

Fliegerlagerbericht

Optischer Höhenmesser mit audiovisuellem Feedback

Hochschule RheinMain
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Avionik-Entwurf und -Modellierung – bei Prof. Dr. Harald Hanke
Wintersemester 2021/2022

Jennifer Maria Greschner
Matrikelnummer: 1111189

Luca Johannes Kremer
Matrikelnummer: 1109616

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Motivation	1
1.2.	Konzept	1
2.	Technische Grundlagen	2
2.1.	Vorbild aus der kommerziellen Fliegerei: Radar Altimeter	2
2.2.	Funktionsweise eines Time-of-Flight Sensors	2
2.3.	I ² C Datenübertragung	3
3.	Technische Umsetzung	4
3.1.	Auswahl der Komponenten	4
3.1.1.	Sensor	4
3.1.2.	Mikrocontrollerboard	5
3.1.3.	Display	5
3.1.4.	Audioausgabe	5
3.1.5.	Datenspeicher	6
3.1.6.	Datenübertragung	6
3.1.7.	Spannungsversorgung	6
3.2.	Verschaltung der Elektronik	6
3.3.	Softwareimplementierung	9
3.4.	Gehäuseentwicklung und Sensorhalterung	10
4.	Praktische Umsetzung und Ergebnisse	12
4.1.	Anbringung am Flugzeug	12
4.2.	Messflüge	14
4.3.	Messergebnisse	15
4.4.	Auswertung / Erkenntnisse	17
5.	Fazit und Ausblick	19
6.	Abbildungsverzeichnis	20
7.	Literatur	21
8.	Anhang	22

1. Einleitung

1.1. Motivation

Bei Flugzeugen der kommerziellen Luftfahrt werden standardmäßig Radarhöhenmesser genutzt, um den Piloten bei der Landung zu unterstützen und ihm die noch verbleibende Höhe über Grund anzusagen. Dieses System entlastet den Piloten durch das akustische und visuelle Feedback, sodass er sich bei dieser kritischen Flugphase verstärkt auf die restlichen Flugparameter und die Sicht aus dem Cockpit konzentrieren kann. Damit wird das Risiko eines „Controlled Flight into Terrain“, also einem gesteuerten Flug ins Gelände, drastisch gesenkt und somit die Flugsicherheit weiter gesteigert [1]. In Luftfahrzeugen der privaten Luftfahrt, insbesondere in einmotorigen Flugzeugen, ist die Nutzung eines solchen Warnsystems nicht üblich. Aus diesem Grund soll mit dieser Arbeit ein möglicher Einsatz dieser Systeme in kleinen Luftfahrzeugen untersucht werden.

1.2. Konzept

Der Höhenmesser soll den Piloten eines einmotorigen Luftfahrzeugs bei den Landungen unterstützen. Die Messvorrichtung soll dabei möglichst kompakt und günstig sein. Zu diesem Zweck wird ein TOF Sensor verwendet, welcher über einen Mikrocontroller angesteuert und ausgelesen wird. Für eine sinnvolle Messanwendung sollte der Sensor über eine Reichweite von mindestens 50 m verfügen. Dem Piloten sollen über eine Bildschirm- und Audioausgabe die erhaltenen Höhenwerte als visuelles und akustisches Feedback geboten werden. Darüber hinaus sollen die Höhenwerte zu Dokumentationszwecken und für spätere Vergleiche der Landungen über eine Betrachtung der Sinkraten mit einem Zeitwert versehen und auf einer SD-Karte gespeichert werden. Für eine möglichst problemlose Installation und Anwendung im Flugzeug soll der Messaufbau als Standalone-Anwendung umgesetzt werden, sodass er ohne Zusatzgeräte betrieben werden kann. Um eine genaue Anzeige der Höhe über dem Boden gewährleisten zu können, muss eine Möglichkeit zur Justierung des Nullpunktes des Höhenmessers gegeben sein. Diese Justierung soll auf Knopfdruck erfolgen.

Im Laufe dieser Arbeit wird die technische Umsetzung des Projekts mit den nötigen technischen Grundlagen erläutert, die praktische Umsetzung veranschaulicht und die Messergebnisse und möglichen Anwendungsmöglichkeiten analysiert.

2. Technische Grundlagen

2.1. Vorbild aus der kommerziellen Fliegerei: Radar Altimeter

Radar-Abstandssensoren zur Ermittlung der Höhe eines Luftfahrzeugs über Grund (AGL) werden in Flugzeugen und Hubschraubern der militärischen sowie zivilen Verkehrs- und Transportluftfahrt verwendet. Anders als Druck-Höhenmesser liefern sie den genauen Abstand zum Boden, welcher bei der Navigation über komplexem Gelände und/oder bei schlechter Sicht (beispielsweise unter Instrumentenflugbedingungen oder bei Nacht) entscheidend für die sichere Durchführung des Fluges ist [2, S. 4]. Die Funktionsweise der meisten Radar-Höhenmesser beruht hierbei auf der Puls- oder FMCW-Radartechnik [2, S. 2].

Als Beispiel für den Einsatz von Radar-Höhenmessern ist die „decision height“ bei Präzisionsanflügen zu nennen. Diese ist in den Anflugkarten für den entsprechenden Flugplatz angegeben und legt (alternativ zur „decision altitude“) fest, in welcher Höhe durchgestartet werden muss, wenn die Landebahn noch nicht in Sicht ist [3]. Zudem wird der Autopilot für die automatische Landung, sowie das GPWS („ground proximity warning system“) mit den genauen Höhendaten des Radar-Höhenmessers versorgt [2, S. 4].

Radar-Höhenmesser sind groß, schwer und sehr teuer [4], weshalb sie sich in der privaten Fliegerei nicht durchgesetzt haben. Für diesen Sektor ist ein optischer Abstandssensor als Alternative denkbar. Im Folgenden wird daher die Funktionsweise eines TOF-Sensors ergründet, wie er im Messaufbau verwendet wurde.

2.2. Funktionsweise eines Time-of-Flight Sensors

Time-of-Flight Sensoren sind eine gängige Technologie zur genauen und günstigen Messung von Entfernungen. Dafür nutzen sie die Laufzeit oder Phasenverschiebung von Licht zwischen zwei Punkten, um die Distanz zwischen diesen zu berechnen. Dabei kann Licht verschiedener Wellenlängen verwendet werden, wie z.B. sichtbares Licht als Laser oder Infrarotstrahlen. [5]

Die Grundlegende Funktionsweise von TOF Sensoren besteht darin, Licht auszusenden, welches von einem Messobjekt reflektiert wird. Die reflektierten Photonen werden vom Sensor erkannt und die Zeit zwischen Aussenden und Empfang des Lichts wird dabei gemessen. Da die Lichtgeschwindigkeit mit ca. $300000 \frac{km}{s}$ bekannt ist, kann über die gemessene Laufzeit die Entfernung zum Messpunkt berechnet werden. Das Licht legt mit dem Weg zum Messpunkt und zurück zum Sensor die doppelte Entfernung zurück. Deshalb ergibt sich der Zusammenhang zwischen den Größen wie folgt [6]:

$$Entfernung = Lichtgeschwindigkeit \cdot \frac{Laufzeit}{2}$$

Gleichung 2.2-1: Entfernungsberechnung

Da die Reflektion von Licht keinesfalls immer gleich verläuft, gibt es einige Punkte, die die Messung beeinflussen und dementsprechend zu beachten sind. Zum einen können unebene Oberflächen die Lichtstrahlen unregelmäßig reflektieren und streuen, was zu verschiedenen Laufzeiten und damit einer ungenauen Distanzmessung führen kann. Zum anderen kann das Licht in Räumen von anderen Oberflächen als der Messfläche reflektiert werden, wodurch es ebenfalls zu ungenauen Messergebnissen durch Mehrwegeempfang kommen kann. Ein weiterer bedeutender Einflussfaktor ist das Umgebungslicht. Es enthält Licht verschiedener Wellenlängen, welches ebenfalls vom Sensor

empfangen wird. Um die Möglichkeiten der Interferenzen durch das Umgebungslicht auf ein Minimum zu reduzieren, werden vom Sensor Wellenlängen verwendet, die im Sonnenlicht fast nicht vorkommen. Im Infrarotbereich eignet sich dafür beispielsweise eine Wellenlänge von 940 nm . Mithilfe von optischen Filtern werden dann alle weiteren Wellenlängen aus dem empfangenen Licht gefiltert [7]. Dadurch werden Messstörungen durch das Sonnenlicht auf ein Minimum reduziert [5], jedoch nicht eliminiert.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Umsetzung dieser Messtechnik: direktes und indirektes TOF. Der in diesem Messaufbau verwendete Sensor nutzt die indirekte TOF Technik. Er sendet modulierte Lichtstrahlen aus, die eine einheitliche Phase besitzen. Anhand der Phasenverschiebung der empfangenen Lichtwellen kann nun die Entfernung berechnet werden. Da sich die Phasenverschiebung in bestimmten Intervallen wiederholt, werden Lichtwellen zweier unterschiedlicher Frequenzen ausgesendet, um die Mehrdeutigkeit der Phasendifferenz zu vermeiden. Bei mehreren Objekten im Messbereich des Sensors, wird nach dem Superpositionsprinzip ein Durchschnittswert der Entfernungen berechnet [8].

2.3. I²C Datenübertragung

I²C ist ein serielles Datenübertragungsprotokoll für kurze Strecken zwischen beispielsweise einem Mikrocontroller und Peripheriegeräten. Zur Datenübertragung werden nur eine Daten- und eine Taktleitung benötigt, die über Pullup-Widerstände auf eine Spannung von meist $3,3\text{ V}$ oder 5 V gebracht werden. Dabei hat jeder Teilnehmer der Kommunikation eine eindeutige 7 bit Adresse. Da das Protokoll auf kurze Strecken ausgelegt ist, kann es nur bis zu einer Kabelkapazität von maximal 400 pF genutzt werden. Um über lange Leitungen und damit bei höheren Buskapazitäten eine fehlerlose Kommunikation über I²C ermöglichen zu können, muss ein Busbuffer oder ähnliches verwendet werden [9, S. 56-57].

Durch den Einbau von jeweils einem Bus Extender an jedem Ende der langen Leitung kann die mögliche Buskapazität auf bis zu 3 nF erhöht werden. Der Bus Extender erzielt dies, indem er die große Buskapazität der langen Leitung von den Busknoten isoliert und das Signal über einen analogen Stromverstärker verstärkt [10, S. 7].

3. Technische Umsetzung

3.1. Auswahl der Komponenten

3.1.1. Sensor

Da wie bereits beschrieben eine günstige und kompakte Lösung angestrebt wird, fällt die Wahl für Distanzen von mindestens 50 m zwangsläufig auf optische Messtechniken. Hier muss zwischen LIDAR- und anderen TOF-Sensoren unterschieden werden. Während LIDAR auf Lasertechnik setzt, strahlen andere TOF-Sensoren einen Lichtkegel aus, was das Gefährdungspotential bei Nutzung des Sensors erheblich reduzieren kann. Im Verlauf des Fluges kann nicht sichergestellt werden, dass sich im Bereich unter dem Sensor keine Personen aufhalten. Daher ist dies ein wichtiger Faktor bei der Wahl des Sensors. Einige LIDAR-Systeme basieren auf Class-1 Lasern und sind damit nicht gesundheitsschädlich [6]. Da sich jedoch keine relevanten Nachteile gegenüber eines LIDAR Sensors herausstellten, Reichweite und Kosten jedoch gut zur Zielsetzung des Projekts passen, wurde im Rahmen dieses Messaufbaus der TOF-Sensor „TeraRanger Evo 60m“ der Marke TeraBee verwendet (Abbildung 3-1).

Dieser bietet eine angegebene maximale Messdistanz von 60 m und strahlt über vier LEDs Licht im Infrarotbereich ab [11], welches über einen zentral angeordneten Sensor aufgefangen und ausgewertet wird (siehe Abbildung 3-2). Hierbei kommt die indirekte TOF-Technik zum Einsatz, was zur hohen Genauigkeit des Sensors beiträgt [8]. Für das Auslesen der Messdaten bietet der Sensor neben einer UART- auch eine I²C-Schnittstelle, über die in jedem Datenframe die Distanz in Millimetern sowie eine Checksumme übertragen wird. So kann jeder Messwert validiert und ggf. verworfen werden, sollte ein Übertragungsfehler auftreten [12].

Der Sensor ist mit einem Backboard verbunden, welches als Interface dient und eine 9-Pin DF-13 Steckeraufnahme als Ausgang bietet. Über diesen wird der Datenaustausch und die Spannungsversorgung sowie die Möglichkeit der Montage durch zwei Schraublöcher gewährleistet.



Abbildung 3-1: TeraRanger Evo 60m im laufenden Betrieb

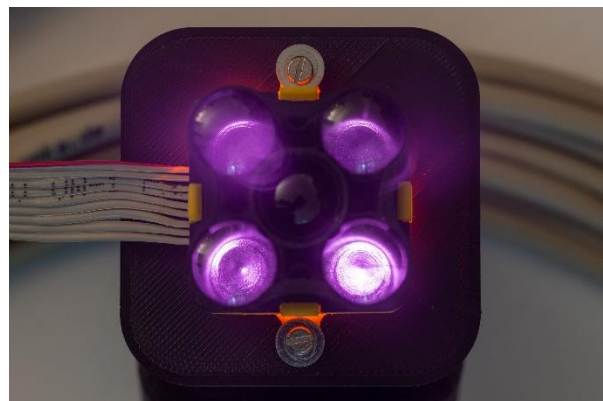


Abbildung 3-2: Infrarot-LEDs des Sensors im Detail

3.1.2. Mikrocontrollerboard

Aus den Anforderungen an die Messvorrichtung ergeben sich eine Reihe von Anforderungen an den Mikrocontroller. Um eine kompakte Bauweise der Messapparatur zu ermöglichen, muss auch das Mikrocontrollerboard möglichst klein sein. Allerdings benötigt es eine Vielzahl an verschiedenen Pins, unter anderem für die Datenübertragung über SPI, UART, I²C und digitale I/O Pins. Darüber hinaus benötigt er zur zügigen Verarbeitung der Sensordaten eine angemessen hohe Taktgeschwindigkeit und genügend Arbeitsspeicher für die Steuerung aller Peripheriegeräte. Angesichts dieser Anforderungen bietet sich die Nutzung eines Arduino Nanos an. Zusätzlich zu seinem kleinen Formfaktor und einer Fülle an Anschlusspins bietet die Arduino Plattform eine große Auswahl an Bibliotheken, welche die Ansteuerung der verwendeten Module deutlich vereinfachen.

3.1.3. Display

LCDs bieten eine einfache, energiesparende und gut lesbare Anzeige, die sehr einfach in ein Gehäuse integrierbar ist. Im Rahmen des Projekts wurde ein 16x2 LCD (zwei Zeilen mit je 16 Zeichen) mit Hintergrundbeleuchtung gewählt, welches über I²C angesteuert wird. Darauf wird sekundlich aktualisiert die Höhe in großen Ziffern (zwei Zeilen füllend, siehe Abbildung 3-3) ausgegeben.



Abbildung 3-3: Displayausgabe bei einem tiefen Überflug

3.1.4. Audioausgabe

Für die akustische Ausgabe der Höhe wurde das MP3-Modul „DFPlayer Mini“ ausgewählt, da es als Komplettpaket mit eigenem SD-Kartenleser MP3-Dateien abspielen und als analoges Signal auf dedizierten Pins ausgeben kann. Die Steuerung des Moduls erfolgt über UART durch den Arduino [13]. So können je nach erreichter Höhe verschiedene Dateien abgespielt werden. An das Modul wird ein Klinkenkabel angeschlossen, über welches das Audiosignal an einen externen Lautsprecher oder das Intercom-System des Flugzeugs übertragen werden kann.

3.1.5. Datenspeicher

Zwecks Datenspeicherung der Messdaten für die spätere Auswertung sowie die Zwischenspeicherung des Offset-Werts für die Justierung wurde die SD-Karte als Speichermedium ausgewählt. Diese kann leicht aus dem Messaufbau entfernt und über jeden beliebigen Computer mit SD-Port gelesen werden.

Um mit dem Arduino auf SD-Karten schreiben zu können, ist entsprechende Hardware notwendig. Das von uns gewählte SD-Modul der Marke Catalex funktioniert dank integriertem Spannungswandler auf 5 V-Basis, kann über SPI mit dem Arduino kommunizieren und bietet über eine Bibliothek Zugriff auf die Daten der eingesteckten microSD-Karte [14].

3.1.6. Datenübertragung

Für die Datenübertragung zwischen Sensor und Arduino sowie die Spannungsversorgung des Sensors wird ein geschirmtes Telefonkabel verwendet. So kann einem Datenverlust aufgrund äußerer Störeinflüsse (beispielsweise elektromagnetischer Einflüsse) entgegengewirkt werden. Da die Länge der Leitung mit 6 m eine für I²C zu hohe Leitungskapazität mit sich bringt, muss der Bus gebuffert werden. Dies wird durch den Einsatz zweier P82B715 I²C Extender von Texas Instruments gemäß 2.3 erreicht.

3.1.7. Spannungsversorgung

Als Spannungsversorgung dient eine Powerbank (Akku-Pack), die über einen USB-Anschluss 5 V liefert. Über ein USB-Kabel werden dedizierte 5 V- und Ground-Abschnitte der Platine mit Strom versorgt, sofern der zwischengeschaltete Schalter geschlossen ist. Von diesen beziehen alle Komponenten die für ihren Betrieb notwendige Leistung. Ist der Schalter geschlossen, befindet sich das gesamte System im betriebsbereiten Zustand und eine Indikator-LED neben dem Schalter leuchtet grün auf, wie in Abbildung 3-9 zu sehen.

3.2. Verschaltung der Elektronik

Zwecks Softwareprogrammierung und Evaluation des Konzepts wurde die Schaltung als Prototyp, wie in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 zu sehen, auf Breadboards mithilfe von Jumper-Kabeln verschaltet. Den zentralen Baustein stellt der Arduino dar. Dieser ist über den „Vin“-Pin mit der 5 V-Schiene, sowie über einen Ground-Pin mit der Ground-Schiene des Breadboards verbunden und erhält so die nötige Betriebsspannung. Die Spannungsschienen des Breadboards sind durch einen Schiebeschalter mit der Powerbank (in der Abbildung als Batterie-Pack dargestellt) verbunden, sodass die Spannungsquelle für den gesamten Messaufbau einfach an- und ausgeschaltet werden kann.

Das Display und der Sensor liegen auf dem I²C-Bus des Arduino. Der I²C-Extender für die Anbindung des Sensors ist in nächster Nähe zum Arduino zwischengeschaltet und wird ebenfalls mit 5 V versorgt. Auf der gebufferten Seite sorgen zwei Pullup-Widerstände für ein sauberes Datensignal auf dem Sensorkabel. Dieses ist mit vier Leitungen dargestellt und führt auf das zweite Breadboard, wo der gebufferte Bus wieder gewandelt und anschließend an den Sensor gegeben wird, dargestellt als 4-Pin Konnektor in Abbildung 3-4.

Das microSD-Modul ist über vier Leitungen mit den SPI-fähigen Pins des Arduino verbunden und zusätzlich an die 5 V-Versorgung angeschlossen.

Für die Einbindung der Audioausgabe wird eine serielle Schnittstelle über Software auf zwei GPIO-Pins emuliert, an die das MP3-Modul angeschlossen wird. Auf diesem Weg erhält es die notwendigen Steuerbefehle über das UART-Protokoll. Um die Audiosignale hörbar zu machen, wird an das Modul über zwei 100 Ω Widerstände ein 3,5 mm Klinkenkabel angeschlossen.

Ein Druckknopf ist zwischen Ground und einem GPIO-Pin des Arduino verschaltet, um die Justierungsfunktion zu ermöglichen. Hier wird zudem der integrierte Pullup-Widerstand des Pins genutzt.

Zuletzt ist zwischen 5 V und Ground eine Indikator-LED mit 150 Ω Widerstand als Strombegrenzung geschaltet. Diese zeigt bei vorhandener Versorgungsspannung den aktiven Zustand des Messaufbaus an.

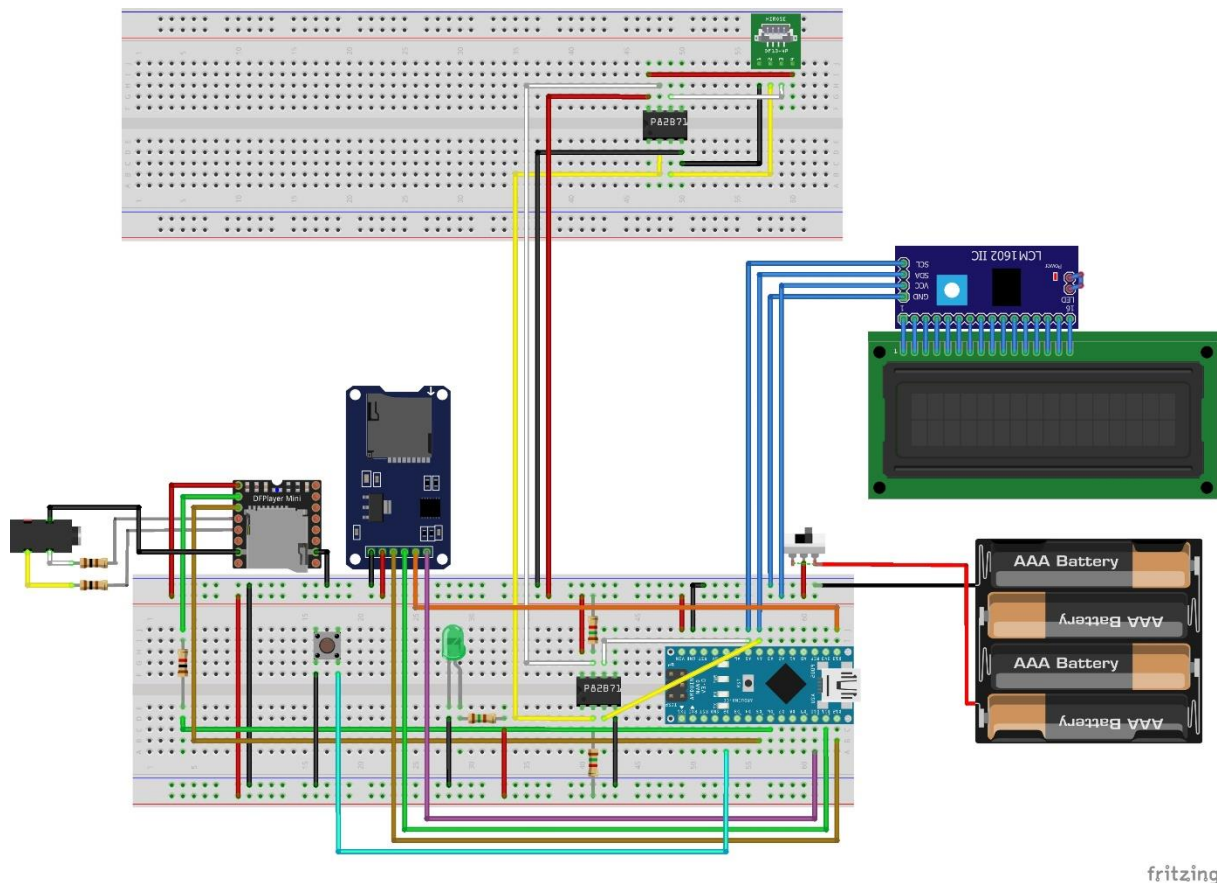


Abbildung 3-4: Schaltbild des Testaufbaus

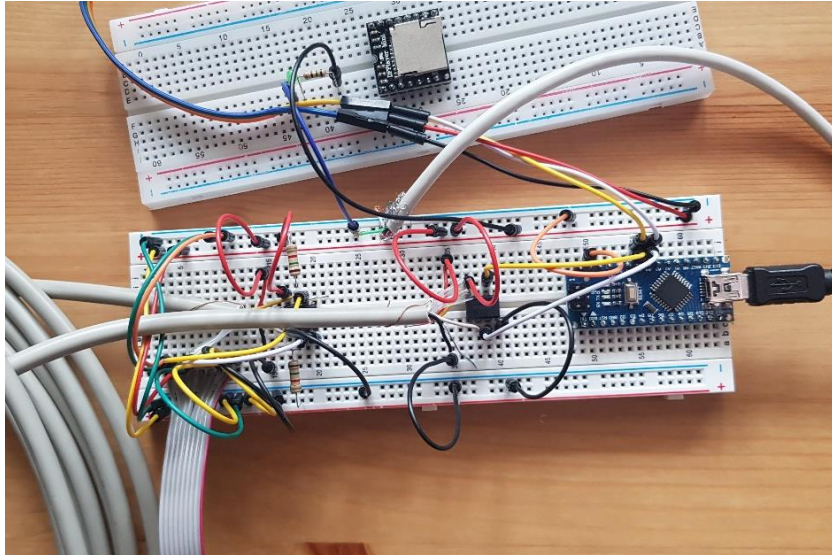


Abbildung 3-5: Teile der Prototyp-Verschaltung auf Breadboards

Nach abgeschlossener Prototypen-Phase wurde die Schaltung wie in Abbildung 3-6 zu sehen auf einer Lötplatine fest verschaltet. Der Sensorseitige I²C-Extender-IC wurde im Kabel integriert, indem die Leitungen des Telefonkabels und des Sensor-Flachbandkabels isoliert herausgeführt und mit dem IC verlötet wurden. Durch mehrfache Isolierung und Ummantelung mit Schrumpfschlauch wurde die Verbindung gesichert und wetterfest gemacht (siehe Abbildung 3-7).

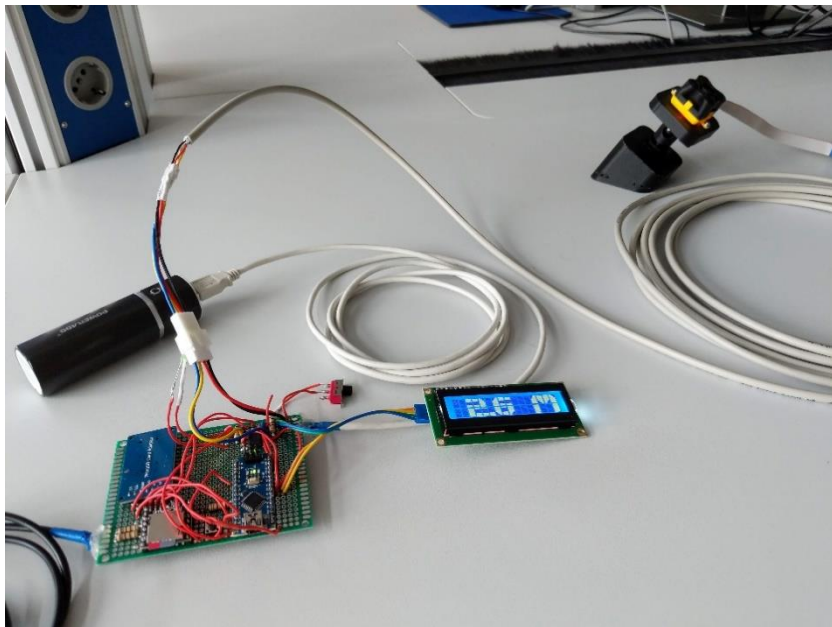


Abbildung 3-6: Platine mit Display und Sensor



Abbildung 3-7: Sensorkabel mit integriertem I²C-Extender-IC

Um die Handhabung der Komponenten zu vereinfachen, sind an beiden Enden des Kabels Stecker integriert. Sensorseitig wurde hier der im Flachbandkabel integrierte 9-polige DF13-Konnektor verwendet, welcher direkt in den Anschluss des Sensor-Backboards passt. Zwischen Kabel und Platine ist ein Molex 4-Pin Stecker mit entsprechender Steckeraufnahme verlötet, um das Gehäuse inklusive Arduino und Datenspeicher von Sensor und Kabel getrennt nutzen zu können (siehe Abbildung 3-9). So sind Datensicherung und Firmware-Updates deutlich leichter möglich, der Sensor kann am Flugzeug verbaut bleiben.

3.3. Softwareimplementierung

Für die Implementierung der benötigten Funktionen auf dem Arduino Board wurde die Arduino IDE verwendet, über welche Code direkt kompiliert und auf den Arduino gespielt werden kann. Zwecks Fehlersuche und Problembeseitigung wurde zudem die „Live Share“ Funktion in Visual Studio Code verwendet, die ein gemeinsames Einsehen und Bearbeiten des Codes ermöglicht.

Um alle gewünschten Funktionen umsetzen zu können, wurden vorhandene Bibliotheken genutzt. Diese sind in Anhang 1 Anhang 1 Anhang 1 aufgelistet. Für die Kommunikation mit dem Sensor wurde ein Beispielprogramm als Vorlage genutzt und entsprechend der Projektanforderungen angepasst [15]. Dieses liefert unter anderem eine Tabelle aller Checksummen, die vom Sensor zyklisch durchlaufen werden. Weiterhin wurde ein Beispielprogramm zur Implementierung großer Zeichen auf dem LCD als Orientierung genutzt und für das Projekt angepasst [16].

Im Setup-Teil der Software wird zunächst der I²C-Bus gestartet und das LCD initialisiert. Zudem wird die Kommunikation mit der SD-Karte aufgebaut und, falls keine SD-Karte erkannt wurde, eine Fehlermeldung auf dem Display ausgegeben (die Buchstaben „SD“ blinken auf). Ist eine SD-Karte erkannt worden, wird für den übrigen Zeitraum des Setup-Teils das Wort „LOAD“ auf dem Display angezeigt. Im nächsten Schritt wird der Dateiname nach dem Muster „DATA_Ziffer.csv“ konfiguriert bzw. inkrementiert, sodass noch keine Datei dieses Namens auf der SD-Karte vorhanden ist. So wird sichergestellt, dass keine Daten überschrieben werden können. Zudem wird die entsprechende für die Datenspeicherung vorgesehene CSV-Datei erstellt und in die erste Zeile werden zur besseren Einordnung der Messdaten Spaltenüberschriften hinzugefügt. Anschließend wird die serielle

Kommunikation mit dem MP3-Modul aufgebaut und das Modul konfiguriert. Nach abgeschlossener Konfiguration wird ein Test-Audio abgespielt, um die erfolgreiche Audioausgabe über entsprechende Endgeräte sicherstellen und die Lautstärke wählen zu können. Für die Umsetzung der Justierung wird geprüft, ob der Druckknopf gedrückt ist. Ist dies der Fall, wird der aktuelle Messwert des Sensors als Offset-Wert gesetzt und in die Datei „offset.txt“ geschrieben. Sollte diese bereits vorhanden sein, wird sie zuvor gelöscht. Die Datei wird bei jedem Systemstart mit nicht gedrücktem Knopf ausgelesen und der enthaltene Wert als Offset gesetzt. So ist bei fest montiertem Sensor immer eine korrekte Messung über Grund ohne zusätzliche Justierungsarbeit möglich. Ist keine Offset-Datei vorhanden und der Knopf nicht gedrückt, wird als Standardwert eine Höhe von 0 m über Grund angenommen.

Nach Abschluss des Setup-Abschnitts wird der Sensor-Betrieb aufgenommen. Vom Sensor werden bei Distanzen unter 30 m die zehn Mal pro Sekunde, bei Distanzen darüber ein Mal pro Sekunde abgefragt. Diese Höhe wurde im Rahmen der Messflüge angepasst. So kann eine hohe Genauigkeit bei überschaubarer Datenmenge erreicht werden. Die Messwerte kommen wie in 3.1.1 erwähnt in Form von Datenframes beim Arduino an, wobei Byte 1 und 2 die Distanz und Byte 3 die Checksumme enthält. Über die messen()-Funktion, die im Gesamtcode in Anhang 2 erklärt ist, wird die Checksumme überprüft und bei erfolgreichem Abgleich der Messwert zurückgegeben. Von diesem wird der Offset abgezogen und so die tatsächliche Höhe des Flugzeugs über Grund ermittelt. Für die Ausgabe auf dem Display wird der Wert zudem in Meter umgerechnet und als Gleitkommazahl zwischengespeichert. Die Displayanzeige wird dabei unabhängig von der Datenspeicherung sekundlich aktualisiert. Die Datenspeicherung auf die SD-Karte erfolgt in Millimetern und mit aktuellem Zeitstempel relativ zum Systemstart, um den Zeitverlauf für die Auswertung verfügbar zu machen.

Nach jedem gesicherten Messwert wird geprüft, ob eine entscheidende Höhe im Sinkflug durchschritten wurde, um bei Bedarf den Audio-Callout abzurufen. Dabei sind die signifikanten Höhen 50 m, 40 m, 30 m, 20 m, 10 m sowie 5 m. Hierfür wird jeweils der letzte Messwert mit dem aktuellen verglichen und so erkannt, wenn ein Sinkflug vorliegt. Ist dies der Fall, wird je nach durchschrittener Höhe der entsprechende Callout abgespielt. Damit der Callout bei gleichbleibender Höhenstufe nicht im nachfolgenden Durchlauf des Programms erneut abgespielt wird, wird eine Kontrollvariable nach erstem Aufruf geändert, um den Status „announced“ für die entsprechende Höhenstufe zu signalisieren. Ist dieser gesetzt, wird für die Höhenstufe kein Callout gespielt.

Liegt die Distanz außerhalb des messbaren Bereichs oder wird bei der Checksummenprüfung ein Übertragungsfehler erkannt, wird die Distanz auf 0 m gesetzt. In dem Fall wird auch die Messfrequenz auf ein Mal pro Sekunde reduziert, um übermäßig viele Null-Messungen auf der SD-Karte zu vermeiden.

3.4. Gehäuseentwicklung und Sensorhalterung

Mit der nötigen Anbringung des Sensors an der Außenseite des Flugzeugs ergeben sich einige Störfaktoren, die bei der Entwicklung einer Sensorhalterung berücksichtigt werden müssen. Von größter Bedeutung sind der hohe Luftwiderstand, den der Sensor im Flug erzeugt, und die vom Luftfahrzeug erzeugten Vibrationen. Darüber hinaus muss der Sensor beim Anflug horizontal und damit parallel zur Landebahn ausgerichtet sein.

Da in diesem Fall eine sehr spezielle Passform der Sensorhalterung gewünscht ist, die genau an die Tragflächenstrebe der Cessna 172N passt, ist die Fertigung mithilfe eines 3D-Druckers von Vorteil. Dabei muss beachtet werden, dass das verwendete Material den wirkenden Kräften standhält. Alle Außenwände der Halterung müssen dick genug gedruckt sein und das Füllmuster genügend Stabilität bieten. Da der Sensor an der Tragflächenstrebe der Cessna 172 angebracht werden soll, wurde bei der Form ein Winkel von 30° eingearbeitet. Für die Feineinstellung der Sensorlage ist in die

Sensorhalterung ein Kugelkopf integriert. Mithilfe dessen kann bei der Anbringung am Flugzeug eine genau horizontale Lage des Sensors gewährleistet werden. Die abgeschrägte Sensorhalterung mit Kugelkopf ist in Abbildung 3-8 zu sehen.



Abbildung 3-8: Sensorhalterung mit charakteristischer 30°-Abschrägung und Kugelkopf

Außerdem wurde ein Gehäuse für den restlichen Messaufbau entwickelt, welches im Cockpit angebracht wird. In diesem Gehäuse ist die Platine befestigt, auf welcher das Mikrocontrollerboard und die weiteren Module verlötet sind. Darüber hinaus findet sich auf dieser der Knopf zur Justierung des Nullpunktes. Wie in Abbildung 3-9 zu sehen, ist auf der Oberseite des Gehäuses das LCD eingebettet. Auf der Vorderseite befindet sich der Schalter, welcher beim Schließen die Spannungsversorgung der Geräte herstellt und die entsprechende grüne Indikator-LED. Darüber hinaus ist ein Zugang zur microSD-Karte für die Datenspeicherung vorhanden. Rechts und links befinden sich die Anschlüsse des Spannungs-, Audio- und Datenkabels.



Abbildung 3-9: Gehäuse bei eingeschaltetem System ohne eingelegte microSD-Karte

4. Praktische Umsetzung und Ergebnisse

4.1. Anbringung am Flugzeug

Die Anbringung am Flugzeug muss ohne permanente Veränderungen und Beschädigungen am Flugzeug erfolgen. Darüber hinaus muss sie dem Luftwiderstand und den Flugzeugvibrationen standhalten. Da der Sensor erst ab 0,5 m Höhenwerte liefert, ist dies zudem die Mindesthöhe für die Anbringung an der Tragflügelstrebe. Eine Befestigung des Sensors über der Fußraste war dementsprechend gut geeignet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Positionierung der Sensorhalterung.



Abbildung 4-1: Draufsicht auf die Sensorhalterung aus dem Flugzeug

Als Möglichkeit der festen aber dennoch flexibel an die Wölbung der Strebe anpassbaren Befestigung wurden breite Kabelbinder gewählt, die durch die in der Sensorhalterung dafür vorgesehenen Löcher geschoben wurden. Wie in Abbildung 4-1 zu sehen, wurde der Bereich zunächst mit Kreppband ausgekleidet, um Lackschäden durch die Kabelbinder vorzubeugen. Die Anbringung über der Fußraste hatte zudem den Vorteil, dass der Kabelbinder an dieser einrasten und somit im Flug nicht weiter absinken konnte.

Abbildung 4-2 zeigt die Anbringung der Sensorhalterung an der Unterseite der Strebe.



Abbildung 4-2: Anbringung des Sensors an der Tragflächenstrebe

Hier ist zu erkennen, dass ein Stück Latex zwischen die Strebe und die Sensorhalterung gelegt wurde, um ein Verschieben des Sensors während des Fluges zu verhindern. Darüber hinaus trägt es zur Dämpfung der Vibrationen bei.

Das Sensorkabel wurde an der Tragflächenstrebe entlang, seitlich an der Flugzeugtür vorbei und durch das Fenster ins Cockpit geführt. Wie in folgender Abbildung zu sehen, konnte das Fenster dabei vollständig geschlossen werden, was für den Start von Bedeutung ist.



Abbildung 4-3: Befestigung des Sensorkabels am Flugzeug

Darüber hinaus ist in Abbildung 4-3 die Befestigung des Sensorkabel mithilfe von Gewebeklebeband zu sehen.

4.2. Messflüge

Wie in Abschnitt 2.2 bereits erwähnt, hat die Umgebung eine große Auswirkung auf das Reflexionsverhalten und damit auf das Messergebnis eines TOF-Sensors. Besonders hervorzuheben sind dabei der Winkel des Sensors relativ zur Messfläche, das Umgebungslicht und die Struktur der Messoberfläche. Dementsprechend wurden in den drei durchgeführten Messflügen die genaue Auswirkung dieser Einflussfaktoren auf die Messwerte untersucht. Aus diesem Grund wurden alle drei Flüge bei verschiedenen Wetter- und Lichtbedingungen geflogen.

Flug 1 wurde am 22.09.2021 gegen 11:45 Uhr bei bewölktem Himmel durchgeführt. Das Ziel dieses Fluges war, den Einfluss des Sensorwinkels relativ zur Messoberfläche zu untersuchen. Das Ausfahren der Landeklappen erhöht sowohl den Auftrieb als auch den Widerstand am Flugzeug. Dadurch wird ein steilerer Anflugwinkel beim Landeanflug ermöglicht [17]. Da jede Klappenstellung einen anderen Anflugwinkel beim Landeanflug mit gleicher Fluggeschwindigkeit ermöglicht, wurden drei tiefe Überflüge auf eine Asphaltpiste am Flugplatz in Oehna mit verschiedenen Klappenstellungen ausgeführt. Die genutzten Klappenstellungen waren dabei: Landeklappen nicht ausgefahren, Landeklappen auf Stufe 1 und Landeklappen voll ausgefahren. Für den späteren Vergleich des Einflusses des Umgebungslichts wurde als Referenz ein tiefer Überflug mit vollständig ausgefahrenen Landeklappen auf die Graspiste realisiert.

Zweck des zweiten Fluges war, den Einfluss der Messoberfläche auf die Messergebnisse festzustellen. Dafür wurden bei Dämmerung am 22.09.2021 gegen 18:50 Uhr zwei Mal abwechselnd jeweils ein tiefer Überflug auf die Asphaltpiste und dann auf die Graspiste mit gleicher Klappenstellung durchgeführt. Aufgrund des geringen Umgebungslichts zu dieser Tageszeit werden von diesem Messflug die besten Messergebnisse erwartet.

Mit dem letzten Flug sollte der Einfluss des Umgebungslichts abschließend untersucht werden. Dafür fand ein Messflug am 23.09.2021 um 11:00 Uhr bei sonnigem Wetter statt. Es wurden für die Messungen zwei Touch-and-Go Manöver am Flugplatz Holzdorf geflogen.

4.3. Messergebnisse

Nun werden die bei den Messflügen aufgezeichneten Höhenwerte analysiert und interpretiert. Dabei wird eine Messungenauigkeit im Zentimeterbereich angenommen. Daher sind die angegebenen Werte auf ganze Zentimeter gerundet. Die vollständigen Messwerte sind in Anhang 3 zu finden. Abbildung 4-4 zeigt die Auswertung der Messwerte aus Messflug 1.

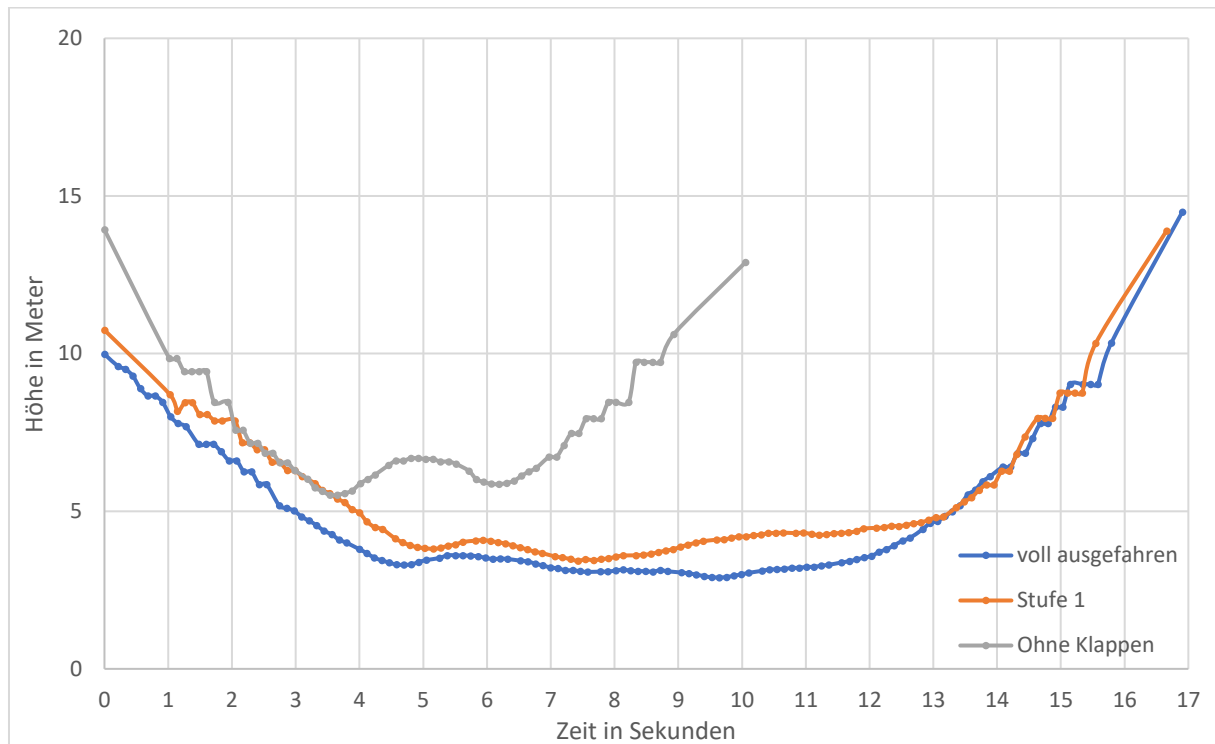


Abbildung 4-4: Messreihe bei verschiedenen Klappenstellungen

Mit diesem Messflug soll der Einfluss der Klappenstellung auf die Messwerte untersucht werden. Darum ist der tiefe Überflug ohne ausgefahrene Klappen in grau, mit Landeklappen auf Stufe 1 ausgefahren in orange und mit vollständig ausgefahrenen Klappen in blau dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Überflug ohne ausgefahrene Landeklappen nur ca. 10 Sekunden dauerte. Beide Überflüge mit ausgefahrenen Landeklappen dauerten fast 17 Sekunden. Der gemessene Höchstwert beträgt ohne Landeklappen 13,93 m, mit Landeklappen auf Stufe 1 13,90 m und mit vollständig ausgefahrenen Klappen 14,49 m. Es lässt sich dementsprechend beobachten, dass der Höchstwert trotz verschiedener Klappenstellungen nur geringfügig voneinander abweicht. Gut zu erkennen ist die Frequenzänderung der Messwertaufzeichnung von 10 Messwerten pro Sekunde auf nur einen Messwert pro Sekunde ab eine Höhe von über 10 m.

Abbildung 4-5 veranschaulicht die Messwerte zur Untersuchung des Einflusses des Untergrundes. Dabei wird exemplarisch ein tiefer Überflug über die Asphaltpiste und einer über die Graspiste analysiert. Die Höhenwerte des Überfluges über Gras sind in orange, die des Fluges über Asphalt in blau dargestellt.

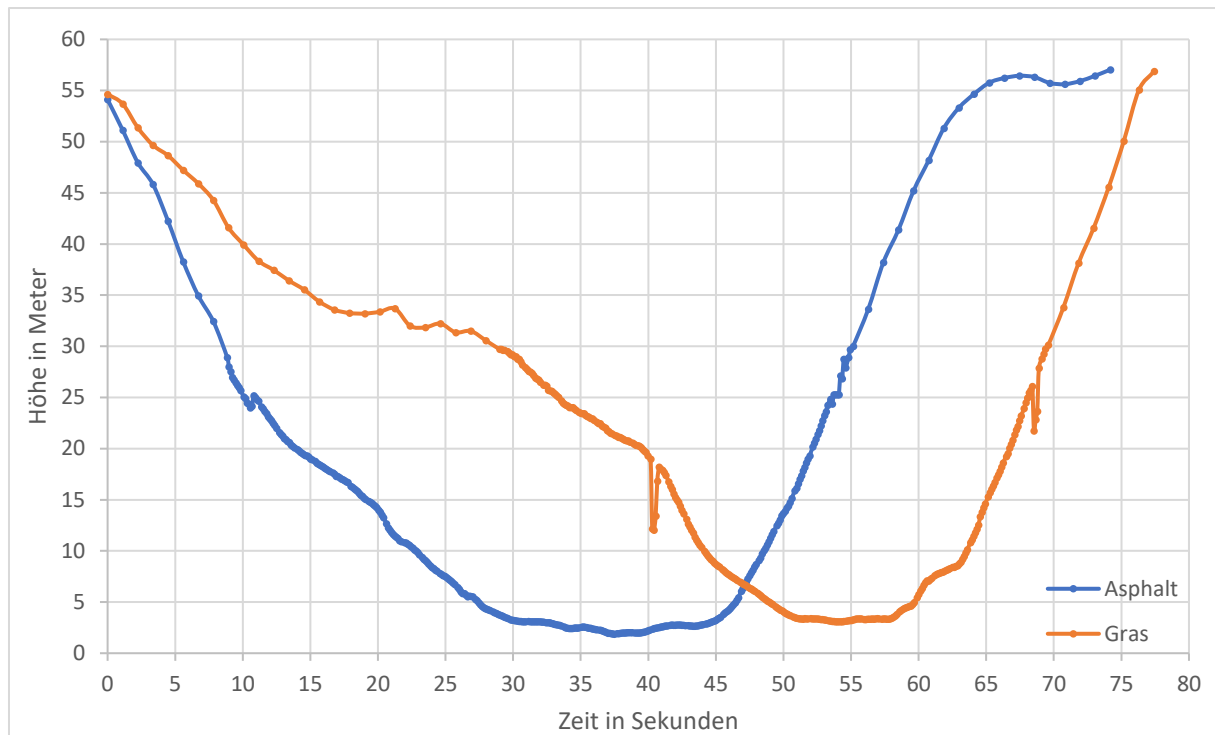


Abbildung 4-5: Messreihe bei verschiedenen Untergründen

Hierbei zeigt sich, dass beide Überflüge eine ähnliche Dauer von 74 bzw. 77 Sekunden hatten. Darüber hinaus stellt sich eindeutig dar, dass die Höchstwerte mit 57,04 m und 56,87 m nur eine kleine Abweichung aufzeigen und, im Vergleich zu den Messwerten aus Abbildung 4-4, deutlich höher liegen. Beim tiefen Überflug über die Graspiste sind zudem zwei Ausreißer bei 40 s und 68 s zu erkennen. Allerdings zeigen sich auch beim Überflug über Asphalt leichte Unstetigkeiten, wie z.B. bei Sekunde 11. Zudem ist die Frequenzänderung der Messwertaufzeichnung diesmal deutlich ab Höhen über 30 m sichtbar.

In Abbildung 4-6 sind die Messwerte für jeweils einen tiefen Überflug bzw. ein Touch-and-Go Manöver je Messflug aufgezeichnet, um den Einfluss des Umgebungslichts auf die Messwerte zu untersuchen.

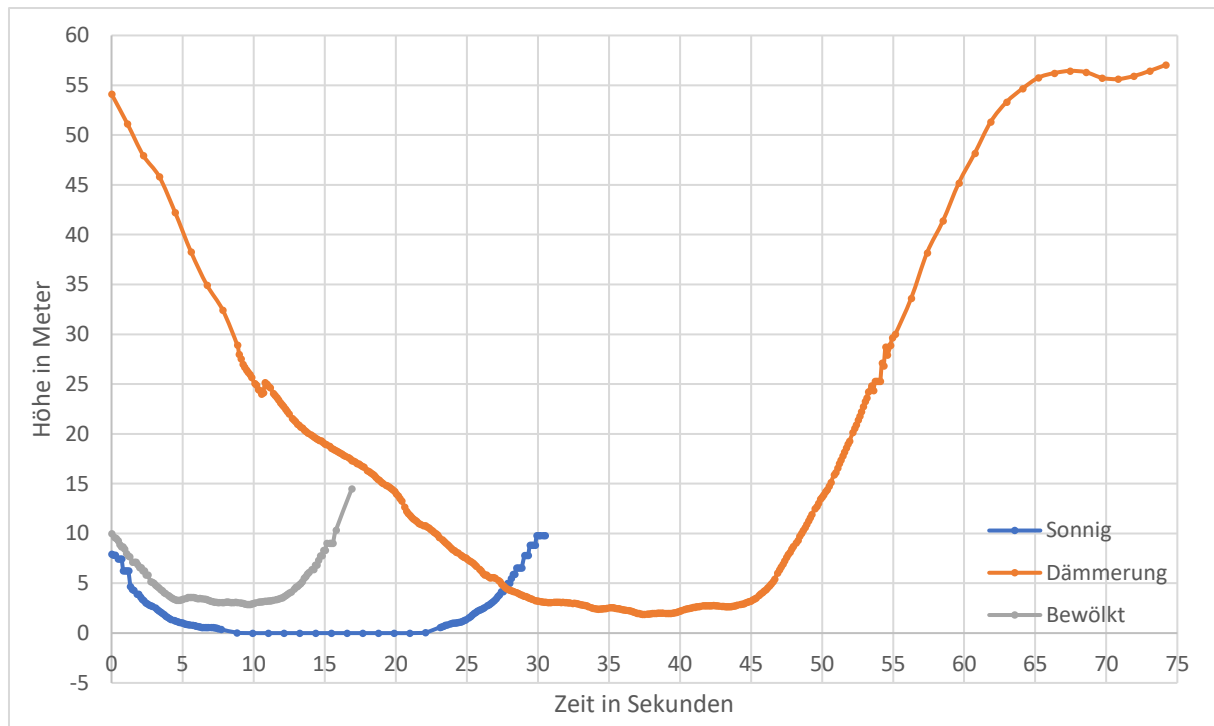


Abbildung 4-6: Messreihe bei verschiedenen Umgebungslichtbedingungen

Hierbei stellt die graue Messkurve die Werte eines tiefen Überflugs bei bewölktem Himmel, die blaue Messkurve eines Touch-and-Go Manövers bei sonnigem, wolkenfreiem Wetter und die orangene Messkurve eines tiefen Überflugs bei Dämmerung dar. Dabei zeigt sich, dass die Messkurven der Flüge bei sonnigem und bewölktem Wetter ihre Maximalwerte bei 9,81 m bzw. 14,49 m haben, wobei der Höchstwert des Messfluges in der Dämmerung bei 57,04 m liegt. Hierdurch ist die graue und blaue Messreihe deutlich kürzer als die orangene. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass beim Touch-and-Go Manöver während des Rollens auf der Landebahn, also wenn die Höhe 0 m über dem Boden beträgt, ebenfalls ein Frequenzwechsel der Messwertaufzeichnung auf 1 Messwert pro Sekunde erfolgt.

4.4. Auswertung / Erkenntnisse

Aus den Ergebnissen von Messflug 1 lässt sich erkennen, dass die Klappenstufe keine signifikanten Auswirkungen auf die maximale Reichweite des Sensors hat. Damit ist die Höhenmessung annähernd unabhängig von der Fluggeschwindigkeit und dem Anflugwinkel, da diese Parameter sich mit der Klappenstellung verändern. Die geringe Dauer des Fluges ohne ausgefahrene Klappen lässt sich auf eine höhere Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs zurückführen. Diese ist notwendig, um auch ohne Klappen den nötigen Auftrieb für den tiefen Überflug zu erzeugen. Dass die Messfrequenz bei Distanzen von über 10 m auf einen Messwert pro Sekunde reduziert wird, hängt mit der für diesen Messflug gewählten Software-Version zusammen. Für die folgenden Messflüge wurde entschieden, die Frequenz erst ab einer Höhe von 30 m über dem Boden zu reduzieren, die Software wurde entsprechend angepasst.

Der zweite Messflug zur Analyse des Sensorverhaltens bei unterschiedlichem Untergrund ergibt nach Analyse der Messwerte, dass zwischen Gras und Asphalt kein signifikanter Unterschied in den maximalen Reichweiten existiert. Die Messung über Gras resultierte in zwei Ausreißern, die sich

jedoch nicht eindeutig der Bodenbeschaffenheit zuschreiben lassen. Auch in den Messdaten, die über Asphalt aufgenommen wurden, ist eine Unstetigkeit an ähnlicher Stelle feststellbar. Grund könnte demnach auch ein Hindernis im Anflugbereich sein, wie Bäume oder Hochleitungsmasten der Bahntrasse. Daraus folgt, dass das Reflexionsverhalten verschiedener Untergründe die Messqualität geringfügig beeinflussen kann; größtenteils sind die Qualität und die maximale Reichweite der Messung allerdings unabhängig von der Pistenbeschaffenheit. Eine erkennbare Störung der Cockpit-Anzeige oder der Audio-Ansagen durch die kurzweiligen Ausreißer ist unwahrscheinlich. Somit ist der Sensor auch für die Nutzung auf Graspisten einsetzbar.

Da Messflug 2 in der Abenddämmerung durchgeführt wurde, wie in Abbildung 5-1 zu sehen, waren bessere Messleistungen des Sensors im Vergleich zu Messflug 1 zu erwarten. Die Messdaten zeigen, dass sich die maximale Reichweite tatsächlich erheblich erhöht hat. Im Diagramm in Abbildung 4-6 wird der Unterschied der Messleistung bei unterschiedlicher Sonneneinstrahlung deutlich: Bei sonnigem Wetter ist die Störung des Sensors durch einfallendes reflektiertes Sonnenlicht am wahrscheinlichsten, daher wird die geringste maximale Distanz erreicht; in der Abenddämmerung entsprechend mit Abstand die höchste. Bemerkenswert ist, dass auch starke Bewölkung, wie bei Messflug 1, nicht ausreicht, um die Sonneneinstrahlung der Mittagssonne ausreichend zu blockieren. Sein volles Potential zeigt der Sensor daher erst bei niedrigerer Sonneneinstrahlung.

In Messflug 2 und 3 wurde die aktualisierte Software genutzt, weshalb der Frequenzwechsel bei 30 m einsetzt. Selbiges geschieht bei einem Messwert von 0 m, was in den Messwerten zu Flug 3 im Rahmen der Touch-and-Gos zu sehen ist.

Während der Messflüge haben sich keine Abnutzungs- oder Verformungserscheinungen an Sensorhalterung oder Box gezeigt. Das Display war immer gut ablesbar und die für die Spannungsversorgung genutzte Powerbank konnte das System betreiben, ohne dass die Akku-Kapazität ein limitierender Faktor wurde. Die Befestigung des Sensorkabels am Flugzeug mit Gewebeklebeband musste zwischen den Messflügen an einigen Stellen erneuert werden, das Kabel war jedoch zu jedem Zeitpunkt ausreichend am Flugzeug befestigt. Aufgrund von Softwareproblemen konnte die Audio-Funktion nicht getestet werden, der Fokus der Messungen lag allerdings auf den Messdaten selbst, sodass das Risiko eines großen Software-Updates im Verlauf des Fliegerlagers nicht eingegangen wurde.

Basierend auf den gesammelten Ergebnissen wären zusätzliche Messflüge mit strenger definierten Vorgaben für die weitere Analyse empfehlenswert. In Verbindung mit einem Sensor mit höherer Reichweite und geringerer Störanfälligkeit und einem Prozessor, der der Arbeitslast und dem notwendigen Speicher dieser Anwendung etwas angemessener ist, könnte das Potential dieser Messmethode für die Luftfahrt so weiter gesteigert werden.

5. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein voll funktionsfähiger optischer Höhenmesser entwickelt und gebaut, welcher für eine Cessna 172 ausgelegt ist, jedoch mit geringem Aufwand auch an anderen Flugzeugen verwendet werden kann. Somit wurde gezeigt, dass zumindest für bestimmte Einsatzgebiete durchaus eine Alternative zu den herkömmlichen Radar-Höhenmessern existiert, die nicht nur leichter, kompakter und flexibler, sondern auch erheblich günstiger ist.

Die Messflüge zeigen, dass die Abstandsmessung weitestgehend unabhängig vom überflogenen Untergrund ist, jedoch vom Umgebungslicht stark beeinflusst wird. Durch das bedeutend bessere Messverhalten bei geringem Umgebungslicht liegt der Einsatz des Sensorsystems für Nachtflüge nah. Denkbar ist die Nutzung des Sensors vor allem in Sportflugzeugen, Ultraleichtflugzeugen oder Motorseglern als Unterstützung des Piloten bei Nacht-Sichtflügen zur Steigerung der Sicherheit im Landeanflug. Ein weiterer Einsatzzweck ist die Flugdatenaufzeichnung zwecks Debriefing und Fluganalyse in Flugschulen. Hier kann beispielsweise ein Anflug hinsichtlich Höhe und Sinkrate untersucht und nachbesprochen werden.

Durch die Nutzung höherpreisiger TOF- oder LIDAR-Sensoren kann die Reichweite auch bei Tageslicht erheblich gesteigert werden.

Dieses Projekt baut auf den Inhalten zahlreicher Lehrveranstaltungen auf und knüpft die Verbindung der gelernten Theorie mit der Praxis. So mussten Probleme gelöst werden, die in theoretischen Betrachtungen oftmals vernachlässigt werden, wie beispielsweise das Auftreten zu hoher Leitungskapazitäten und Verlustwiderstände. Die Organisation und Planung eines Projekts von Grund auf stellt eine weitere neue Erfahrung dar, die in Hinblick auf zukünftige Projekte zweifellos wertvoll ist.

Eine Weiterentwicklung des Sensorsystems ist sinnvoll, um die Einsatzmöglichkeiten auch bei Tageslicht und auf höhere Distanzen zu gewährleisten. Hierfür sollte ein Sensor gewählt werden, der eine höhere maximale Distanz und eine geringere Störempfindlichkeit besitzt. Zudem ist die Entwicklung eines PCB für das System in Betracht zu ziehen, um es kompakter und robuster zu machen.



Abbildung 5-1: Tiefer Überflug in der Abenddämmerung im Rahmen des zweiten Testflugs

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: TeraRanger Evo 60m im laufenden Betrieb	4
Abbildung 3-2: Infrarot-LEDs des Sensors im Detail	4
Abbildung 3-3: Displayausgabe bei einem tiefen Überflug	5
Abbildung 3-4: Schaltbild des Testaufbaus	7
Abbildung 3-5: Teile der Prototyp-Verschaltung auf Breadboards	8
Abbildung 3-6: Platine mit Display und Sensor	8
Abbildung 3-7: Sensorkabel mit integriertem I ² C-Extender-IC	9
Abbildung 3-8: Sensorhalterung mit charakteristischer 30°-Abschrägung und Kugelkopf	11
Abbildung 3-9: Gehäuse bei eingeschaltetem System ohne eingelegte microSD-Karte	11
Abbildung 4-1: Draufsicht auf die Sensorhalterung aus dem Flugzeug	12
Abbildung 4-2: Anbringung des Sensors an der Tragflächenstrebe	13
Abbildung 4-3: Befestigung des Sensorkabels am Flugzeug	13
Abbildung 4-4: Messreihe bei verschiedenen Klappenstellungen	15
Abbildung 4-5: Messreihe bei verschiedenen Untergründen	16
Abbildung 4-6: Messreihe bei verschiedenen Umgebungslichtbedingungen	17
Abbildung 5-1: Tiefer Überflug in der Abenddämmerung im Rahmen des zweiten Testflugs	19

7. Literatur

- [1] L. Ramadan, *Ground Proximity Warning System (GPWS): How does it work?* [Online]. Verfügbar unter: <https://theaviationbase.com/ground-proximity-warning-system-gpws/> (Zugriff am: 27. September 2021).
- [2] F.J. Yanovsky und A.V. Nebylov, „Radar Altimeters“ in *Aerospace Sensors*, 2013, S. 55–88. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/260275632_Radar_Altimeters
- [3] *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - D - Decision Height*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100578&lv3=100606> (Zugriff am: 25. September 2021).
- [4] *KRA 405B Radar Altimeter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bendixking.com/en/products/nc/navigation-and-communication/kra-405b> (Zugriff am: 25. September 2021).
- [5] Terabee, *A Brief Introduction to Time-of-Flight Sensing: Part 1 – The Basics*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.terabee.com/a-brief-introduction-to-time-of-flight-sensing-part-1-the-basics/> (Zugriff am: 25. September 2021).
- [6] Yida, *What is a Time of Flight Sensor and How does a ToF Sensor work?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/01/08/what-is-a-time-of-flight-sensor-and-how-does-a-tof-sensor-work/> (Zugriff am: 25. September 2021).
- [7] „Infrared Illumination for Time-of-Flight Applications“, *WP35 Infrared Illumination for Time-of-Flight Applications White Paper 20181126*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lumileds.com/wp-content/uploads/files/WP35.pdf>
- [8] Terabee, *A Brief Introduction to Time-of-Flight Sensing Part 2 – Indirect ToF Sensors*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.terabee.com/a-brief-introduction-to-time-of-flight-sensing-part-2-indirect-tof-sensors/> (Zugriff am: 25. September 2021).
- [9] N. X. Semiconductors, „UM10204 I2C-bus specification and user manual“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [10] Texas Instruments, Incorporated [SCPS145 und B], „P82B715 I2C Bus Extender datasheet (Rev. B)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/p82b715.pdf?ts=1629793620461&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fstore%252Fti%252Fen%252Fp%252Fproduct%252F%253Fp%253DP82B715P
- [11] Terabee, *Long Range TOF Sensor / Distance Sensor / Level Sensing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.terabee.com/shop/lidar-tof-range-finders/teraranger-evo-60m/> (Zugriff am: 29. September 2021).
- [12] „TeraRanger-Evo-User-Manual-Firmware-1.0.0“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.generationrobots.com/media/TeraRanger-Evo-User-Manual-Firmware-1.0.0.pdf>
- [13] „MP3_Player_Modul_Datenblatt“. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.shopify.com/s/files/1/1509/1638/files/MP3_Player_Modul_Datenblatt.pdf?10537896017176417241
- [14] Last Minute Engineers, *In-Depth Tutorial to Interface Micro SD Card Module with Arduino*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lastminuteengineers.com/arduino-micro-sd-card-module-tutorial/> (Zugriff am: 29. September 2021).
- [15] GitHub, *Terabee/sample_codes: This repository provides sample codes for Terabee products*. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/Terabee/sample_codes/blob/master/Arduino/TeraRanger_single_point_Arduino_I2C/TeraRanger_single_point_Arduino_I2C.ino (Zugriff am: 4. Oktober 2021).
- [16] WoodUino.ca, *Big Font LCD Characters*. [Online]. Verfügbar unter: <http://woodsgood.ca/projects/2015/02/17/big-font-lcd-characters/> (Zugriff am: 4. Oktober 2021).

- [17] M. Johnston, *Wing Flaps: How Do They Function and What Is Their Purpose?* [Online]. Verfügbar unter: <https://calaero.edu/wing-flaps-function-and-purpose/> (Zugriff am: 30. September 2021).

8. Anhang

Anhang 1 - Eingebundene Arduino-Bibliotheken

Wire	Erlaubt den Aufbau der Kommunikation mit anderen Geräten über das I ² C-Protokoll
LiquidCrystal_I2C	Bietet Befehle für die Ansteuerung eines LCDs über I ² C
SD	Liefert die notwendigen Methoden zum Datenaustausch mit einer SD-Karte
SoftwareSerial	Wird benötigt, um eine serielle UART-Verbindung über einfache GPIO-Pins umzusetzen
DFRobotDFPlayerMini	Bibliothek zur Unterstützung des MP3-Moduls mit entsprechenden Befehlen zur Steuerung des Audio-Playbacks

Anhang 2 - Code

```

/*
AltiSense Version 1.1

Programm zur Distanzmessung mit dem TeraRanger Evo 60m TOF Sensor, Ausgabe der Messwerte
über ein Display, Datenspeicherung auf einer SD-Karte, Audioausgabe über das DFPlayer mini
MP3-Modul

Bearbeitet am 05.10.2021
*/

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SD.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <DFRobotDFPlayerMini.h>

#define SENSOR_ADDR 0x31 // Sensoradresse definieren

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // LCD-Objekt erstellen

File myFile; // Datei-Objekt erstellen

SoftwareSerial mySoftwareSerial(5,6); // (RX,TX) SoftwareSerial-Objekt erstellen
DFRobotDFPlayerMini myDFPlayer; // DFPlayer-Objekt für die MP3-Steuerung erstellen

// Definition custom Zeichensatz
const char custom[][8] PROGMEM = {
    { 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // char 1
    { 0x18, 0x1C, 0x1E, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F }, // char 2

```

```

    { 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x0F, 0x07, 0x03 }, // char 3
    { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x1F, 0x1F, 0x1F }, // char 4
    { 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1E, 0x1C, 0x18 }, // char 5
    { 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x00, 0x00, 0x00, 0x1F, 0x1F }, // char 6
    { 0x1F, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x1F, 0x1F, 0x1F }, // char 7
    { 0x03, 0x07, 0x0F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F, 0x1F } // char 8
};

// Definition große Zeichen

const char bigChars[][8] PROGMEM = {
    { 0x20, 0x20, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // Space
    { 0xFF, 0x07, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // !
    { 0x05, 0x05, 0x20, 0x20, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // "
    { 0x04, 0xFF, 0x04, 0xFF, 0x04, 0x01, 0xFF, 0x01 }, // #
    { 0x08, 0xFF, 0x06, 0x07, 0xFF, 0x05, 0x00, 0x00 }, // $
    { 0x01, 0x20, 0x04, 0x01, 0x04, 0x01, 0x20, 0x04 }, // %
    { 0x08, 0x06, 0x02, 0x20, 0x03, 0x07, 0x02, 0x04 }, // &
    { 0x05, 0x20, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // '
    { 0x08, 0x01, 0x03, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // (
    { 0x01, 0x02, 0x04, 0x05, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // )
    { 0x01, 0x04, 0x04, 0x01, 0x04, 0x01, 0x01, 0x04 }, // *
    { 0x04, 0xFF, 0x04, 0x01, 0xFF, 0x01, 0x00, 0x00 }, // +
    { 0x20, 0x05, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // ,
    { 0x04, 0x04, 0x04, 0x20, 0x20, 0x20, 0x00, 0x00 }, // -
    { 0x20, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // .
    { 0x20, 0x20, 0x04, 0x01, 0x04, 0x01, 0x20, 0x20 }, // /
    { 0x08, 0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x00, 0x00 }, // 0
    { 0x01, 0x02, 0x20, 0x04, 0xFF, 0x04, 0x00, 0x00 }, // 1
    { 0x06, 0x06, 0x02, 0xFF, 0x07, 0x07, 0x00, 0x00 }, // 2
    { 0x01, 0x06, 0x02, 0x04, 0x07, 0x05, 0x00, 0x00 }, // 3
    { 0x03, 0x04, 0xFF, 0x20, 0x20, 0xFF, 0x00, 0x00 }, // 4
    { 0xFF, 0x06, 0x06, 0x07, 0x07, 0x05, 0x00, 0x00 }, // 5
    { 0x08, 0x06, 0x06, 0x03, 0x07, 0x05, 0x00, 0x00 }, // 6
    { 0x01, 0x01, 0x02, 0x20, 0x08, 0x20, 0x00, 0x00 }, // 7
    { 0x08, 0x06, 0x02, 0x03, 0x07, 0x05, 0x00, 0x00 }, // 8
    { 0x08, 0x06, 0x02, 0x07, 0x07, 0x05, 0x00, 0x00 }, // 9
    { 0xA5, 0xA5, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // :
    { 0x04, 0x05, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // ;
    { 0x20, 0x04, 0x01, 0x01, 0x01, 0x04, 0x00, 0x00 }, // <
    { 0x04, 0x04, 0x04, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x00 }, // =
    { 0x01, 0x04, 0x20, 0x04, 0x01, 0x01, 0x00, 0x00 }, // >
    { 0x01, 0x06, 0x02, 0x20, 0x07, 0x20, 0x00, 0x00 }, // ?
    { 0x08, 0x06, 0x02, 0x03, 0x04, 0x04, 0x00, 0x00 }, // @
    { 0x08, 0x06, 0x02, 0xFF, 0x20, 0xFF, 0x00, 0x00 }, // A
    { 0xFF, 0x06, 0x05, 0xFF, 0x07, 0x02, 0x00, 0x00 }, // B
    { 0x08, 0x01, 0x01, 0x03, 0x04, 0x04, 0x00, 0x00 }, // C
    { 0xFF, 0x01, 0x02, 0xFF, 0x04, 0x05, 0x00, 0x00 }, // D
    { 0xFF, 0x06, 0x06, 0xFF, 0x07, 0x07, 0x00, 0x00 }, // E
    { 0xFF, 0x06, 0x06, 0xFF, 0x20, 0x20, 0x00, 0x00 }, // F
    { 0x08, 0x01, 0x01, 0x03, 0x04, 0x02, 0x00, 0x00 }, // G
    { 0xFF, 0x04, 0xFF, 0xFF, 0x20, 0xFF, 0x00, 0x00 }, // H
    { 0x01, 0xFF, 0x01, 0x04, 0xFF, 0x04, 0x00, 0x00 }, // I
    { 0x20, 0x20, 0xFF, 0x04, 0x04, 0x05, 0x00, 0x00 }, // J
    { 0xFF, 0x04, 0x05, 0xFF, 0x20, 0x02, 0x00, 0x00 }, // K
    { 0xFF, 0x20, 0x20, 0xFF, 0x04, 0x04, 0x00, 0x00 }, // L
    { 0x08, 0x03, 0x05, 0x02, 0xFF, 0x20, 0x20, 0xFF }, // M
    { 0xFF, 0x02, 0x20, 0xFF, 0xFF, 0x20, 0x03, 0xFF }, // N
    { 0x08, 0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x00, 0x00 }, // O
    { 0x08, 0x06, 0x02, 0xFF, 0x20, 0x20, 0x00, 0x00 }, // P
    { 0x08, 0x01, 0x02, 0x20, 0x03, 0x04, 0xFF, 0x04 }, // Q
    { 0xFF, 0x06, 0x02, 0xFF, 0x20, 0x02, 0x00, 0x00 }, // R
    { 0x08, 0x06, 0x06, 0x07, 0x07, 0x05, 0x00, 0x00 }, // S
    { 0x01, 0xFF, 0x01, 0x20, 0xFF, 0x20, 0x00, 0x00 }, // T
    { 0xFF, 0x20, 0xFF, 0x03, 0x04, 0x05, 0x00, 0x00 }, // U
    { 0x03, 0x20, 0x20, 0x05, 0x20, 0x02, 0x08, 0x20 }, // V
    { 0xFF, 0x20, 0x20, 0xFF, 0x03, 0x08, 0x02, 0x05 }, // W
    { 0x03, 0x04, 0x05, 0x08, 0x20, 0x02, 0x00, 0x00 }, // X
    { 0x03, 0x04, 0x05, 0x20, 0xFF, 0x20, 0x00, 0x00 }, // Y
    { 0x01, 0x06, 0x05, 0x08, 0x07, 0x04, 0x00, 0x00 }, // Z
    { 0xFF, 0x01, 0xFF, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // [
    { 0x01, 0x04, 0x20, 0x20, 0x20, 0x20, 0x01, 0x04 }, // Backslash

```

```

        { 0x01, 0xFF, 0x04, 0xFF, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // ]
        { 0x08, 0x02, 0x20, 0x20, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }, // ^
        { 0x20, 0x20, 0x20, 0x04, 0x04, 0x04, 0x00, 0x00 } // _
};

byte col,row,nb=0,bc=0;
byte bb[8]; // byte buffer zum Lesen aus PROGMEM

// Tabelle für zyklische Redundanzchecks der "crc8" Funktion
static const uint8_t crc_table[] = {
    0x00, 0x07, 0x0e, 0x09, 0x1c, 0x1b, 0x12, 0x15, 0x38, 0x3f, 0x36, 0x31,
    0x24, 0x23, 0x2a, 0x2d, 0x70, 0x77, 0x7e, 0x79, 0x6c, 0x6b, 0x62, 0x65,
    0x48, 0x4f, 0x46, 0x41, 0x54, 0x53, 0x5a, 0x5d, 0xe0, 0xe7, 0xee, 0xe9,
    0xfc, 0xfb, 0xf2, 0xf5, 0xd8, 0xdf, 0xd6, 0xd1, 0xc4, 0xc3, 0xca, 0xcd,
    0x90, 0x97, 0x9e, 0x99, 0x8c, 0x8b, 0x82, 0x85, 0xa8, 0xaf, 0xa6, 0xa1,
    0xb4, 0xb3, 0xba, 0xbd, 0xc7, 0xc0, 0xc9, 0xce, 0xdb, 0xdc, 0xd5, 0xd2,
    0xff, 0xf8, 0xf1, 0xf6, 0xe3, 0xe4, 0xed, 0xea, 0xb7, 0xb0, 0xb9, 0xbe,
    0xab, 0xac, 0xa5, 0xa2, 0x8f, 0x88, 0x81, 0x86, 0x93, 0x94, 0x9d, 0x9a,
    0x27, 0x20, 0x29, 0x2e, 0x3b, 0x3c, 0x35, 0x32, 0x1f, 0x18, 0x11, 0x16,
    0x03, 0x04, 0x0d, 0x0a, 0x57, 0x50, 0x59, 0x5e, 0x4b, 0x4c, 0x45, 0x42,
    0x6f, 0x68, 0x61, 0x66, 0x73, 0x74, 0x7d, 0x7a, 0x89, 0x8e, 0x87, 0x80,
    0x95, 0x92, 0x9b, 0x9c, 0xb1, 0xb6, 0xbf, 0xb8, 0xad, 0xaa, 0xa3, 0xa4,
    0xf9, 0xfe, 0xf7, 0xf0, 0xe5, 0xe2, 0xeb, 0xec, 0xc1, 0xc6, 0xcf, 0xc8,
    0xdd, 0xda, 0xd3, 0xd4, 0x69, 0x6e, 0x67, 0x60, 0x75, 0x72, 0x7b, 0x7c,
    0x51, 0x56, 0x5f, 0x58, 0x4d, 0x4a, 0x43, 0x44, 0x19, 0x1e, 0x17, 0x10,
    0x05, 0x02, 0x0b, 0x0c, 0x21, 0x26, 0x2f, 0x28, 0x3d, 0x3a, 0x33, 0x34,
    0x4e, 0x49, 0x40, 0x47, 0x52, 0x55, 0x5c, 0x5b, 0x76, 0x71, 0x78, 0x7f,
    0x6a, 0x6d, 0x64, 0x63, 0x3e, 0x39, 0x30, 0x37, 0x22, 0x25, 0x2c, 0x2b,
    0x06, 0x01, 0x08, 0x0f, 0x1a, 0x1d, 0x14, 0x13, 0xae, 0xa9, 0xa0, 0xa7,
    0xb2, 0xb5, 0xbc, 0xbb, 0x96, 0x91, 0x98, 0x9f, 0x8a, 0x8d, 0x84, 0x83,
    0xde, 0xd9, 0xd0, 0xd7, 0xc2, 0xc5, 0xcc, 0xcb, 0xe6, 0xe1, 0xe8, 0xef,
    0xfa, 0xfd, 0xf4, 0xf3
};

// ***** GLOBALE VARIABLEN ***** //

uint8_t buf[3]; // "buf[3]" nimmt Datenframe des Sensors auf

uint16_t offset; // Variable für die Speicherung des Offset-Werts für die Justierung

uint16_t distBuf = 0; // Pufferspeicher für Distanz der vergangenen Messung

uint8_t announced = 0; // Indikatorvariable für Die Höhenansage

uint8_t timeDiv = 0; // Zählervariable für Frequenzteiler der Display- und Audioausgabe

String filename; // Variable für den inkrementierenden Dateinamen

// ***** //

// ***** //
//
//          SETUP
//
// ***** //

void setup() {

    Wire.begin(); // I2C Bus als Master beitreten

    // LCD initialisieren
    lcd.begin();
    for (nb=0; nb<8; nb++) { // Erstellung von 8 custom Zeichen
        for (bc=0; bc<8; bc++) bb[bc]= pgm_read_byte( &custom[nb][bc] );
        lcd.createChar ( nb+1, bb );
    }
    lcd.clear();
    lcd.backlight();

    // SD initialisieren
    while (!SD.begin(10)) {
        writeBigString("SD", 0, 0); // Blinkende Displayanzeige "SD" bei fehlender SD-Karte
    }
}

```

```

    delay(1500);
    lcd.clear();
}

//Startbildschirm
writeBigString("LOAD", 0, 0);          // Ladebildschirm für restliche Setup()-Funktion

// Datei mit inkrementiertem, einzigartigem Namen erstellen und öffnen
for (uint8_t n = 0; n <= 1000; n++){
    String i_str = String(n);
    if (!SD.exists(String("data_" + i_str + ".csv"))){
        filename = String("data_" + i_str + ".csv");
        break;
    }
}

myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
if(myFile){
    myFile.println("TIMESTAMP;ENTFERNUNG");
    myFile.close();
}

// MP3 Modul initialisieren
mySoftwareSerial.begin(9600);
myDFPlayer.begin(mySoftwareSerial);
myDFPlayer.volume(10);
myDFPlayer.playMp3Folder(7);          // Test-Audio "Minimums" für Audio-Konfiguration

// Justieren
pinMode(2, INPUT_PULLUP);
if (digitalRead(2) == LOW) {          // Knopf gedrückt:
    offset = messen();                 // Offset wird gemessen und in "offset.txt" gespeichert
    if (SD.exists("offset.txt")) {
        SD.remove("offset.txt");
    }

    myFile = SD.open("offset.txt", FILE_WRITE);
    if(myFile){

        myFile.write(buf[0]);
        myFile.write(buf[1]);

        myFile.close();
    }
}
else {
    myFile = SD.open("offset.txt", FILE_READ);          // Knopf nicht gedrückt:
    if(myFile.available() > 0){                         // Offsetwert aus Datei wird übernommen
        offset = ((uint16_t) myFile.read() << 8) | (uint16_t) myFile.read();
        myFile.close();
    }
    else {
        offset = 0;
    }
}

}

lcd.clear();          // Ladebildschirm wird zurückgesetzt
}

// *****
//                               MAIN LOOP
// *****

void loop() {

    // ***** VARIABLEN *****

```

```

uint16_t distance = 0; // "distance" enthält Abstand in mm, wird um Offset korrigiert
float distance_m = 0; // Distanz als Gleitkommazahl in Metern
char distance_c[5]; // Distanz als String für die Ausgabe auf dem Display

// *****

distance = messen();

if (distance<=offset) // Wenn gemessene Distanz < Offset:
{ // Distanz als 0 setzen
    distance = 0.0;
}
else // Sonst: Distanz um Offset korrigieren
{
    distance = distance-offset;
}

distance_m = (float) distance / 1000.0;
dtostrf(distance_m, 5, 1, distance_c);

if((distance_m<=30.0) && (distance_m>0.4)){ // Grenzen, ab denen Messfrequenz 1/sek ist

    // in Datei speichern
    myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
    if(myFile){
        unsigned long t = millis(); // Timestamp bekommen
        myFile.print(t);
        myFile.print(";");
        myFile.println(distance);
        myFile.close();
    }

    if(timeDiv<9){ // Frequenzteiler für die Display- und Audioausgabe

        timeDiv++; // -> Jedes 10. mal werden Display- und Audiofunktionen aufgerufen

    }
    else{

        timeDiv = 0;
        // Ausagabe auf Display
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.clear();
        writeBigString(distance_c, 0, 0);
        writeBigChar('M', 12, 0);

        // Audio-Callout MP3-Modul
        if ((distBuf-distance > 50) && (distBuf > distance)){

            callout(distance, mySoftwareSerial);

            distBuf = distance;
        }

    }

    delay(100); // Warten von 1/10 sek -> Frequenz ~10/sek

}

else{ // Frequenz für Messung ebenfalls 1/sek:

    // Ausagabe auf Display
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.clear();
    writeBigString(distance_c, 0, 0);
    writeBigChar('M', 12, 0);

    // in Datei speichern
    myFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);

```

```

    if(myFile){
        unsigned long t = millis();                // Timestamp bekommen
        myFile.print(t);
        myFile.print(";");
        myFile.println(distance);
        myFile.close();
    }

    // Audio-Callout MP3-Modul
    if ((distBuf-distance > 50) && (distBuf > distance)){

        callout(distance, mySoftwareSerial);

        distBuf = distance;
    }

    delay(1000);                                // 1 sek warten -> Frequenz 1/sek
}

}

// *****
//                                     SUBROUTINEN
// *****

// CRC-Funktion zur Berechnung der Checksumme
uint8_t crc8(uint8_t *p, uint8_t len) {
    uint8_t i;
    uint8_t crc = 0x0;
    while (len--) {
        i = (crc ^ *p++) & 0xFF;
        crc = (crc_table[i] ^ (crc << 8)) & 0xFF;
    }
    return crc & 0xFF;
}

// writeBigChar: Schreibt großes Zeichen 'ch' in Spalte x, Zeile y;
// gibt Anzahl der von 'ch' verwendeten Spalten zurück
int writeBigChar(char ch, byte x, byte y) {
    if (ch < ' ' || ch > '_') return 0;                // Wenn außerhalb Tabelle: Keine Aktion
    nb=0;                                              // Byte Zähler für Zeichen
    for (bc=0; bc<8; bc++) {
        bb[bc] = pgm_read_byte( &bigChars[ch-' '][bc] ); // 8 Bytes aus PROGMEM lesen
        if(bb[bc] != 0) nb++;
    }

    bc=0;
    for (row = y; row < y+2; row++) {
        for (col = x; col < x+nb/2; col++) {
            lcd.setCursor(col, row);                    // gehe zu Position
            lcd.write(bb[bc++]);                        // Schreibt Byte und zählt hoch
        }
    }
    return nb/2-1;                                    // gibt Anzahl Spalten des Zeichens zurück
}

// writeBigString: Schreibt jeden Buchstaben des Strings
void writeBigString(char *str, byte x, byte y) {
    char c;
    while ((c = *str++))
        x += writeBigChar(c, x, y) + 1;
}

// Funktion zum Entfernung messen
uint16_t messen() {

    uint16_t dist;
    uint8_t CRC = 0;                                // "CRC" enthält Checksumme zum Vergleich mit Sensor

```

```

Wire.beginTransmission(SENSOR_ADDR); // Nachricht über I2C an Sensor übermitteln
Wire.write(0x00); // trigger byte senden
Wire.endTransmission(); // Übertragung beenden

delay(0.5); // Delay zwischen einzelnen Übertragungen

Wire.requestFrom(SENSOR_ADDR, 3); // Drei Bytes vom Sensor anfordern und auslesen
buf[0] = Wire.read(); // Erstes Messwert-Byte
buf[1] = Wire.read(); // Zweites Messwert-Byte
buf[2] = Wire.read(); // Checksummen-Byte

CRC = crc8(buf, 2); // Erzeugt Checksumme aus beiden empfangenen Bytes

if (CRC == buf[2]) { // Vergleich der Checksummen. Wenn identisch:
    dist = (buf[0]<<8) + buf[1]; // Distanz wird berechnet und zurückgegeben
}
else {
    dist = 0;
}

return dist;
}

// Funktion für die Audioausgabe der Höhen-Callouts
void callout(uint16_t xdistance, SoftwareSerial xmySoftwareSerial) {

    if (myDFPlayer.begin(mySoftwareSerial)){

        if ((announced != 1) && xdistance < 52000 && xdistance > 48000){
            myDFPlayer.playMp3Folder(1);
            announced = 1;
        }
        else if ((announced != 2) && xdistance < 42000 && xdistance > 38000){
            myDFPlayer.playMp3Folder(2);
            announced = 2;
        }
        else if ((announced != 3) && xdistance < 32000 && xdistance > 28000){
            myDFPlayer.playMp3Folder(3);
            announced = 3;
        }
        else if ((announced != 4) && xdistance < 22000 && xdistance > 18000){
            myDFPlayer.playMp3Folder(4);
            announced = 4;
        }
        else if ((announced != 5) && xdistance < 12000 && xdistance > 9000){
            myDFPlayer.playMp3Folder(5);
            announced = 5;
        }
        else if ((announced != 6) && xdistance < 6000 && xdistance > 4000){
            myDFPlayer.playMp3Folder(6);
            announced = 6;
        }
    }

}

/*

Teile dieses Codes orientieren sich an folgenden Quellen:

http://woodsgood.ca/projects/2015/02/17/big-font-lcd-characters/

https://github.com/Terabee/sample\_codes/blob/master/Arduino/TeraRanger\_single\_point\_Arduino\_I2C/TeraRanger\_single\_point\_Arduino\_I2C.ino

*/

```


Anhang 3 - Vollständige Messwerte

a) Messwerte zur Analyse des Einflusses der Lichtbedingungen

Sonnig

0	7,945	4,388	1,285	16,552	0	26,674	2,99
0,122	7,86	4,51	1,22	17,664	0	26,796	3,125
0,244	7,86	4,636	1,165	18,769	0	26,918	3,295
0,459	7,455	4,758	1,11	19,874	0	27,047	3,47
0,581	7,455	4,888	1,06	20,979	0	27,169	3,71
0,703	7,455	5,01	1,015	22,085	0,07	27,291	3,855
0,825	6,275	5,131	0,95	23,115	0,585	27,413	4,18
0,946	6,275	5,253	0,905	23,237	0,655	27,543	4,18
1,067	6,275	5,375	0,87	23,359	0,725	27,748	4,585
1,189	6,275	5,497	0,825	23,48	0,8	27,869	5,03
1,321	4,71	5,712	0,8	23,616	0,85	28	5,03
1,443	4,41	5,834	0,765	23,822	0,95	28,122	5,495
1,565	4,305	5,956	0,72	23,943	1	28,244	5,93
1,779	3,92	6,078	0,67	24,064	1,015	28,366	5,93
1,901	3,92	6,198	0,635	24,186	1,045	28,492	6,57
2,023	3,635	6,329	0,59	24,308	1,065	28,614	6,57
2,144	3,42	6,45	0,585	24,43	1,095	28,736	6,57
2,265	3,265	6,572	0,59	24,552	1,13	28,858	6,57
2,387	3,05	6,693	0,595	24,681	1,205	29,063	7,8
2,509	2,945	6,815	0,59	24,803	1,275	29,185	7,8
2,631	2,825	7,021	0,595	24,924	1,36	29,314	7,8
2,753	2,78	7,143	0,57	25,13	1,54	29,436	8,85
2,875	2,705	7,264	0,545	25,251	1,665	29,558	8,85
3,08	2,53	7,385	0,505	25,373	1,84	29,68	8,85
3,202	2,37	7,507	0,465	25,495	1,985	29,802	8,85
3,324	2,26	7,713	0,38	25,617	2,1	29,924	9,81
3,445	2,11	8,819	0,045	25,738	2,21	30,045	9,81
3,567	1,995	9,924	0	25,86	2,315	30,166	9,81
3,689	1,865	11,029	0	25,982	2,39	30,372	9,81
3,811	1,72	12,134	0	26,103	2,475	30,494	9,81
3,932	1,61	13,238	0	26,225	2,56		
4,06	1,485	14,343	0	26,431	2,77		
4,182	1,395	15,448	0	26,553	2,875		

Bewölkt

0	9,985	0,562	8,895	1,037	8,005	1,593	7,125
0,212	9,6	0,678	8,665	1,153	7,785	1,71	7,125
0,328	9,51	0,794	8,665	1,277	7,685	1,827	6,895
0,445	9,29	0,911	8,46	1,477	7,125	1,956	6,605

2,072	6,605
2,188	6,255
2,305	6,255
2,426	5,855
2,542	5,855
2,742	5,175
2,859	5,1
2,976	5,015
3,091	4,825
3,208	4,7
3,325	4,555
3,44	4,38
3,564	4,265
3,681	4,09
3,797	4
3,997	3,795
4,114	3,67
4,231	3,525
4,347	3,445
4,463	3,37
4,58	3,31
4,696	3,3
4,813	3,315
4,929	3,385
5,045	3,45
5,255	3,515
5,372	3,6
5,502	3,6

5,618	3,595
5,741	3,59
5,858	3,57
5,975	3,52
6,092	3,485
6,208	3,495
6,324	3,485
6,525	3,43
6,641	3,405
6,758	3,335
6,874	3,28
6,995	3,215
7,111	3,19
7,228	3,125
7,345	3,13
7,461	3,095
7,577	3,075
7,778	3,085
7,895	3,085
8,019	3,12
8,135	3,145
8,252	3,115
8,368	3,1
8,485	3,1
8,601	3,08
8,717	3,13
8,834	3,095
9,048	3,055

9,164	3,03
9,28	2,99
9,406	2,94
9,523	2,905
9,639	2,9
9,755	2,91
9,872	2,955
9,988	2,995
10,105	3,045
10,314	3,11
10,429	3,15
10,546	3,155
10,662	3,17
10,778	3,2
10,895	3,205
11,011	3,235
11,128	3,235
11,244	3,275
11,36	3,3
11,561	3,375
11,682	3,415
11,797	3,47
11,914	3,53
12,031	3,58
12,146	3,705
12,263	3,79
12,38	3,91
12,516	4,065

12,632	4,15
12,833	4,43
12,949	4,625
13,065	4,685
13,182	4,845
13,298	4,985
13,414	5,175
13,541	5,525
13,657	5,675
13,774	5,945
13,89	6,105
14,09	6,405
14,207	6,405
14,324	6,845
14,44	6,845
14,556	7,315
14,681	7,785
14,798	7,785
14,913	8,31
15,03	8,31
15,147	9,03
15,346	9,03
15,463	9,03
15,58	9,03
15,792	10,34
16,905	14,49

Dämmerung

0	54,121
1,119	51,121
2,236	47,951
3,354	45,831
4,472	42,241
5,589	38,281
6,708	34,951
7,825	32,431
8,847	28,92
8,969	28,005
9,109	27,53
9,23	26,985
9,352	26,715
9,484	26,425
9,606	26,18

9,727	25,98
9,848	25,68
10,074	25,06
10,195	24,905
10,317	24,455
10,438	24,375
10,557	24,005
10,679	24,145
10,801	25,175
10,921	25,005
11,043	24,775
11,164	24,66
11,381	24,09
11,503	23,89
11,624	23,655

11,746	23,435
11,867	23,13
11,988	22,945
12,109	22,755
12,231	22,49
12,359	22,28
12,481	22,005
12,698	21,58
12,819	21,405
12,941	21,25
13,062	20,98
13,183	20,895
13,304	20,705
13,436	20,605
13,557	20,365

13,678	20,245
13,809	20,085
14,026	19,93
14,148	19,805
14,269	19,66
14,391	19,55
14,512	19,44
14,633	19,34
14,761	19,305
14,882	19,17
15,004	19,005
15,125	18,94
15,346	18,77
15,468	18,575
15,589	18,495

15,711	18,39
15,831	18,29
15,952	18,205
16,074	18,095
16,195	18,005
16,317	17,865
16,438	17,76
16,655	17,635
16,777	17,51
16,897	17,31
17,019	17,295
17,147	17,19
17,269	17,05
17,39	16,99
17,512	16,88
17,644	16,76
17,765	16,695
17,983	16,335
18,104	16,245
18,235	16,095
18,356	15,96
18,477	15,835
18,598	15,65
18,72	15,455
18,841	15,36
18,963	15,17
19,084	15,055
19,302	14,85
19,43	14,77
19,551	14,67
19,673	14,52
19,793	14,385
19,915	14,24
20,036	13,985
20,162	13,785
20,284	13,53
20,405	13,275
20,623	12,66
20,745	12,26
20,865	12,03
20,987	11,82
21,109	11,65
21,231	11,49
21,353	11,36
21,475	11,23

21,596	11,01
21,736	10,915
21,954	10,81
22,075	10,795
22,197	10,68
22,319	10,575
22,44	10,415
22,571	10,285
22,693	10,11
22,815	10,005
22,937	9,86
23,059	9,625
23,264	9,4
23,386	9,21
23,507	9,065
23,629	8,9
23,751	8,735
23,873	8,555
23,994	8,39
24,123	8,29
24,245	8,14
24,367	8,055
24,571	7,83
24,693	7,72
24,815	7,615
24,937	7,545
25,062	7,41
25,184	7,275
25,306	7,16
25,427	7,05
25,548	6,895
25,67	6,73
25,887	6,435
26,008	6,255
26,13	6,02
26,252	5,86
26,381	5,855
26,502	5,69
26,623	5,55
26,745	5,595
26,877	5,58
26,998	5,53
27,204	5,3
27,326	5,165
27,447	4,93

27,569	4,75
27,69	4,595
27,811	4,48
27,933	4,38
28,055	4,315
28,177	4,24
28,298	4,185
28,503	4,075
28,625	3,975
28,753	3,895
28,875	3,825
28,997	3,74
29,119	3,69
29,24	3,62
29,362	3,54
29,483	3,465
29,605	3,4
29,81	3,285
29,932	3,25
30,064	3,23
30,186	3,18
30,312	3,165
30,433	3,125
30,555	3,125
30,676	3,1
30,798	3,095
30,919	3,1
31,133	3,115
31,264	3,11
31,386	3,11
31,507	3,105
31,629	3,1
31,751	3,11
31,871	3,085
31,993	3,095
32,115	3,055
32,237	3,05
32,442	3,005
32,564	3,01
32,685	2,99
32,806	2,95
32,928	2,9
33,05	2,86
33,172	2,815
33,293	2,79

33,422	2,75
33,544	2,68
33,748	2,585
33,87	2,5
33,992	2,48
34,125	2,45
34,247	2,425
34,368	2,43
34,49	2,46
34,612	2,49
34,733	2,48
34,854	2,515
35,06	2,575
35,182	2,58
35,304	2,56
35,43	2,52
35,561	2,465
35,69	2,465
35,812	2,405
35,934	2,38
36,055	2,345
36,177	2,325
36,382	2,28
36,504	2,25
36,626	2,195
36,748	2,13
36,87	2,06
36,99	1,98
37,112	1,98
37,234	1,945
37,356	1,905
37,478	1,89
37,683	1,925
37,804	1,935
37,926	1,955
38,055	1,99
38,187	1,99
38,309	2,01
38,431	2,035
38,552	2,04
38,674	2,03
38,796	2,02
39,002	1,985
39,122	1,985
39,244	1,99

39,366	2,01
39,488	2,03
39,609	2,06
39,731	2,095
39,862	2,16
39,984	2,225
40,104	2,285
40,31	2,375
40,44	2,43
40,562	2,465
40,681	2,495
40,803	2,53
40,924	2,59
41,045	2,61
41,167	2,655
41,289	2,68
41,411	2,7
41,616	2,755
41,738	2,77
41,86	2,76
41,981	2,765
42,103	2,775
42,225	2,78
42,356	2,79
42,478	2,765
42,6	2,765
42,729	2,73
42,935	2,71
43,056	2,695
43,177	2,68
43,299	2,67
43,421	2,67
43,542	2,675
43,664	2,69
43,786	2,74

43,908	2,78
44,029	2,82
44,244	2,89
44,365	2,92
44,487	2,965
44,609	3,04
44,731	3,11
44,852	3,17
44,973	3,215
45,103	3,35
45,224	3,45
45,345	3,53
45,551	3,81
45,673	3,965
45,799	4,09
45,92	4,23
46,042	4,38
46,163	4,555
46,285	4,755
46,416	4,955
46,538	5,185
46,66	5,43
46,866	6,06
46,987	6,36
47,109	6,66
47,23	6,96
47,359	7,28
47,481	7,605
47,603	7,895
47,725	8,14
47,846	8,44
47,968	8,705
48,173	9,06
48,295	9,33
48,417	9,725

48,548	10,03
48,669	10,305
48,791	10,62
48,913	10,93
49,035	11,275
49,156	11,6
49,277	11,915
49,495	12,49
49,617	12,725
49,745	13,04
49,867	13,46
49,989	13,675
50,11	13,895
50,232	14,205
50,354	14,405
50,475	14,74
50,618	15,155
50,84	15,895
50,961	16,145
51,083	16,59
51,205	17,02
51,326	17,375
51,447	17,82
51,569	18,19
51,691	18,62
51,813	19,005
51,935	19,29
52,16	20,165
52,282	20,565
52,403	20,94
52,524	21,405
52,646	21,78
52,768	22,255
52,9	22,755
53,022	23,26

53,143	23,63
53,265	24,235
53,483	24,855
53,605	24,375
53,727	25,28
53,849	25,28
53,969	25,28
54,091	25,28
54,213	27,14
54,335	26,845
54,464	28,74
54,586	27,915
54,814	28,905
54,936	29,68
55,153	30,02
56,271	33,621
57,388	38,191
58,507	41,381
59,624	45,201
60,746	48,181
61,864	51,321
62,982	53,321
64,1	54,661
65,217	55,761
66,335	56,221
67,452	56,441
68,571	56,311
69,696	55,741
70,814	55,621
71,931	55,921
73,05	56,441
74,177	57,041

b) Messwerte zur Analyse des Einflusses der Klappenstellung

Klappen vollständig ausgefahren

0	9,985
0,212	9,6
0,328	9,51
0,445	9,29
0,562	8,895
0,678	8,665

0,794	8,665
0,911	8,46
1,037	8,005
1,153	7,785
1,277	7,685
1,477	7,125

1,593	7,125
1,71	7,125
1,827	6,895
1,956	6,605
2,072	6,605
2,188	6,255

2,305	6,255
2,426	5,855
2,542	5,855
2,742	5,175
2,859	5,1
2,976	5,015

3,091	4,825
3,208	4,7
3,325	4,555
3,44	4,38
3,564	4,265
3,681	4,09
3,797	4
3,997	3,795
4,114	3,67
4,231	3,525
4,347	3,445
4,463	3,37
4,58	3,31
4,696	3,3
4,813	3,315
4,929	3,385
5,045	3,45
5,255	3,515
5,372	3,6
5,502	3,6
5,618	3,595
5,741	3,59
5,858	3,57
5,975	3,52
6,092	3,485
6,208	3,495

6,324	3,485
6,525	3,43
6,641	3,405
6,758	3,335
6,874	3,28
6,995	3,215
7,111	3,19
7,228	3,125
7,345	3,13
7,461	3,095
7,577	3,075
7,778	3,085
7,895	3,085
8,019	3,12
8,135	3,145
8,252	3,115
8,368	3,1
8,485	3,1
8,601	3,08
8,717	3,13
8,834	3,095
9,048	3,055
9,164	3,03
9,28	2,99
9,406	2,94
9,523	2,905

9,639	2,9
9,755	2,91
9,872	2,955
9,988	2,995
10,105	3,045
10,314	3,11
10,429	3,15
10,546	3,155
10,662	3,17
10,778	3,2
10,895	3,205
11,011	3,235
11,128	3,235
11,244	3,275
11,36	3,3
11,561	3,375
11,682	3,415
11,797	3,47
11,914	3,53
12,031	3,58
12,146	3,705
12,263	3,79
12,38	3,91
12,516	4,065
12,632	4,15
12,833	4,43

12,949	4,625
13,065	4,685
13,182	4,845
13,298	4,985
13,414	5,175
13,541	5,525
13,657	5,675
13,774	5,945
13,89	6,105
14,09	6,405
14,207	6,405
14,324	6,845
14,44	6,845
14,556	7,315
14,681	7,785
14,798	7,785
14,913	8,31
15,03	8,31
15,147	9,03
15,346	9,03
15,463	9,03
15,58	9,03
15,792	10,34
16,905	14,49

Klappen auf Stufe 1

0	10,745
1,027	8,7
1,143	8,175
1,26	8,445
1,377	8,445
1,493	8,07
1,609	8,07
1,726	7,875
1,842	7,875
2,043	7,875
2,159	7,18
2,276	7,18
2,392	6,96
2,508	6,96
2,629	6,56
2,745	6,56

2,869	6,295
2,984	6,295
3,1	6,105
3,301	5,885
3,416	5,665
3,533	5,57
3,649	5,395
3,765	5,28
3,881	5,06
3,997	4,955
4,114	4,675
4,243	4,485
4,359	4,43
4,559	4,135
4,676	4,015
4,792	3,92

4,908	3,86
5,024	3,83
5,158	3,805
5,274	3,84
5,39	3,905
5,506	3,94
5,622	4,025
5,822	4,065
5,938	4,085
6,054	4,055
6,17	4,015
6,287	3,975
6,402	3,915
6,519	3,85
6,635	3,785
6,751	3,715

6,866	3,67
7,067	3,565
7,183	3,53
7,311	3,48
7,426	3,42
7,543	3,475
7,673	3,445
7,789	3,48
7,906	3,505
8,021	3,555
8,137	3,595
8,338	3,6
8,453	3,62
8,569	3,645
8,686	3,7
8,802	3,75

8,918	3,79
9,034	3,87
9,15	3,935
9,276	4
9,391	4,05
9,599	4,095
9,715	4,105
9,831	4,15
9,947	4,195
10,063	4,195
10,179	4,235
10,296	4,255
10,411	4,305
10,527	4,305

10,644	4,32
10,843	4,305
10,959	4,32
11,09	4,275
11,206	4,245
11,323	4,265
11,438	4,295
11,554	4,31
11,671	4,325
11,794	4,365
11,907	4,45
12,107	4,47
12,224	4,485
12,341	4,535

12,456	4,525
12,573	4,565
12,69	4,61
12,805	4,645
12,922	4,72
13,039	4,805
13,155	4,82
13,355	5,115
13,482	5,305
13,598	5,43
13,715	5,67
13,831	5,845
13,948	5,845
14,071	6,275

14,188	6,275
14,304	6,805
14,436	7,36
14,635	7,955
14,752	7,955
14,869	7,955
14,985	8,755
15,101	8,755
15,218	8,755
15,334	8,755
15,547	10,325
16,659	13,895

Ohne ausgefahrene Klappen

0	13,93
1,016	9,855
1,133	9,855
1,25	9,435
1,366	9,435
1,482	9,435
1,599	9,435
1,723	8,455
1,937	8,455
2,054	7,575
2,169	7,575
2,286	7,165
2,403	7,165
2,518	6,85
2,635	6,85
2,752	6,545
2,868	6,545

2,984	6,3
3,185	6,025
3,302	5,745
3,418	5,64
3,534	5,51
3,651	5,52
3,767	5,57
3,883	5,65
4,011	5,88
4,127	6,015
4,244	6,155
4,455	6,46
4,572	6,6
4,687	6,6
4,804	6,68
4,92	6,68
5,036	6,655

5,153	6,655
5,269	6,575
5,399	6,575
5,515	6,5
5,715	6,28
5,832	6,015
5,948	5,93
6,065	5,87
6,188	5,86
6,305	5,895
6,422	5,96
6,539	6,12
6,654	6,255
6,771	6,37
6,972	6,72
7,088	6,72
7,204	7,085

7,321	7,47
7,438	7,47
7,553	7,94
7,67	7,94
7,787	7,94
7,903	8,46
8,019	8,46
8,22	8,46
8,336	9,73
8,461	9,73
8,596	9,73
8,717	9,73
8,929	10,615
10,054	12,895

c) Messwerte zur Analyse des Einflusses des Untergrunds

Asphalt

0	54,121
1,119	51,121
2,236	47,951
3,354	45,831
4,472	42,241
5,589	38,281
6,708	34,951

7,825	32,431
8,847	28,92
8,969	28,005
9,109	27,53
9,23	26,985
9,352	26,715
9,484	26,425

9,606	26,18
9,727	25,98
9,848	25,68
10,074	25,06
10,195	24,905
10,317	24,455
10,438	24,375

10,557	24,005
10,679	24,145
10,801	25,175
10,921	25,005
11,043	24,775
11,164	24,66
11,381	24,09

11,503	23,89
11,624	23,655
11,746	23,435
11,867	23,13
11,988	22,945
12,109	22,755
12,231	22,49
12,359	22,28
12,481	22,005
12,698	21,58
12,819	21,405
12,941	21,25
13,062	20,98
13,183	20,895
13,304	20,705
13,436	20,605
13,557	20,365
13,678	20,245
13,809	20,085
14,026	19,93
14,148	19,805
14,269	19,66
14,391	19,55
14,512	19,44
14,633	19,34
14,761	19,305
14,882	19,17
15,004	19,005
15,125	18,94
15,346	18,77
15,468	18,575
15,589	18,495
15,711	18,39
15,831	18,29
15,952	18,205
16,074	18,095
16,195	18,005
16,317	17,865
16,438	17,76
16,655	17,635
16,777	17,51
16,897	17,31
17,019	17,295
17,147	17,19
17,269	17,05

17,39	16,99
17,512	16,88
17,644	16,76
17,765	16,695
17,983	16,335
18,104	16,245
18,235	16,095
18,356	15,96
18,477	15,835
18,598	15,65
18,72	15,455
18,841	15,36
18,963	15,17
19,084	15,055
19,302	14,85
19,43	14,77
19,551	14,67
19,673	14,52
19,793	14,385
19,915	14,24
20,036	13,985
20,162	13,785
20,284	13,53
20,405	13,275
20,623	12,66
20,745	12,26
20,865	12,03
20,987	11,82
21,109	11,65
21,231	11,49
21,353	11,36
21,475	11,23
21,596	11,01
21,736	10,915
21,954	10,81
22,075	10,795
22,197	10,68
22,319	10,575
22,44	10,415
22,571	10,285
22,693	10,11
22,815	10,005
22,937	9,86
23,059	9,625
23,264	9,4

23,386	9,21
23,507	9,065
23,629	8,9
23,751	8,735
23,873	8,555
23,994	8,39
24,123	8,29
24,245	8,14
24,367	8,055
24,571	7,83
24,693	7,72
24,815	7,615
24,937	7,545
25,062	7,41
25,184	7,275
25,306	7,16
25,427	7,05
25,548	6,895
25,67	6,73
25,887	6,435
26,008	6,255
26,13	6,02
26,252	5,86
26,381	5,855
26,502	5,69
26,623	5,55
26,745	5,595
26,877	5,58
26,998	5,53
27,204	5,3
27,326	5,165
27,447	4,93
27,569	4,75
27,69	4,595
27,811	4,48
27,933	4,38
28,055	4,315
28,177	4,24
28,298	4,185
28,503	4,075
28,625	3,975
28,753	3,895
28,875	3,825
28,997	3,74
29,119	3,69

29,24	3,62
29,362	3,54
29,483	3,465
29,605	3,4
29,81	3,285
29,932	3,25
30,064	3,23
30,186	3,18
30,312	3,165
30,433	3,125
30,555	3,125
30,676	3,1
30,798	3,095
30,919	3,1
31,133	3,115
31,264	3,11
31,386	3,11
31,507	3,105
31,629	3,1
31,751	3,11
31,871	3,085
31,993	3,095
32,115	3,055
32,237	3,05
32,442	3,005
32,564	3,01
32,685	2,99
32,806	2,95
32,928	2,9
33,05	2,86
33,172	2,815
33,293	2,79
33,422	2,75
33,544	2,68
33,748	2,585
33,87	2,5
33,992	2,48
34,125	2,45
34,247	2,425
34,368	2,43
34,49	2,46
34,612	2,49
34,733	2,48
34,854	2,515
35,06	2,575

35,182	2,58
35,304	2,56
35,43	2,52
35,561	2,465
35,69	2,465
35,812	2,405
35,934	2,38
36,055	2,345
36,177	2,325
36,382	2,28
36,504	2,25
36,626	2,195
36,748	2,13
36,87	2,06
36,99	1,98
37,112	1,98
37,234	1,945
37,356	1,905
37,478	1,89
37,683	1,925
37,804	1,935
37,926	1,955
38,055	1,99
38,187	1,99
38,309	2,01
38,431	2,035
38,552	2,04
38,674	2,03
38,796	2,02
39,002	1,985
39,122	1,985
39,244	1,99
39,366	2,01
39,488	2,03
39,609	2,06
39,731	2,095
39,862	2,16
39,984	2,225
40,104	2,285
40,31	2,375
40,44	2,43
40,562	2,465
40,681	2,495

40,803	2,53
40,924	2,59
41,045	2,61
41,167	2,655
41,289	2,68
41,411	2,7
41,616	2,755
41,738	2,77
41,86	2,76
41,981	2,765
42,103	2,775
42,225	2,78
42,356	2,79
42,478	2,765
42,6	2,765
42,729	2,73
42,935	2,71
43,056	2,695
43,177	2,68
43,299	2,67
43,421	2,67
43,542	2,675
43,664	2,69
43,786	2,74
43,908	2,78
44,029	2,82
44,244	2,89
44,365	2,92
44,487	2,965
44,609	3,04
44,731	3,11
44,852	3,17
44,973	3,215
45,103	3,35
45,224	3,45
45,345	3,53
45,551	3,81
45,673	3,965
45,799	4,09
45,92	4,23
46,042	4,38
46,163	4,555
46,285	4,755

46,416	4,955
46,538	5,185
46,66	5,43
46,866	6,06
46,987	6,36
47,109	6,66
47,23	6,96
47,359	7,28
47,481	7,605
47,603	7,895
47,725	8,14
47,846	8,44
47,968	8,705
48,173	9,06
48,295	9,33
48,417	9,725
48,548	10,03
48,669	10,305
48,791	10,62
48,913	10,93
49,035	11,275
49,156	11,6
49,277	11,915
49,495	12,49
49,617	12,725
49,745	13,04
49,867	13,46
49,989	13,675
50,11	13,895
50,232	14,205
50,354	14,405
50,475	14,74
50,618	15,155
50,84	15,895
50,961	16,145
51,083	16,59
51,205	17,02
51,326	17,375
51,447	17,82
51,569	18,19
51,691	18,62
51,813	19,005
51,935	19,29

52,16	20,165
52,282	20,565
52,403	20,94
52,524	21,405
52,646	21,78
52,768	22,255
52,9	22,755
53,022	23,26
53,143	23,63
53,265	24,235
53,483	24,855
53,605	24,375
53,727	25,28
53,849	25,28
53,969	25,28
54,091	25,28
54,213	27,14
54,335	26,845
54,464	28,74
54,586	27,915
54,814	28,905
54,936	29,68
55,153	30,02
56,271	33,621
57,388	38,191
58,507	41,381
59,624	45,201
60,746	48,181
61,864	51,321
62,982	53,321
64,1	54,661
65,217	55,761
66,335	56,221
67,452	56,441
68,571	56,311
69,696	55,741
70,814	55,621
71,931	55,921
73,05	56,441
74,177	57,041

Gras

0	54,641	31,388	27,365	37,193	21,54	43,071	12,355
1,117	53,691	31,51	27,16	37,315	21,45	43,192	12,045
2,236	51,371	31,642	26,905	37,533	21,315	43,313	11,765
3,354	49,661	31,764	26,805	37,654	21,25	43,435	11,35
4,471	48,641	31,886	26,715	37,776	21,115	43,557	11,08
5,589	47,221	32,007	26,515	37,902	21,115	43,679	10,81
6,706	45,911	32,232	26,225	38,023	21,025	43,808	10,575
7,825	44,281	32,354	26,205	38,145	20,94	43,929	10,36
8,943	41,601	32,475	26,115	38,266	20,85	44,147	9,985
10,06	39,921	32,608	25,73	38,388	20,785	44,269	9,76
11,178	38,331	32,729	25,655	38,51	20,785	44,39	9,54
12,295	37,451	32,851	25,63	38,632	20,645	44,512	9,365
13,414	36,421	32,977	25,48	38,849	20,545	44,633	9,16
14,541	35,531	33,099	25,33	38,971	20,445	44,765	9,005
15,666	34,361	33,221	25,175	39,093	20,345	44,898	8,825
16,785	33,571	33,343	25,035	39,222	20,305	45,018	8,66
17,902	33,251	33,56	24,69	39,343	20,245	45,14	8,54
19,02	33,201	33,682	24,455	39,465	20,105	45,262	8,45
20,137	33,371	33,804	24,345	39,587	19,915	45,468	8,195
21,255	33,691	33,925	24,26	39,708	19,785	45,589	8,075
22,378	32,001	34,046	24,175	39,83	19,66	45,711	7,915
23,506	31,851	34,168	24,035	39,952	19,305	45,832	7,8
24,624	32,221	34,29	24,035	40,17	19,005	45,954	7,685
25,742	31,36	34,419	24,035	40,291	12,155	46,075	7,555
26,86	31,495	34,54	23,86	40,423	12,04	46,204	7,43
27,977	30,575	34,662	23,755	40,545	13,42	46,326	7,36
28,999	29,71	34,88	23,545	40,665	16,835	46,448	7,255
29,121	29,71	35,002	23,46	40,797	18,205	46,569	7,14
29,243	29,62	35,122	23,435	40,919	18,035	46,775	6,99
29,363	29,62	35,244	23,435	41,041	17,895	46,896	6,89
29,582	29,52	35,366	23,26	41,163	17,665	47,018	6,77
29,703	29,36	35,488	23,155	41,285	17,405	47,14	6,705
29,832	29,205	35,61	23,08	41,509	16,775	47,262	6,6
29,954	29,205	35,731	22,975	41,631	16,32	47,384	6,49
30,076	28,99	35,853	22,945	41,753	16,005	47,505	6,365
30,198	28,99	35,984	22,78	41,875	15,59	47,627	6,29
30,319	28,755	36,202	22,605	41,997	15,235	47,752	6,175
30,441	28,755	36,324	22,46	42,118	14,99	47,874	6,07
30,563	28,495	36,444	22,46	42,24	14,755	48,08	5,88
30,684	28,185	36,566	22,205	42,362	14,385	48,202	5,755
30,902	27,95	36,699	22,13	42,483	13,97	48,324	5,62
31,023	27,745	36,828	22,03	42,609	13,64	48,445	5,48
31,145	27,57	36,95	21,78	42,827	13,115	48,575	5,355
31,267	27,495	37,072	21,695	42,949	12,63	48,697	5,23

48,817	5,11
48,951	5
49,083	4,89
49,205	4,775
49,409	4,565
49,531	4,445
49,653	4,355
49,775	4,23
49,896	4,155
50,018	4,025
50,139	3,92
50,26	3,85
50,382	3,745
50,504	3,675
50,71	3,555
50,838	3,505
50,96	3,44
51,082	3,415
51,202	3,365
51,324	3,37
51,446	3,355
51,568	3,395
51,69	3,375
51,811	3,38
52,016	3,405
52,138	3,385
52,26	3,38
52,381	3,375
52,503	3,375
52,625	3,335
52,747	3,33
52,871	3,33
53,004	3,28
53,133	3,245
53,337	3,18
53,479	3,145
53,601	3,125
53,721	3,12
53,843	3,105
53,964	3,08
54,085	3,095
54,207	3,1
54,328	3,08
54,449	3,12
54,654	3,15
54,776	3,19

54,897	3,205
55,018	3,23
55,14	3,28
55,26	3,315
55,381	3,365
55,511	3,38
55,632	3,375
55,753	3,37
55,959	3,33
56,08	3,315
56,202	3,345
56,322	3,345
56,444	3,345
56,565	3,365
56,686	3,35
56,808	3,375
56,929	3,395
57,05	3,385
57,265	3,355
57,386	3,365
57,508	3,365
57,629	3,345
57,767	3,355
57,888	3,375
58,01	3,43
58,135	3,545
58,256	3,66
58,378	3,8
58,582	4,065
58,704	4,185
58,825	4,32
58,947	4,405
59,068	4,465
59,189	4,525
59,31	4,585
59,431	4,635
59,553	4,79
59,674	4,985
59,879	5,43
60,001	5,75
60,129	6,09
60,25	6,365
60,371	6,665
60,493	6,915
60,614	7,115
60,736	7,055

60,857	7,22
60,977	7,345
61,183	7,615
61,316	7,73
61,438	7,79
61,559	7,84
61,681	7,905
61,802	7,95
61,924	8,025
62,054	8,125
62,176	8,2
62,296	8,285
62,51	8,415
62,631	8,42
62,752	8,495
62,874	8,575
62,995	8,76
63,116	8,92
63,242	9,195
63,363	9,475
63,484	9,81
63,606	10,15
63,824	10,815
63,946	11,115
64,067	11,45
64,189	11,785
64,311	12,14
64,431	12,535
64,553	13,35
64,675	13,785
64,804	14,225
64,925	14,62
65,143	15,295
65,276	15,695
65,398	16,035
65,52	16,375
65,642	16,71
65,763	17,13
65,884	17,45
66,006	17,805
66,128	18,205
66,25	18,605
66,477	19,255
66,598	19,53
66,72	20,065
66,842	20,425

66,964	20,85
67,093	21,36
67,215	21,83
67,336	22,18
67,457	22,755
67,579	23,205
67,797	23,92
67,919	24,505
68,04	24,98
68,166	25,455
68,288	25,73
68,41	26,095
68,531	21,74
68,652	22,835
68,774	23,655
68,896	27,875
69,114	28,79
69,246	29,25
69,368	29,76
69,593	30,13
70,711	33,801
71,829	38,131
72,946	41,561
74,064	45,561
75,181	50,071
76,3	55,061
77,417	56,871