClientLeft       = 60
    ClientTop        = 450
    ClientWidth      = 14175
    Icon             = "Form1.frx":0000
    LinkTopic        = "Form1"
    Picture          = "Form1.frx":0442
    ScaleHeight      = 10590
    ScaleWidth       = 14175
    StartUpPosition = 1 'Fenstermitte
    Begin VB.Frame Frame6
        Caption       = "Detektoranschluß"
        BeginProperty Font
            Name       = "MS Sans Serif"
            Size       = 8.25
            Charset    = 0
            Weight     = 700
            Underline  = 0 'False
            Italic     = 0 'False
            Strikethrough = 0 'False
        EndProperty
        Height        = 1095
        Left          = 10200
        TabIndex      = 28
        Top           = 3120
        Width         = 3735
        Begin VB.OptionButton Option2
            Caption   = "Kanal 2"
            Height    = 375
            Left      = 2160
            TabIndex  = 30
            Top       = 600
            Width     = 1335
        End
        Begin VB.OptionButton Option1
            Caption   = "Kanal 1"
            Height    = 375
            Left      = 2160
            TabIndex  = 29
            Top       = 240
            Width     = 1335
        End
        Begin VB.Label Label4
            Caption   = "Detektorsignal auf "
            Height    = 375
            Left      = 480
            TabIndex  = 31
            Top       = 360
            Width     = 1455
        End
    End
End
Begin VB.Frame Frame2
    Caption       = "Filterfunktion"
    BeginProperty Font
        Name       = "MS Sans Serif"
        Size       = 8.25
        Charset    = 0
        Weight     = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height        = 1695
    Left          = 10200
    TabIndex      = 23
    Top           = 4320
    Width         = 3735
    Begin VB.TextBox Text_Filter
        Height     = 285
        Left       = 2760
        TabIndex   = 26
        Text       = "Text1"
        Top        = 360
    End
End

```

```

        Width           = 735
    End
    Begin VB.CommandButton Filter
        BackColor       = &H00FF8080&
        Caption         = "Anwenden"
        Height          = 495
        Left            = 1080
        Style           = 1 'Grafisch
        TabIndex       = 25
        Top            = 960
        Width          = 1575
    End
    Begin MSComctlLib.Slider Slider_Filter
        Height          = 375
        Left           = 1080
        TabIndex       = 24
        Top           = 360
        Width          = 1575
        _ExtentX       = 2778
        _ExtentY       = 661
        _Version       = 393216
        Max            = 100
    End
    Begin VB.Label Label3
        Caption         = "% vom Maximalwert"
        Height          = 615
        Left           = 120
        TabIndex       = 27
        Top           = 360
        Width          = 1095
    End
End
Begin VB.Frame Frame5
    Caption          = "Programm"
    BeginProperty Font
        Name          = "MS Sans Serif"
        Size          = 8.25
        Charset       = 0
        Weight        = 700
        Underline     = 0 'False
        Italic        = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height          = 1455
    Left           = 10920
    TabIndex       = 18
    Top           = 9000
    Width          = 2295
    Begin VB.CommandButton Beenden
        BackColor     = &H00FF8080&
        Caption       = "&Beenden"
        Height       = 615
        Left        = 480
        Picture     = "Form1.frx":24D4B
        Style       = 1 'Grafisch
        TabIndex   = 19
        Top        = 480
        Width     = 1335
    End
End
Begin VB.Frame Frame4
    Caption          = "Einstellung der Integrationsgrenzen"
    BeginProperty Font
        Name          = "MS Sans Serif"
        Size          = 8.25
        Charset       = 0
        Weight        = 700
        Underline     = 0 'False
        Italic        = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height          = 2895
    Left           = 10200
    TabIndex       = 9
    Top           = 120
    Width          = 3735
    Begin VB.CheckBox Check1
        Caption       = "auf Standarteinstellungen zurücksetzen"
        BeginProperty Font
            Name          = "MS Sans Serif"

```

```

        Size           = 8.25
        Charset        = 0
        Weight         = 700
        Underline      = 0 'False
        Italic         = 0 'False
        Strikethrough  = 0 'False
    EndProperty
    Height            = 495
    Left              = 720
    TabIndex          = 20
    Top               = 2160
    Width             = 2535
End
Begin VB.Frame Frame1
    Caption           = "Impuls 1"
    BeginProperty Font
        Name           = "MS Sans Serif"
        Size           = 8.25
        Charset        = 0
        Weight         = 700
        Underline      = 0 'False
        Italic         = 0 'False
        Strikethrough  = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor         = &H00FF0000&
    Height            = 1575
    Left              = 240
    TabIndex          = 10
    Top               = 480
    Width             = 3255
    Begin VB.TextBox Text_re_Gre
        Height         = 285
        Left           = 2280
        TabIndex       = 12
        Text           = "Text2"
        Top            = 960
        Width          = 735
    End
    Begin VB.TextBox Text_li_Gre
        Height         = 285
        Left           = 2280
        TabIndex       = 11
        Text           = "Text2"
        Top            = 360
        Width          = 735
    End
    Begin MSComctlLib.Slider Slider_links
        Height         = 375
        Left           = 1320
        TabIndex       = 13
        Top            = 360
        Width          = 975
        _ExtentX       = 1720
        _ExtentY       = 661
        _Version       = 393216
        Max            = 2499
        SelStart       = 200
        Value          = 200
    End
    Begin MSComctlLib.Slider Slider_rechts
        Height         = 375
        Left           = 1320
        TabIndex       = 14
        Top            = 960
        Width          = 975
        _ExtentX       = 1720
        _ExtentY       = 661
        _Version       = 393216
        Max            = 2499
        SelStart       = 800
        Value          = 800
    End
    Begin VB.Label Label2
        Alignment      = 1 'Rechts
        Caption         = "rechte Grenze"
        Height         = 375
        Left           = 120
        TabIndex       = 16
        Top            = 960
        Width          = 1095
    End

```

```

End
Begin VB.Label Label1
    Alignment      = 1 'Rechts
    Caption        = "linke Grenze"
    Height         = 375
    Left           = 240
    TabIndex       = 15
    Top            = 360
    Width          = 975
End
End
End
Begin VB.Frame Frame3
    Caption        = "Auswertung"
    BeginProperty Font
        Name        = "MS Sans Serif"
        Size        = 8.25
        Charset     = 0
        Weight      = 700
        Underline   = 0 'False
        Italic      = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height        = 2775
    Left          = 10200
    TabIndex      = 6
    Top           = 6120
    Width         = 3735
    Begin VB.CommandButton Schwerpunktberechnung
        BackColor    = &H00FF8080&
        Caption      = "Schwerpunktberechnung"
        BeginProperty Font
            Name        = "MS Sans Serif"
            Size        = 8.25
            Charset     = 0
            Weight      = 700
            Underline   = 0 'False
            Italic      = 0 'False
            Strikethrough = 0 'False
        EndProperty
        Height        = 855
        Left          = 720
        Picture       = "Form1.frx":252CD
        Style         = 1 'Grafisch
        TabIndex      = 7
        Top           = 360
        Width         = 2295
    End
    End
    Begin VB.Label Label8
        Alignment    = 2 'Zentriert
        BackColor    = &H00000000&
        Caption      = "-"
        BeginProperty Font
            Name        = "Sydnie"
            Size        = 14.25
            Charset     = 0
            Weight      = 700
            Underline   = 0 'False
            Italic      = -1 'True
            Strikethrough = 0 'False
        EndProperty
        ForeColor    = &H0000FF00&
        Height       = 255
        Left         = 1680
        TabIndex     = 37
        Top          = 2280
        Width        = 375
    End
    End
    Begin VB.Label Label6
        Alignment    = 2 'Zentriert
        BackColor    = &H00000000&
        Caption      = "+"
        BeginProperty Font
            Name        = "Sydnie"
            Size        = 14.25
            Charset     = 0
            Weight      = 700
            Underline   = 0 'False
            Italic      = -1 'True
            Strikethrough = 0 'False
        EndProperty
    End

```

```

EndProperty
ForeColor      = &H0000FF00&
Height        = 255
Left          = 1680
TabIndex      = 36
Top           = 2040
Width         = 375
End
Begin VB.Label Label7
Alignment     = 2 'Zentriert
BackColor     = &H00000000&
Caption       = "-"
BeginProperty Font
    Name       = "Sydney"
    Size       = 14.25
    Charset    = 0
    Weight     = 700
    Underline  = 0 'False
    Italic     = -1 'True
    Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor     = &H0000FF00&
Height       = 255
Left         = 1680
TabIndex     = 35
Top          = 1680
Width        = 375
End
Begin VB.Label Ergebnis_m_Fehler
Alignment     = 2 'Zentriert
BackColor     = &H00000000&
Caption       = "Fehler"
BeginProperty Font
    Name       = "Sydney"
    Size       = 14.25
    Charset    = 0
    Weight     = 700
    Underline  = 0 'False
    Italic     = -1 'True
    Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor     = &H0000FF00&
Height       = 495
Left         = 2040
TabIndex     = 34
Top          = 2040
Width        = 1095
End
Begin VB.Label Ergebnis_sek_Fehler
Alignment     = 2 'Zentriert
BackColor     = &H00000000&
Caption       = "Fehler"
BeginProperty Font
    Name       = "Sydney"
    Size       = 14.25
    Charset    = 0
    Weight     = 700
    Underline  = 0 'False
    Italic     = -1 'True
    Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor     = &H0000FF00&
Height       = 495
Left         = 2040
TabIndex     = 33
Top          = 1440
Width        = 1095
End
Begin VB.Label Label5
Alignment     = 2 'Zentriert
BackColor     = &H00000000&
Caption       = "+"
BeginProperty Font
    Name       = "Sydney"
    Size       = 14.25
    Charset    = 0
    Weight     = 700
    Underline  = 0 'False
    Italic     = -1 'True
    Strikethrough = 0 'False

```

```

EndProperty
ForeColor      =   &H0000FF00&
Height        =   255
Left          =   1680
TabIndex     =   32
Top          =   1440
Width        =   375
End
Begin VB.Label Einheit_m
Alignment     =   2   'Zentriert
BackColor    =   &H00000000&
Caption      =   "m"
BeginProperty Font
Name         =   "Sydney"
Size        =   14.25
Charset     =   0
Weight     =   700
Underline   =   0   'False
Italic     =   -1   'True
Strikethrough = 0   'False
EndProperty
ForeColor    =   &H0000FF00&
Height      =   495
Left        =   3120
TabIndex   =   22
Top        =   2040
Width      =   495
End
Begin VB.Label Ergebnis_m
Alignment     =   2   'Zentriert
BackColor    =   &H00000000&
Caption      =   "Ergebnis"
BeginProperty Font
Name         =   "Sydney"
Size        =   14.25
Charset     =   0
Weight     =   700
Underline   =   0   'False
Italic     =   -1   'True
Strikethrough = 0   'False
EndProperty
ForeColor    =   &H0000FF00&
Height      =   495
Left        =   120
TabIndex   =   21
Top        =   2040
Width      =   1575
End
Begin VB.Label Einheit_sek
Alignment     =   2   'Zentriert
BackColor    =   &H00000000&
Caption      =   "µs"
BeginProperty Font
Name         =   "Sydney"
Size        =   14.25
Charset     =   0
Weight     =   700
Underline   =   0   'False
Italic     =   -1   'True
Strikethrough = 0   'False
EndProperty
ForeColor    =   &H0000FF00&
Height      =   495
Left        =   3120
TabIndex   =   17
Top        =   1440
Width      =   495
End
Begin VB.Label Ergebnis_sek
Alignment     =   2   'Zentriert
BackColor    =   &H00000000&
Caption      =   "Ergebnis"
BeginProperty Font
Name         =   "Sydney"
Size        =   14.25
Charset     =   0
Weight     =   700
Underline   =   0   'False
Italic     =   -1   'True
Strikethrough = 0   'False

```

```

        EndProperty
        ForeColor      =   &H0000FF00&
        Height         =   495
        Left           =   120
        TabIndex       =   8
        Top            =   1440
        Width          =   1575
    End
End
Begin VB.Timer Timer1
    Interval          =   100
    Left              =   3120
    Top               =   4800
End
Begin VB.Frame FrameL
    Caption           =   "langer Weg"
    BeginProperty Font
        Name           =   "MS Sans Serif"
        Size           =   8.25
        Charset        =   0
        Weight         =   700
        Underline      =   0 'False
        Italic         =   0 'False
        Strikethrough  =   0 'False
    EndProperty
    ForeColor         =   &H00000000&
    Height            =   5055
    Left              =   240
    TabIndex         =   3
    Top               =   5400
    Width            =   9735
    Begin VB.PictureBox PictureL
        BackColor      =   &H00000000&
        Height         =   4455
        Left           =   240
        ScaleHeight    =   4395
        ScaleWidth     =   7875
        TabIndex       =   5
        Top            =   360
        Width          =   7935
    End
    Begin VB.CommandButton OpenL
        BackColor      =   &H00FF8080&
        Caption         =   "Öffnen"
        Height         =   615
        Left           =   8400
        Picture         =   "Form1.frx":260A7
        Style          =   1 'Grafisch
        TabIndex       =   4
        Top            =   4080
        Width          =   1095
    End
End
Begin VB.Frame FrameS
    Caption           =   "kurzer Weg"
    BeginProperty Font
        Name           =   "MS Sans Serif"
        Size           =   8.25
        Charset        =   0
        Weight         =   700
        Underline      =   0 'False
        Italic         =   0 'False
        Strikethrough  =   0 'False
    EndProperty
    ForeColor         =   &H00000000&
    Height            =   5055
    Left              =   240
    TabIndex         =   0
    Top               =   120
    Width            =   9735
    Begin VB.CommandButton OpenS
        BackColor      =   &H00FF8080&
        Caption         =   "Öffnen"
        Height         =   615
        Left           =   8400
        Picture         =   "Form1.frx":265A9
        Style          =   1 'Grafisch
        TabIndex       =   2
        Top            =   4080
        Width          =   1095
    End
End

```

```

End
Begin VB.PictureBox PictureS
    BackColor      = &H00000000&
    Height         = 4455
    Left           = 240
    ScaleHeight    = 4395
    ScaleWidth     = 7875
    TabIndex       = 1
    Top            = 360
    Width          = 7935
End
End
Begin MSComDlg.CommonDialog CommonDialog1
    Left           = 2280
    Top            = 4800
    _ExtentX       = 847
    _ExtentY       = 847
    _Version       = 393216
End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Private FileNamesL(0 To 1000) As String
Private FileNamesS(0 To 1000) As String
Dim i As Integer
Dim test(0 To 1000) As FileOpenConstants
Dim FileNumberL As Integer
Dim FileNumberS As Integer
Dim anzahl_kurz As Integer
Dim anzahl_lang As Integer
Dim d1(1000) As Double
Dim d2(1000) As Double
Dim d3(1000) As Double
Dim d4(1000) As Double
Dim ilk_s1Z(0 To 1000) As Double
Dim ilk_s2Z(0 To 1000) As Double
Dim ilk_s1N(0 To 1000) As Double
Dim ilk_s2N(0 To 1000) As Double
Dim ill_s1Z(0 To 1000) As Double
Dim ill_s2Z(0 To 1000) As Double
Dim ill_s1N(0 To 1000) As Double
Dim ill_s2N(0 To 1000) As Double
Dim s As Double
Dim l As Double
'kleinster Messwert
Dim miniS_kurz As Double
Dim miniR_kurz As Double
Dim miniS_lang As Double
Dim miniR_lang As Double
'größter Messwert
Dim maxS_kurz As Double
Dim maxR_kurz As Double
Dim maxS_lang As Double
Dim maxR_lang As Double
'Messwerte
Private VS(4, 100, 2499) As Double
Private VL(4, 100, 2499) As Double
'zum Skalieren der PictureBoxen
Dim skala As Integer
'Variable für 95%-Vertrauensbereich
Dim te As Double
Private Sub Beenden_Click()
End
End Sub
Private Sub Filter_Click()
For i = 0 To anzahl_kurz - 1
'finden des Minimums
miniS_kurz = 1000
miniR_kurz = 1000
For k = 0 To 2499
    If VS(2, i, k) < miniS_kurz Then
        miniS_kurz = VS(2, i, k)
    End If
    If VS(4, i, k) < miniR_kurz Then
        miniR_kurz = VS(4, i, k)
    End If
End If
Next k

```

```

'eliminieren negativer Werte
For k = 0 To 2499
    VS(2, i, k) = VS(2, i, k) + Abs(miniS_kurz)
    VS(4, i, k) = VS(4, i, k) + Abs(miniR_kurz)
Next k
'finden des Maximums
maxS_kurz = -1000
maxR_kurz = -1000
For k = 0 To 2499
    If VS(2, i, k) > maxS_kurz Then
        maxS_kurz = VS(2, i, k)
    End If
    If VS(4, i, k) > maxR_kurz Then
        maxR_kurz = VS(4, i, k)
    End If
Next k
For k = 0 To 2499
    If VS(2, i, k) < Slider_Filter.Value / 100 * maxS_kurz Then
        VS(2, i, k) = 0
    End If
    If VS(4, i, k) < Slider_Filter.Value / 100 * maxR_kurz Then
        VS(4, i, k) = 0
    End If
Next k
Next i
For i = 0 To anzahl_lang - 1
'finden des Minimums
miniS_lang = 1000
miniR_lang = 1000
For k = 0 To 2499
    If VL(2, i, k) < miniS_lang Then
        miniS_lang = VL(2, i, k)
    End If
    If VL(4, i, k) < miniR_lang Then
        miniR_lang = VL(4, i, k)
    End If
Next k
'eliminieren negativer Werte
For k = 0 To 2499
    VL(2, i, k) = VL(2, i, k) + Abs(miniS_lang)
    VL(4, i, k) = VL(4, i, k) + Abs(miniR_lang)
Next k
'finden des Maximums
maxS_lang = -1000
maxR_lang = -1000
For k = 0 To 2499
    If VL(2, i, k) > maxS_lang Then
        maxS_lang = VL(2, i, k)
    End If
    If VL(4, i, k) > maxR_lang Then
        maxR_lang = VL(4, i, k)
    End If
Next k
For k = 0 To 2499
    If VL(2, i, k) < Slider_Filter.Value / 100 * maxS_lang Then
        VL(2, i, k) = 0
    End If
    If VL(4, i, k) < Slider_Filter.Value / 100 * maxR_lang Then
        VL(4, i, k) = 0
    End If
Next k
Next i
skala = 4000
End Sub
Private Sub OpenL_Click()
Dim PfadL As String
Dim daten As String
i = 0
CommonDialog1.DialogTitle = "Öffnen der Messdaten der langen Strecke"
CommonDialog1.ShowOpen
'#####
FilesL = CommonDialog1.FileName
trennerL = InStr(FilesL, Chr(0))
If Len(CommonDialog1.FileName) < 5 Then
    GoTo noFileL
End If
i = 0
If trennerL = 0 Then
    FileNamesL(0) = CommonDialog1.FileName
    i = 1

```

```

Else
  PfadL = Mid(CVar(FilesL), 1, trennerL - 1)
  FilesL = Mid(CVar(FilesL), trennerL + 1, Len(FilesL))
  i = 0
  While trennerL > 0
    trennerL = InStr(FilesL, Chr(0))
    If trennerL > 0 Then
      FileNamesL(i) = PfadL + "\" + Mid(CVar(FilesL), 1, trennerL - 1)
      FilesL = Mid(CVar(FilesL), trennerL + 1, Len(FilesL))
    Else
      FileNamesL(i) = PfadL + "\" + Mid(CVar(FilesL), 1, Len(FilesL))
    End If
    i = i + 1
  Wend
End If
'#####
For k = 0 To i - 1
  FileNumberL = k + 1
  Open FileNamesL(k) For Input As #FileNumberL
  Input #FileNumberL, Header1L, Header2L, Header3L, Header4L
  For j = 0 To 2499
    Input #FileNumberL, VL(1, k, j), VL(2, k, j), VL(3, k, j), VL(4, k, j)
  Next j
  Close #FileNumberL
  For j = 0 To 2499
    PictureL.PSet (100 + 3 * j, 2000 - VL(2, k, j) * 30), QBColor(14)
    PictureL.PSet (100 + 3 * j, 2000 - VL(4, k, j) * 1000), QBColor(12)
  Next j
Next k
anzahl_lang = i
noFileL:
End Sub
Private Sub OpenS_Click()
Dim PfadS As String
Dim daten As String
i = 0
CommonDialog1.DialogTitle = "Öffnen der Messdaten der kurzen Strecke"
CommonDialog1.ShowOpen
'#####
FilesS = CommonDialog1.FileName
trennerS = InStr(FilesS, Chr(0))
If Len(CommonDialog1.FileName) < 5 Then
  GoTo noFileS
End If
If trennerS = 0 Then
  FileNamesS(0) = CommonDialog1.FileName
  i = 1
Else
  PfadS = Mid(CVar(FilesS), 1, trennerS - 1)
  FilesS = Mid(CVar(FilesS), trennerS + 1, Len(FilesS))
  i = 0
  While trennerS > 0
    trennerS = InStr(FilesS, Chr(0))
    If trennerS > 0 Then
      FileNamesS(i) = PfadS + "\" + Mid(CVar(FilesS), 1, trennerS - 1)
      FilesS = Mid(CVar(FilesS), trennerS + 1, Len(FilesS))
    Else
      FileNamesS(i) = PfadS + "\" + Mid(CVar(FilesS), 1, Len(FilesS))
    End If
    i = i + 1
  Wend
End If
'#####
For k = 0 To i - 1
  FileNumberS = k + 1
  Open FileNamesS(k) For Input As #FileNumberS
  Input #FileNumberS, Header1S, Header2S, Header3S, Header4S
  For j = 0 To 2499
    Input #FileNumberS, VS(1, k, j), VS(2, k, j), VS(3, k, j), VS(4, k, j)
  Next j
  Close #FileNumberS
  For j = 0 To 2499
    Pictures.PSet (100 + 3 * j, 2000 - VS(2, k, j) * 30), QBColor(14)
    Pictures.PSet (100 + 3 * j, 2000 - VS(4, k, j) * 1000), QBColor(12)
  Next j
Next k
anzahl_kurz = i
noFileS:
End Sub
Private Sub Form_Load()

```

```

Timer1.Enabled = True
PictureS.AutoRedraw = True
PictureL.AutoRedraw = True
CommonDialog1.MaxFileSize = 30000
CommonDialog1.Flags = cdlOFNAllowMultiselect + cdlOFNExplorer + cdlOFNHideReadOnly
CommonDialog1.Filter = "csv-Dateien (*.csv)|*.csv|Text (*.txt)|*.txt"
Slider_links.Value = 0
Slider_rechts.Value = 2499
Slider_Filter.Value = 25
Option1.Value = True
skala = 2000
End Sub
Private Sub Schwerpunktberechnung_Click()
Nlu = Slider_links.Value
Nlo = Slider_rechts.Value
N2u = Slider_links.Value
N2o = Slider_rechts.Value
For k = 0 To 1000
    Ilk_slZ(k) = 0
    Ilk_s2Z(k) = 0
    Ilk_slN(k) = 0
    Ilk_s2N(k) = 0
    Ill_slZ(k) = 0
    Ill_s2Z(k) = 0
    Ill_slN(k) = 0
    Ill_s2N(k) = 0
Next k
'kurzer Weg; erster Impuls
For k = 0 To anzahl_kurz - 1
    For i = Nlu To Nlo
        Ilk_slZ(k) = Ilk_slZ(k) + ((VS(4, k, i)) * VS(1, k, i))
        Ilk_slN(k) = Ilk_slN(k) + (VS(4, k, i))
        Ilk_s2Z(k) = Ilk_s2Z(k) + ((VS(2, k, i)) * VS(1, k, i))
        Ilk_s2N(k) = Ilk_s2N(k) + (VS(2, k, i))
    Next i
Next k
For k = 0 To anzahl_kurz - 1
    M_K_1 = M_K_1 + ((Ilk_slZ(k) / Ilk_slN(k)) - (Ilk_s2Z(k) / Ilk_s2N(k)))
Next k
'langer Weg; erster Impuls
For k = 0 To anzahl_lang - 1
    For i = Nlu To Nlo
        Ill_slZ(k) = Ill_slZ(k) + ((VL(4, k, i)) * VS(1, k, i))
        Ill_slN(k) = Ill_slN(k) + (VL(4, k, i))
        Ill_s2Z(k) = Ill_s2Z(k) + ((VL(2, k, i)) * VS(1, k, i))
        Ill_s2N(k) = Ill_s2N(k) + (VL(2, k, i))
    Next i
Next k
For k = 0 To anzahl_lang - 1
    M_L_1 = M_L_1 + ((Ill_slZ(k) / Ill_slN(k)) - (Ill_s2Z(k) / Ill_s2N(k)))
Next k
diff = (M_L_1 / anzahl_lang) - (M_K_1 / anzahl_kurz)
If Option1.Value = True Then
    diff = -diff
End If
Ergebnis_sek.Caption = Round(diff * 1000000, 4)
Einheit_sek.Caption = "µs"
Ergebnis_m = Round(diff * 300000000, 2)
Einheit_m.Caption = "m"
'Fehler kurz
S_kurz = 0
For i = 0 To anzahl_kurz - 1
    S_kurz = S_kurz + (((Ilk_slZ(i) / Ilk_slN(i)) - (Ilk_s2Z(i) / Ilk_s2N(i))) - (M_K_1 / anzahl_kurz)) ^ 2
Next i
Stand_Abw_k = Sqr(Abs(S_kurz) / (anzahl_kurz - 1))
'Faktor für Vertrauensbereich bei 95%
'(Variable te wird initialisiert)
t (anzahl_kurz)
Delta_M_k = te * Stand_Abw_k / Sqr(anzahl_kurz)
'Fehler lang
S_lang = 0
For i = 0 To anzahl_lang - 1
    S_lang = S_lang + (((Ill_slZ(i) / Ill_slN(i)) - (Ill_s2Z(i) / Ill_s2N(i))) - (M_L_1 / anzahl_lang)) ^ 2
Next i
Stand_Abw_l = Sqr(Abs(S_lang) / (anzahl_lang - 1))
'Faktor für Vertrauensbereich bei 95%
'(Variable te wird initialisiert)
t (anzahl_lang)

```

```

Delta_M_1 = te * Stand_Abw_1 / Sqr(anzahl_lang)
'Gesamtfehler
Delta_t = Sqr(Delta_M_k ^ 2 + Delta_M_1 ^ 2)
Delta_m = Delta_t * 300000000
Ergebnis_sek_Fehler.Caption = Round(Delta_t * 1000000, 2)
Ergebnis_m_Fehler.Caption = Round(Delta_m, 2)
End Sub
Private Sub t(v)
  Select Case v
    Case 1 To 3
      te = 4.3
    Case 4
      te = 3.18
    Case 5
      te = 2.78
    Case 6
      te = 2.57
    Case 7
      te = 2.45
    Case 8
      te = 2.36
    Case 9
      te = 2.31
    Case 10 To 14
      te = 2.26
    Case 15 To 19
      te = 2.14
    Case 20 To 29
      te = 2.09
    Case 30 To 49
      te = 2.04
    Case 50 To 99
      te = 2.01
    Case 100 To 1000
      te = 1.98
    Case Else
      te = 1.96
  End Select
End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
PictureS.Cls
PictureL.Cls
  PictureS.Line (3 * x_1_li_ku + 100, 500)-(3 * x_1_li_ku + 100, 3500), QBColor(0)
  PictureS.Line (3 * x_1_re_ku + 100, 500)-(3 * x_1_re_ku + 100, 3500), QBColor(0)
  PictureS.Line (3 * x_2_li_ku + 100, 500)-(3 * x_2_li_ku + 100, 3500), QBColor(0)
  PictureS.Line (3 * x_2_re_ku + 100, 500)-(3 * x_2_re_ku + 100, 3500), QBColor(0)
x_1_li_ku = Slider_links.Value
x_1_re_ku = Slider_rechts.Value
Text_li_Gre = Slider_links.Value
Text_re_Gre = Slider_rechts.Value
  PictureS.Line (3 * x_1_li_ku + 100, 500)-(3 * x_1_li_ku + 100, 3500), QBColor(9)
  PictureS.Line (3 * x_1_re_ku + 100, 500)-(3 * x_1_re_ku + 100, 3500), QBColor(9)
  PictureL.Line (3 * x_1_li_la + 100, 500)-(3 * x_1_li_la + 100, 3500), QBColor(0)
  PictureL.Line (3 * x_1_re_la + 100, 500)-(3 * x_1_re_la + 100, 3500), QBColor(0)
  PictureL.Line (3 * x_2_li_la + 100, 500)-(3 * x_2_li_la + 100, 3500), QBColor(0)
  PictureL.Line (3 * x_2_re_la + 100, 500)-(3 * x_2_re_la + 100, 3500), QBColor(0)
x_1_li_la = Slider_links.Value
x_1_re_la = Slider_rechts.Value
  PictureL.Line (3 * x_1_li_la + 100, 500)-(3 * x_1_li_la + 100, 3500), QBColor(9)
  PictureL.Line (3 * x_1_re_la + 100, 500)-(3 * x_1_re_la + 100, 3500), QBColor(9)
  PictureS.Line (0, skala)-(10000, skala), QBColor(10)
  PictureL.Line (0, skala)-(10000, skala), QBColor(10)
  For i = 0 To 2499
    PictureS.PSet (100 + 3 * i, skala - VS(2, 0, i) * 100), QBColor(14)
    PictureS.PSet (100 + 3 * i, skala - VS(4, 0, i) * 50), QBColor(12)
    PictureL.PSet (100 + 3 * i, skala - VL(2, 0, i) * 100), QBColor(14)
    PictureL.PSet (100 + 3 * i, skala - VL(4, 0, i) * 50), QBColor(12)
  Next i
  If Check1.Value = 1 Then
    Slider_links.Value = 0
    Slider_rechts.Value = 2499
  End If
  Text_Filter.Text = Slider_Filter.Value
End Sub

```

Literaturverzeichnis

- [Bal82] L. Ballani. *Die Bestimmung geodätisch-geodynamischer Parameter mit Hilfe von Laserdistanzmessungen zum Mond*. Gerlands Beitr. Geophysik. Leipzig, 1982.
- [Bau97] Manfred Bauer. *Vermessung und Ortung mit Satelliten: NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. WICHMANN, Heidelberg, 1997.
- [BSMM99] Bronstein, Semendjajew, Musiol, and Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*, volume 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, Thun, 1999, 1999.
- [Coh04] Coherent. *Informationen über das Coherent-Lasersystem*. Coherent (Deutschland) GmbH. Dieselstraße 5b, 64807 Dieburg, 2004.
- [DHSS86] Reiner Dassing, Reinhard Höpfl, Wolfgang Schlüter, and Gerhard Soltau. *Das Konzept eines Laserentfernungsmesssystems für Messungen zum Mond und nach Satelliten*. 1986.
- [DNW85] J. O. Dickey, X X Newhall, and J. G. Williams. *Multi-Station lunar laser ranging: An analysis of data quality and earth rotation results*. Proceedings of the international conference of earth rotation and the terrestrial reference frame. California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Mail Stop: 264-700, Pasadena, California 91109 USA, 1985.
- [DWE83] J. O. Dickey, J. G. Williams, and T. M. Eubanks. *Earth rotation and polar motion: Results from lunar laser ranging analysis and an intercomparison study*. Jet Propulsion Laboratories, California Institute of Technology, Pasadena, California 91109 USA, 1983.
- [DWN83] J.O. Dickey, J.G. Williams, X X Newhall, and C. F. Yoder. *Geophysical applications of lunar laser ranging*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California 91109 USA, 1983.
- [EE91] Jürgen Eichler and Hans-Joachim Eichler. *Laser. Grundlagen, Systeme, Anwendungen.*, volume zweite, korrigierte Auflage. springer-Verlag, 1991.
- [Egg85] Dieter Egger. *Systemanalyse der Laserentfernungsmessung*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1985.
- [Gra01] Observatorium Grasse. *L'instrumentation de la Station de Télémétrie Laser-Lune*. OCA Laser-Lune, Av Copernic, F-06103 Grasse, <http://wwwrc.obs-azur.fr>, März 2001.

- [Ham97] Hamamatsu. *Datenblatt des Photomultipliers R3809U-50*. Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstraße 10, 82211 Herrsching am Ammersee, Juni 1997.
- [ILR03] ILRS. *International Laser Ranging Service*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>, 2003.
- [JEK66] Jordan, Eggert, and Kneissl. *Handbuch der Vermessungskund, Band VI*. Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 1966.
- [KM03] Manuel Kremer and Severin Massa. *Datenerfassungssystem für meteorologische Messdaten*. Fachhochschule Gießen - Friedberg, Prof. Dr. Manfred Merkel, Wilhelm-Leuschner-Str, 61169 Friedberg, Dezember 2003.
- [KM04] Manuel Kremer and Severin Massa. *Konzeptionierung eines Strahlführungssystems zur zeit- und orts aufgelösten Rückstreuungsmessung an Aerosolen in der Atmosphäre und zur Abstandsmessung von Mond und Satelliten*. Fachhochschule Gießen - Friedberg, Prof. Dr. Klaus Behler, Wilhelm-Leuschner-Str, 61169 Friedberg, März 2004.
- [Lex] Lexel. *Datenblatt des Argonionenlasers 3500*. Lexel Laser inc., 48503 Milmont Dr., Fremont, CA 94538.
- [Lin03] David R. Linde. *Handbook of Chemistry and Physics*, volume 84th ed. Taylor and Francis, 2003.
- [Man98] Werner Mansfeld. *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden, 1998.
- [MM73] J.W. Marini and C.W. Murray. *Correction of Laser Range Tracking Data for Atmospheric Refraction at Elevations above 10 Degrees*. NASA, Techn. Report, X-591-73-531, 1973.
- [NAS94] NASA. *Satellite Laser Ranging and Earth Science*. NASA Space Geodesy Program, 1994.
- [NAS04] NASA. *NSSDC Master Catalog Spacecraft Query Form*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/sc-query.html>, 2004.
- [Obs04a] McDonald Observatorium. *McDonald Laser Ranging System, SLR System Configuration Definition*. McDonald Observatory, Texas, USA, <http://cddisa.gsfc.nasa.gov>, Mai 2004.
- [Obs04b] Michael Adrian Observatorium. *Astronomie Stiftung Trebur*. Johannes Ohlert, Fichtenstraße 7, 65468 Trebur, 2004.
- [Obs04c] McDonald Observatory. *History of Laser Ranging and MLRS*. McDonald Observatory, Texas, USA, Mai 2004.
- [Pat96] Felix R. Paturi. *Harenberg Schlüsseldaten Astronomie*. Harenberg Lexikon Verlag, 1996.
- [QUA00] QUANTEL. *Datenblatt der YG900er Serie von Picosekundenlasern der Firma QUANTEL*. 17, avenue de l'Atlantique - Z.A. de Courtaboeuf -BP 23- 91941 Les Ulis Cedex - France., Juni 2000.
- [Rük90] Antonin Rük. *Mondatlas*. Artia-Verlag Prag, 1990.

- [See88] Günter Seeber. *Satellitengeodäsie*. Walter de Gruyter, 1988.
- [TO98] H.-R. Tränkler and E. Obermeier. *Sensortechnik, Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer-Verlag, 1998.
- [Wet04] Fundamentalstation Wettzell. *WLRS - Wettzell Laser Ranging System*. Fundamentalstation Wettzell. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, <http://www.wettzell.ifag.de>, 2004.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Entwicklung der Messgenauigkeit [DNW85]	10
3.1	Zum Messprinzip (nach Seeber [See88])	12
3.2	Reflektor auf der Mondoberfläche [NAS04]	13
3.3	Prinzipzeichnung eines Reflektors [See88]	14
3.4	ADEOS 1 [ILR03]	17
3.5	ADEOS 2 [ILR03]	17
3.6	ERS 1+2 [ILR03]	19
3.7	Retroreflektor von ERS 1+2 [ILR03]	19
3.8	LAGEOS [ILR03, See88]	20
4.1	Luftdruck und Temperatur (nach [Egg85])	24
4.2	Partialdruck des Wasserdampfes und Brechungsindex der Luft (nach [Egg85] und [TO98])	25
4.3	Extinktionskoeffizient für Streuung an Luftmolekülen (nach [Egg85])	25
4.4	Abschwächung durch Extinktion	26
4.5	Durchdringende Intensität	27
4.6	Dunstextinktion im Zenit (nach [Egg85])	28
4.7	Zusätzliche Dunstextinktion für $\varepsilon \leq \frac{\pi}{2}$ (nach [Egg85])	29
4.8	Screenshot des Wetter-Programms	32
4.9	Auswirkungen der Korrekturformel	34
4.10	Wellenlängenabhängige Absorption [Lin03]	35
5.1	Technischer Aufbau des YG901 [QUA00]	38
5.2	Technischer Aufbau des YG980 [QUA00]	39
5.3	Ansicht des YG900 [QUA00]	39
5.4	Technischer Aufbau der Coherent-Laseranlage [Coh04]	41
5.5	Erzeugung eines „top hat“ [Coh04]	42
6.1	Prinzip eines Cassegrain-Teleskops	44

6.2	Lage des T1T [Obs04b]	45
6.3	Prinzip eines Photomultipliers	47
6.4	Photomultiplier R3809U-50 [Ham97]	48
6.5	Zur Erklärung der Transit Time Spread [Ham97]	49
7.1	Messgenauigkeit für Satellitenmessungen [NAS94]	50
7.2	Messstationen des ILRS [ILR03]	51
7.3	Technische Anlage in Wettzell [Wet04]	53
8.1	Ansicht des Argonionenlasers [Lex]	56
8.2	Chopperrad (Maße in mm)	56
8.3	Ansicht des ORX 83 A	57
8.4	Prinzipieller Versuchsaufbau	58
8.5	Prinzipieller Signalverlauf	58
8.6	Ergebnis der ersten Messung	59
8.7	Zum Messprinzip	60
8.8	Screenshot des Programms zur Auswertung der Messdaten	62
8.9	Verzerrung der Lichtimpulse	64
A.1	Die erdzugewandte Mondoberfläche [Rük90]	70
A.2	Mondkarte Apollo 11 [Rük90]	71
A.3	Mondkarte Apollo 14 [Rük90]	72
A.4	Mondkarte Apollo 15 [Rük90]	73
A.5	Mondkarte Luna 17 [Rük90]	74
A.6	Mondkarte Luna 21 [Rük90]	75

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter von ADEOS 1+2 [ILR03]	18
3.2	Parameter von ERS 1+2 [ILR03]	19
3.3	Parameter von LAGEOS 1+2 [ILR03]	20
4.1	Unterteilung der Ionosphäre	23
4.2	Legende zum Wetter-Programm	33
5.1	Messgenauigkeit in Abhängigkeit von der Impulsbreite	37
5.2	Technische Daten der YG900er Serie	40
5.3	Technische Daten der YG980er Serie	40
6.1	Technische Daten und geografische Lage des T1T	45
6.2	Technische Daten des R3809U-50 [Ham97]	49
7.1	Technische Daten der Station in Wettzell [Wet04]	52
7.2	Technische Daten der Station Grasse [Gra01]	53
7.3	Technische Daten des McDonald Observatoriums [Obs04a]	54
8.1	Technische Daten des Argonionenlasers [Lex]	55
8.2	Legende zum Auswerteprogramm	63
9.1	Zu erwartende Kosten	66
A.1	Positionen der Retroreflektoren	69
B.1	Satelliten zur Entfernungsmessung Teil A	76
B.2	Satelliten zur Entfernungsmessung Teil B	77
B.3	Satelliten zur Entfernungsmessung Teil C	78