

Technische Universität Berlin
Fakultät IV (Elektrotechnik und Informatik)
Institut für Energie- und Automatisierungstechnik
Fachgebiet Lichttechnik



Entwicklung und Realisierung einer Messeinrichtung mit den Sensoren AS7261 und AS72651 von ams

Bachelorarbeit

Vorgelegt von: Lennard Bödiger
Studiengang: Technische Informatik
Matrikel-Nr.: 363470

Eingereicht am: 8. Februar 2021
Betreuung: Nils Weber
Prüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker
Prof. Dr.-Ing. Sibylle Dieckerhoff

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Name

Datum

Unterschrift

A large rectangular gray box used to redact a handwritten signature.

Abstract

The goal of this work is to develop a spectral sensor platform using the AS7261 and AS72651, which can be used modularly for different research purposes, but especially for daylight measurements. Since it is not possible to measure in several directions in the sky at the same time with only one of the AS7261 (or AS72651) sensors without mechanical components, it must be ensured that a large number of sensors can be combined into a sensor array in order to be able to measure with directional resolution.

The resulting sensor platform uses a Raspberry Pi 4 as central control unit, which communicates with external sensor boards via I2C. The sensor boards are designed to be connected in series to allow a variety of measurement configurations. The database and the web interface for displaying and querying the data runs locally on the Rasperrypi. The thesis describes the development of all hardware and software components.

Ziel dieser Arbeit ist es, mithilfe des AS7261 und AS72651 eine Spektral-Sensor Plattform zu entwickeln, die modular für unterschiedliche Forschungszwecke, aber vor allem zu Tageslichtmessung, genutzt werden kann. Entscheidend dabei ist, dass das System portabel und kosteneffizient umgesetzt wird, um vielfache und flexible messaufbauten zu ermöglichen. Da es ohne mechanische Komponenten nicht möglich ist, mit nur einem der AS7261 (oder auch AS72651) Sensoren in mehrere Richtungen am Himmel gleichzeitig zu messen, muss es möglich sein, eine Vielzahl der Sensoren zu einem Sensor Array zusammenzuschließen, um so richtungsauf lösend messen zu können.

Die resultierende Sensorplattform nutzt einen Raspberry Pi 4 als zentrale Steuereinheit, welcher über I2C mit externen Sensnorboards kommuniziert. Die Sensnoroards sind darauf ausgelegt, in reihe geschaltet zu werden, um so eine Vielzahl von Messkonfigurationen zu ermöglichen. Die Datenbank und das Webinterface zum Darstellen und Abfragen der Daten laufen lokal auf dem Raspberry Pi. In der Arbeit sind die entwickelten Hard- und Softwarekomponenten beschrieben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	9
1.1 Aufbau des Messsystems	9
2 Technische Grundlagen	10
2.1 Fotodioden	10
2.2 I2C	11
3 Hardware Komponenten	12
3.1 Sensoren	12
3.1.1 AS7261	14
3.1.2 AS7265X	15
3.2 Mikrocontroller	17
3.3 I2C Address Translator LTC4316	18
3.4 Companion Flash	21
4 Platine	22
4.1 System Topologie	22
4.2 Status & Adapterboard	22
4.3 Sensorboard	23
5 Datenbank & Webinterface	28
5.1 InfluxDB	28
5.2 Grafana	28
6 C Code	29
6.1 wiringPi	29
6.1.1 wiringPil2CSetup	29
6.1.2 wiringPil2CWriteReg8	30
6.1.3 wiringPi4l2CReadReg8	30
6.2 AS726X Library	30
6.2.1 virtualWriteRegister	33
6.2.2 virtualReadRegister	34
6.2.3 MeasurementFromAdress	36
6.2.4 takeMeasurements	36
6.2.5 setMeasurementMode	37

6.2.6	dataAvailable & clearDataAvailable	38
6.2.7	Rohwerte des AS7261 auslesen	38
6.2.8	getChannel	39
6.2.9	Rohwerte des AS7265X auslesen	39
6.2.10	getChannel_AS7265X	40
6.2.11	selectDevice	41
6.2.12	Enable/Disable Indicator	41
6.2.13	softReset	41
6.2.14	I2CScan	42
6.2.15	getVersion	44
6.2.16	scanAS7262	44
6.2.17	scanAS7263	44
6.2.18	setGain	44
6.2.19	setIntegrationTime	45
6.2.20	disableInterrupt	45
6.3	influxDB Library writeToDatabase	45
6.3.1	writeToDatabase	46
6.4	main	46
6.4.1	default_values.h	46
6.5	measurement	48
6.5.1	fixedGainMeasurementAS7261 & fixedGainMeasurementAS7265X	48
6.5.2	autoGainMeasurementAS7261 & autoGainMeasurementAS7265X	50
6.5.3	matchValueToMaxGain	53
7	Benutzerhandbuch	54
7.1	Hardware Setup	54
7.2	Messung Starten	54
7.3	Einstellung für fortgeschrittene Benutzer	57
7.4	Webinterface	58
7.5	Messsoftware Beenden/Neustarten	59
7.6	IP Adress Scan	60
7.7	Bedeutung der Status LEDs	60
7.7.1	Raspberry Pi	60
7.7.2	Status & Adapterboard	60
7.7.3	Sensorboard	60

7.8	Hilfe	60
7.9	Liste Der Verwendeten I2C Adressen & Translationbytes	61
8	Messungen	62
9	Zusammenfassung	64

Abbildungsverzeichnis

2	AS726X [7]	12
3	Seitenansicht AS726X [7]	12
4	AS7261 Spektrale Empfindlichkeit von X,Y,Z [8]	14
5	AS7261-Bank Modes [8]	14
6	S7265X-Scematic [7]	15
7	AS7265X-Spektrale Empfindlichkeit [7]	16
8	Raspberry Pi 4 Model B [9]	17
9	Screenshot: CPU-Performance	18
10	I2C-Bus im Messaufbau [9]	19
11	Translation Byte [10]	20
12	Verschaltung der Platienen [9]	22
13	Platine des Status & Adapterboard	23
14	Vorderseite des Sensorboards I2C Leitungsverlauf in rot	25
15	Rückseite des Sensorboards I2C Leitungsverlauf in rot	26
16	Beispiel Grafana Dashboard	28
17	PysicalRegister [8]	31
18	AS726x_CONTROL_SETUP 0x04 [8]	31
19	AS726x_INT_T 0x05 [8]	31
20	AS726x_DEVICE_TEMP 0x06 [8]	31
21	AS726x_LED_CONTROL 0x07 [8]	32
22	AS7265X_DEV_SELECT_CONTROL 0x4F [8]	32
23	Flowchart fixedGainMeasurementAS7261	49
24	Flowchart autoGainMeasurementAS7261	52
25	Terminal Output bei Start der Messsoftware	55
26	Terminal Output bei Start der Messung	56
27	Beispielhafter Terminal Output bei Einstellungsänderungen	57
28	SpectralSensor/defaultvalues.h	57
29	Grafana Login im Browser	58
30	Screenshot Grafana CSV-Export	59
33	AutoGain	63

Tabellenverzeichnis

1	Untere 4 Bit des Translation Byte	20
2	Obere 4 Bit des Translation Byte	21
3	Entstörkondensatoren	24
4	Raw Data Registers [8]	32
5	AS7261 Datenbank-ID bei festem Verstärkungsfaktor	48
6	AS7265X Datenbank-ID bei festem Verstärkungsfaktor	48
7	AS7261 Datenbank-ID bei automatischem Verstärkungsfaktor	50
8	AS7265X Datenbank-ID bei automatischem Verstärkungsfaktor	51

1 Einleitung

Es gibt viele wissenschaftliche und industrielle Anwendungen, die zuverlässige Daten über die spektrale Zusammensetzung des menschlich sichtbaren Tageslichts erfordern.

Das menschlich sichtbare Licht besteht aus den Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung ($380 - 780\text{nm}$), die ursprünglich von unserer Sonne emittiert werden und direkt oder indirekt die Erde erreichen. Um das Licht über den gesamten sichtbaren Bereich des Himmels zu erfassen, sind mehrere Sensoren zur Messung in verschiedenen Richtungen oder mechanische Komponenten zur Abtastung des Himmels in mehreren Punkten erforderlich.

Das Fachgebiet Lichttechnik benutzt bereits einen Messaufbau. Dieser verwendet einen Spektrometer, der durch einen beweglichen Spiegel und eine rotierbare Basis in der Lage ist, den Himmel abzutasten. Der Messaufbau kann somit mit einer sehr genauen spektralen Auflösung von 1 nm in 145 Himmelsbereichen messen.

Im Dauereinsatz haben sich mechanische Komponenten unter dem Einfluss äußerer Bedingungen als gravierender Schwachpunkt erwiesen.

Die Messeinrichtung ist aufgrund des hochwertigen Sensors in der Lage, sehr genaue Messungen aufzuzeichnen. Die Anschaffung ist jedoch mit erheblichen Kosten verbunden.

Aus diesem Grund wird am Fachgebiet für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin an einer transportablen, spectral- und richtungsauf lösenden Messeinrichtung geforscht, die ohne mechanische Komponenten auskommt und durch die Verwendung von weniger genauen Sensoren eine kostengünstige und robuste Alternative darstellt.

In dieser Arbeit wird mithilfe der von AMS entwickelten auf Fotodioden basierenden Lichtsensoren AS7261 und AS7265X eine Spektral-Sensor Plattform entwickelt. Die modular für unterschiedliche Forschungszwecke, aber vor allem zur Tageslichtmessung, genutzt werden kann.

1.1 Aufbau des Messsystems

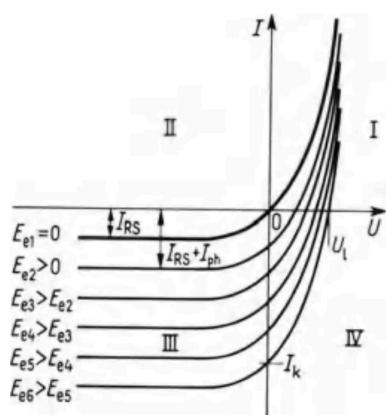
Ein Einplatinencomputer wird mit bis zu zwölf AS7261 und zwölf AS7265X Sensoren verbunden. Die Messungen werden über eine I₂C Bus Verbindung gesteuert und ausgelesen. Auf dem Einplatinencomputer wird eine Datenbank mit den Messdaten gefüllt und über ein Webinterface, welches auch auf dem Einplatinencomputer gehostet wird, verfügbar gemacht.

2 Technische Grundlagen

2.1 Fotodioden

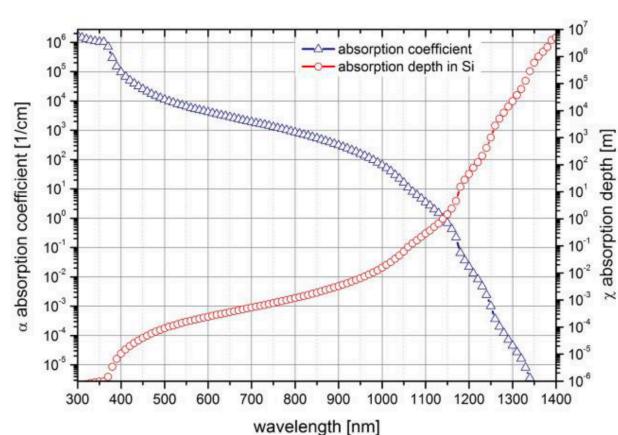
Photodioden sind beleuchtete pn-Übergänge. Im Kurzschlussbetrieb ($U = 0$) fließt ein über einen Bereich von mehr als acht Zehnerpotenzen linear von der Beleuchtungsstärke abhängiger Kurzschlussstrom I_k (Abbildung 1a) [1]. Dieser setzt sich aus dem durch einstrahlendes Licht verursachten Photostrom und dem temperaturabhängigen Dunkelstrom zusammen [2]. Allerdings hängt der Photostrom auch von der Absorptionstiefe in das Siliziumsubstrat ab, welche wiederum von der Wellenlänge abhängt (Abbildung 1b) [3]

(a) Kennlinienfeld Photodiode [1]



Kennlinienfeld $I = f(U)$ der Photodiode mit der Bestrahlungsstärke E_e als Parameter
Kurzschlussstrom I_k bei $U = 0$

(b) Silizium-Eindringtiefe-Licht [4]



Optische Eigenschaften von Silizium: Absorptionskoeffizient (Dreiecke) und Absorptionstiefe (Kreise) in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Damit Rückschlüsse über den Kurzschlussstrom I_K zur Lichtintensität zulässig sind, muss also die Temperatur konstant oder zumindest bekannt sein, da so ein möglichst akkurater temperatur- und frequenzabhängiger Kompensationsfaktor gewählt werden kann.

2.2 I2C

I2C Alternativ I²C geschrieben, ist ein simples und effizientes Busprotokoll. Es wurde ursprünglich von Phillips entwickelt, wird aber seit einigen Jahren von NXP weiterentwickelt. In seiner simpelsten Form ermöglicht es einen Master mit bis zu 128 Slave-Geräten zu verbinden. Dafür werden nur 2 Leitungen benötigt, die SCL und SDA genannt werden. SCL ist die Taktleitung. Sie wird verwendet, um alle Datenübertragungen über den I2C-Bus zu synchronisieren. SDA ist die Datenleitung. Alle Busteilnehmer müssen mit dem gleichen GND potential verbunden sein um Stromfluss über die SDA und SCL Leitungen zu ermöglichen [5]. SCL und SDA benötigen jeweils einen Pull-Up-Widerstand da sie als "Open Drain" betrieben werden, was bedeutet, dass die Leitungen über Widerstände (Pull-Up-Widerstände) mit der Versorgungsspannung verbunden sind und somit in den High-Zustand gezogen werden. Die angeschlossenen Geräte ändern den Zustand der Datenleitung auf Low, indem sie die Leitung über einen MOSFET mit GND verbinden. Um die Leitung wieder auf High zu heben, wird die Verbindung zu GND wieder getrennt und der Pull-Up-Widerstand sorgt dafür, dass die Leitung wieder im High-Zustand ist.

Die Clockleitung SCL wird vom Bus Master gesteuert, so kann der Master den Takt der Datenübertragung bestimmen. Die SDA Leitung wird vom Master und Slave genutzt um Daten zu übertragen. Allerdings antworten die Slaves im Normalbetrieb nur, nachdem sie vom Master auf ihrer Adresse eine Anfrage erhalten haben. Die Spezifikation des Protokolls [6] empfiehlt die SDA und SCL Leitung möglichst weit voneinander zu entfernen um so Signalstörungen vorzubeugen.

3 Hardware Komponenten

3.1 Sensoren

Die Sensoren aus der AS726X Reihe sind in der Lage Licht, also elektromagnetische Strahlung, zu messen. In jedem Sensor sind 6 Photodioden verbaut. Vor jeder Photodiode ist ein Silizium-Interferenzfilter montiert, welcher wie ein Bandpassfilter arbeitet. Er ist nur für einen bestimmten Ausschnitt des Lichtspektrums durchlässig. Jeder Baustein enthält einen Analog-Digital-Wandler mit 16 Bit Auflösung, der den Photostrom aus den Fotodioden integriert. Nach Abschluss einer Messung wird das integrierte Ergebnis in die entsprechenden RAW Data Register übertragen.

So kann über das beschriebene Sensorarray die farbliche Zusammensetzung des eingestrahlten Lichts erfasst werden.



Abbildung 2: AS726X [7]

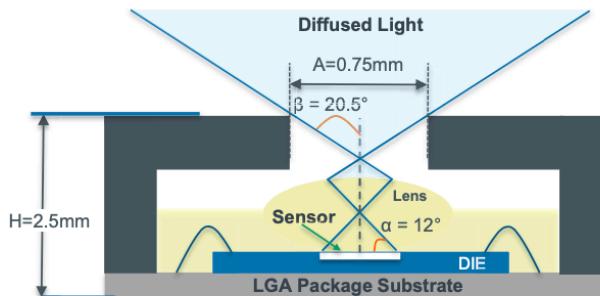


Abbildung 3: Seitenansicht AS726X [7]

Wie in Abbildung 3 dargestellt, fällt das Licht durch die Öffnung in der Mitte des Sensors ein. Eine intern verbaute Linse verteilt das Licht auf die Interferenzfilter. Die Genauigkeit der Filter verändert sich je nach Einstrahlwinkel, daher ist es wichtig vor den Sensor noch eine Streuscheibe zu montieren.

Die so gemessenen Daten können über UART oder I2C an einen Mikrocontroller übertragen werden. Da über UART nur ein Gerät verbunden werden kann, eignet sich aber für diesen Anwendungsfall nur die I2C Schnittstelle.

Alle Sensoren erhalten vom Hersteller dieselbe, nicht veränderbare I2C Adresse: 0x49. Daher muss ein I2C Translator genutzt werden, welcher es ermöglicht mehrere Sensoren im gleichen Bussystem zu adressieren (siehe Abschnitt 3.3).

Die Modelle unterscheiden sich durch die verbauten Silizium-Interferenzfilter, also die unterscheidbaren Wellenlängenbereiche sowie in der benötigten Peripherie. Die grundsätzliche Messmethode ist aber immer gleich. Im Folgenden werden die verwendeten Sensoren AS7261 (siehe Abschnitt 3.1.1) sowie der AS7265X (siehe Abschnitt 3.1.2) beschrieben.

Intern im Sensor werden aus den RAW-Werten kalibrierte Werte berechnet, jedoch wird keine ausreichende Dokumentation bereitgestellt. Daher konnte keine konsistente Korrelation zwischen RAW- und kalibrierten Werten ermittelt werden, weshalb sie im Messaufbau nicht verwendet werden.

3.1.1 AS7261

Das Sensorarray des AS7261 unterscheidet zwischen X, Y, Z, Clear, Dark und NIR. Wobei X, Y und Z nach CIE 1931 definiert sind. Clear ist eine Fotodiode ohne Filter. Dark ist eine abgedunkelte Fotodiode und wird nur verwendet um störende Einflüsse zu detektieren. NIR steht für Near-infrared (Nah-Infrarot).

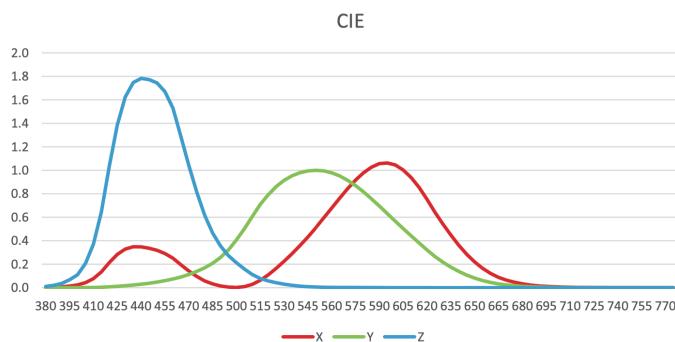


Abbildung 4: AS7261 Spektrale Empfindlichkeit von X,Y,Z [8]

Bank Modes:

Es gibt 3 sogenannte Bank Modes, in denen der Sensor arbeiten kann.

Bank Mode 0

Die Konvertierungen erfolgen kontinuierlich und Daten sind in den I2C-Registern X, Y, Z und NIR verfügbar.

Bank Mode 1

Die Konvertierungen erfolgen kontinuierlich und Daten sind in den I2C-Registern X, Y, D und C verfügbar.

Bank Mode 2

Die Konvertierungen erfolgen kontinuierlich, Daten sind nach zwei Integrationsperioden in den Registern X, Y, Z, NIR, D und C verfügbar. In diesem Modus können die kalibrierten, korrigierten Werte auch aus den entsprechenden I2C-Registern abgerufen werden.

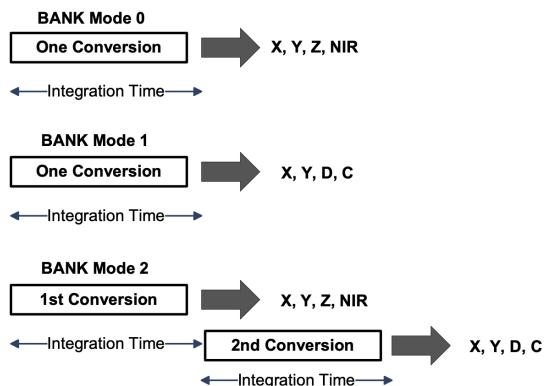


Abbildung 5: AS7261-Bank Modes [8]

Bank Mode 3

Die Konvertierungen erfolgen nur ein Mal und Daten sind, wie in Bank Mode 2, nach zwei Integrationsperioden in den Registern X, Y, Z, NIR, D und C verfügbar. Auch die kalibrierten, korrigierten Werte können aus den entsprechenden I2C-Registern abgerufen werden. Das DATA RDY-Bit wird auf 1 gesetzt, sobald Daten verfügbar sind.

Für den hier beschriebenen Messaufbau wird Bankmode 3 verwendet, da so an alle angeschlossenen Sensoren möglichst gleichzeitig eine Messung gestartet werden kann. Die Daten können nach abgeschlossener Messung an den Raspberry Pi übertragen werden.

3.1.2 AS7265X

AS7265X beschreibt AS72651, AS72652 und AS72653 wobei der AS72651 als Master für AS72652 und AS72653 fungiert (Abbildung 6), indem er über einen weiteren separaten I2C Bus ihre Daten abfragt und ansonsten wie der AS7261 arbeitet. Der angeschlossene Mikrocontroller (Einplatinencomputer) kommuniziert nur mit dem AS72651.

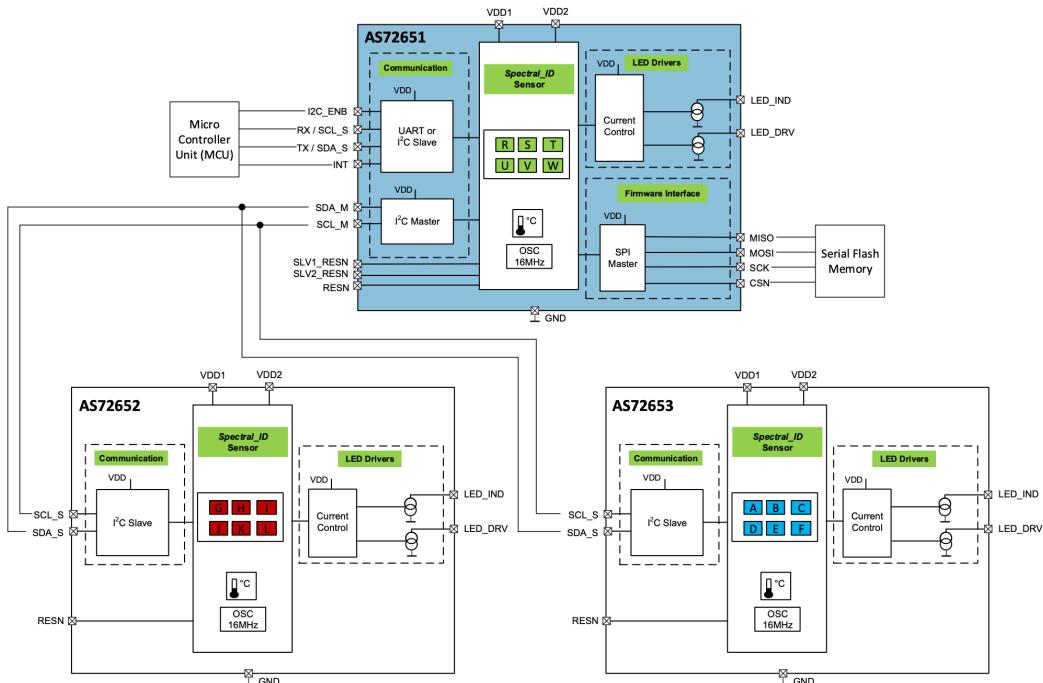


Abbildung 6: S7265X-Scematic [7]

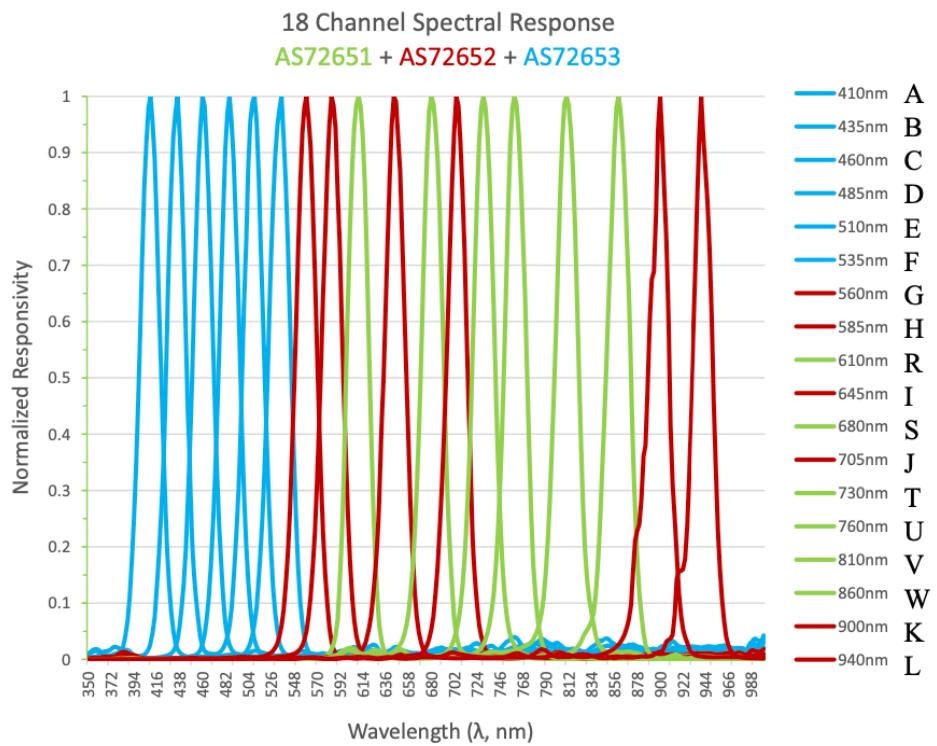


Abbildung 7: AS7265X-Spektrale Empfindlichkeit [7]

Die drei Sensoren messen in Kombination mit 18 Photodioden mit unterschiedlichen Filtern. So können sie 18 unterschiedliche Frequenz-Channel im Bereich zwischen 410 nm und 940 nm mit einer Halbwertsbreite von jeweils 20 nm erfassen. Die Frequenz-Channel sind, wie in Abbildung 7 zu sehen, mit den Buchstaben A-L gekennzeichnet.

Wie der AS7261 kann der AS7265X in 3 Bankmodi betrieben werden, wobei auch für diesen Sensor der Bankmodus 3 verwendet wird, da alle Farbkanäle in einer manuell ausgelösten Messung aufgezeichnet werden sollen.

3.2 Mikrocontroller

Bei der Auswahl des Mikrocontrollers ist die kleine Bauform, ausreichend langlebiger Speicher sowie eine Netzwerkschnittstelle und I2C Anschluss entscheidend.

Die Abfrage der Messdaten sowie die Messkonfiguration soll über einen Fernzugriff möglich sein. Die Daten sollen grafisch in einem Webinterface dargestellt werden, ohne dass eine weitere Serverinstanz benötigt wird. Daher eignet sich ein Linux-Fähiger Einplatinencomputer besser als ein simpler Mikrocontroller. Außerdem ermöglicht ein Einplatinencomputer einfache nachträgliche Änderungen, ohne dass eine komplexe Entwicklungsumgebung eingerichtet werden muss.

Der Raspberry Pi 4 Model B erfüllt alle diese Anforderungen:

Abmessungen	85.6 mm × 56.5 mm
Speicher	eMMC Flash Module Socket
Anschlüsse	Gigabit Ethernet, USB, WLAN
GPIO	UART, I2C, IO
RAM	2 GB
CPU	Broadcom BCM2711 ARM Cortex A72
Preis	37€ (+20€ für Netzteil und 32GB SD-Karte)



Abbildung 8: Raspberry Pi 4 Model B [9]

An den SD-Kartenslot kann bis zu 256 GB Flash-Speicher angeschlossen werden. Ein Sensorboard erzeugt etwa 0,73 MB Daten pro Tag. Bei 12 Sensorboards ist eine noch höhere Effizienz der Datenkomprimierung zu erwarten. Wenn trotzdem 8,78 MB pro Tag angenommen werden, benötigt der Messaufbau maximal 3,3 GB pro Jahr. Das Betriebssystem,

inklusive aller verwendeten Systemkomponenten, benötigt 3,9 GB. Im Messaufbau werden 32GB SD-Karten verwendet.

Die Internetverbindung kann über WLAN oder Ethernet hergestellt werden. Da eine kabelgebundene Lösung mehr Zuverlässigkeit bietet, wird eine Netzwerkverbindung über Ethernet einer WLAN-Schnittstelle vorgezogen.

Die GPIO des Raspebrry Pi arbeiten mit 3,3V. Der 3,3V Pin des Raspebrry Pi stellt nur 850mA am 3,3V Output bereit. Da jedes Sensorboard etwa 170 mA benötigt, reichen 850 mA nicht für die maximale Anforderung von 10 Boards aus. Der 5V-Pin ist direkt mit dem Netzteil verbunden und kann daher genauso viel Leistung wie das Netzteil liefern. Mithilfe eines Abwärtswandlers ist es möglich, die Sensorplatinen mit 3,3V zu betreiben.

Die CPU ist für den Anwendungsfall weitaus ausreichend dimensioniert. In Abbildung 9 ist ein Performancetest zu sehen. Die Reihen 1-4 beschreiben die prozentuale CPU-Auslastung der jeweiligen Prozessorkerne. MEM beschreibt die Auslastung des Arbeitsspeichers.

Für den Performancetest wurde eine Messung an 4 Sensor Boards mit minimalem Messintervall gestartet. Außerdem wurden gleichzeitig Daten über Grafana exportiert.

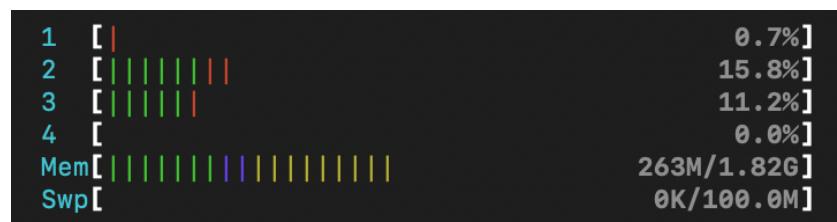


Abbildung 9: Screenshot: CPU-Performance

Der prozentuale Lastdurchschnitt über die letzten 5 Minuten während des Tests wird mit 0,89% angegeben.

3.3 I²C Address Translator LTC4316

Da wie in Abschnitt 3.1 genannt, alle Sensoren unter derselben I2C Adresse erreichbar sind, wird ein I2C Translator genutzt, um für eine individuelle Adressierung zu sorgen.

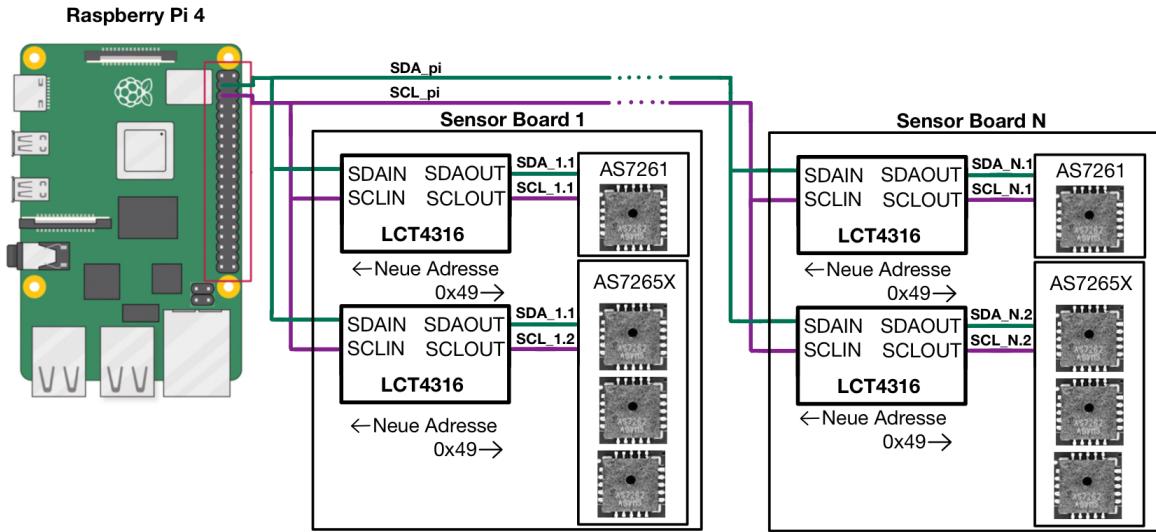


Abbildung 10: I2C-Bus im Messaufbau [9]

Wie in Abbildung 10 zu sehen, wird für jeden Sensor ein LTC4316 an die Busschnittstelle des Raspberry Pi angeschlossen (SDAIN, SCLIN).

An jeden LTC4316 wird ein AS7261 oder AS72651 angeschlossen (SDAOUT, SCLOUT). Bei Kommunikation vom Raspberry Pi zum Sensor wird dann die I2C Adresse mit einem Faktor (Translation Byte), welcher mit diskreten Widerständen eingestellt wird, mit Formel (1) verrechnet, um so die Adresse anzupassen (XORH,XORL). Um das Translation Byte einzustellen, müssen die Widerstände R_{HT} , R_{LT} , R_{HB} und R_{LB} wie in Abbildung 11 am LTC4316 angeschlossen werden.

$$\text{SensorAdresse} \oplus \text{TranslationByte} = \text{NeueAdresse}^1 \quad (1)$$

Beispiel Rechnung

$$\begin{aligned}
 0x49 \oplus 0x01 &= 0x48 \\
 0x49 \oplus 0x02 &= 0x4b \\
 0x49 \oplus 0x05 &= 0x4c \\
 0x49 \oplus 0x06 &= 0x4f \\
 0x49 \oplus 0x0A &= 0x43 \\
 0x49 \oplus 0x49 &= 0x00
 \end{aligned}$$

¹xor = \oplus

Tabelle 1 enthält die erforderlichen Widerstandswerte für die diskreten Widerstände R_{LT} und R_{LB} und die daraus resultierenden unteren 4 Bits des Translationsbytes. Tabelle 2 enthält die erforderlichen Widerstandswerte für die diskreten Widerstände R_{HT} und R_{HB} und die daraus resultierenden oberen 4 Bits des Translationsbytes.

Durch das Anlöten der jeweiligen Widerstände können alle 128 mögliche Kombinationen für das Translation Byte erreicht werden. (128 Möglichkeiten ergeben sich da Bit a7 immer 0 ist.)

Im Handbuch (Abschnitt 7.9) ist aufgelistet welche, Translation Bytes bereits verwendet werden. Wenn weitere Sensor-Boards angefertigt werden, ist die Liste dort weiter zu pflegen.

Tabelle 1: Untere 4 Bit des Translation Byte

a3	a2	a1	a0	$R_{LT}[k\Omega]$	$R_{LB}[k\Omega]$
0	0	0	0	Open	Short
0	0	0	1	976	102
0	0	1	0	976	182
0	0	1	1	1000	280
0	1	0	0	1000	392
0	1	0	1	1000	523
0	1	1	0	1000	681
0	1	1	1	1000	887
1	0	0	0	887	1000
1	0	0	1	681	1000
1	0	1	0	523	1000
1	0	1	1	392	1000
1	1	0	0	280	1000
1	1	0	1	182	976
1	1	1	0	102	976
1	1	1	1	Short	Open

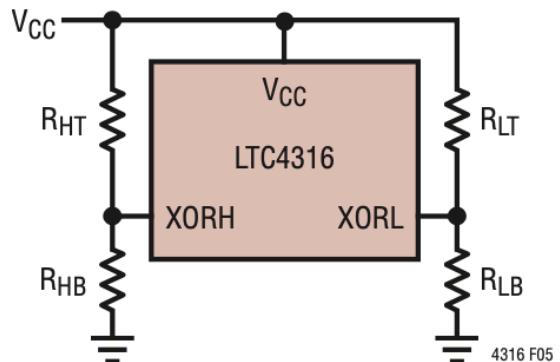


Abbildung 11: Translation Byte [10]

Tabelle 2: Obere 4 Bit des Translation Byte

a7	a6	a5	a4	$R_{HT}[k\Omega]$	$R_{HB}[k\Omega]$
0	0	0	0	Open	Short
0	0	0	1	976	102
0	0	1	0	976	182
0	0	1	1	1000	280
0	1	0	0	1000	392
0	1	0	1	1000	523
0	1	1	0	1000	681
0	1	1	1	1000	887

3.4 Companion Flash

Die Sensoren AS7261 und AS72651 benötigen einen Flash-Speicher, von welchem sie ihre Firmware laden können. Die jeweilige Firmware von AMS wird mithilfe von Flashcat-USB, einem USB Memory Programmer über das SPI (Serial Peripheral Interface), auf den Flash Speicher übertragen. Ein Leitfaden für diesen Vorgang wird von AMS unter dem Titel "How to Program AS72xx Firmware with FlashCatUSB" bereitgestellt und ist im Anhang zu finden. Der AT25SF041-SSHD-B wurde aus der von AMS bereitgestellten Liste kompatibler Flash-Speichern² ausgewählt, da er am günstigsten ist. Für den Messaufbau werden folgende Versionen verwendet.

Chip	Firmware
AS7261	AS7261_complete.bin
AS726X	AS7265_complete_moonlight_v1.bin

Die Binary-Files sind im Anhang zu finden.

²AS726x Design Considerations - 2.5 Flash Memory

4 Platine

Für diese Arbeit wurden zwei Platinen mit dem EDA³-Programm Eagle entworfen. Abbildungen des Schaltplans und der Platinen, sowie deren Eagle-Dateien befinden sich im Anhang. Mit Hilfe von externen Dienstleistern wurden 30 Sensorboards und drei Status & Adapterplatten angefertigt.

4.1 System Topologie

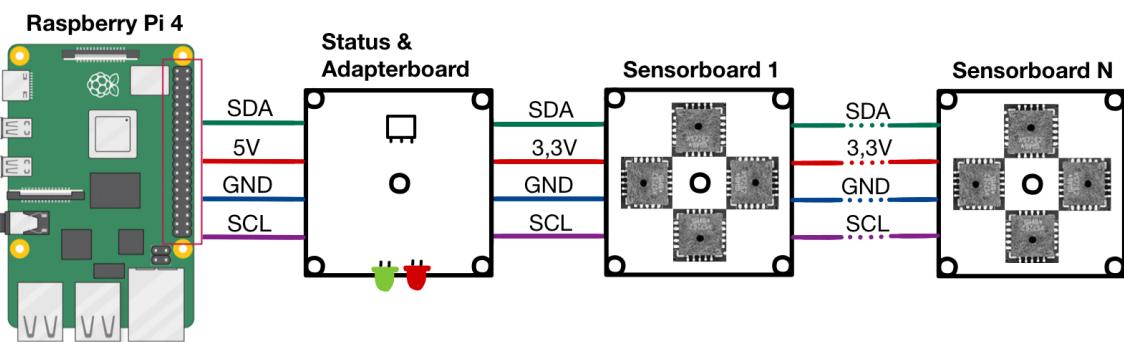


Abbildung 12: Verschaltung der Platinen [9]

Der Messaufbau besteht aus einem Rapberry Pi 4 Model B, welcher über ein Status & Adapterboard mit 1-10 Sensorsboards verbunden werden kann (Abbildung 12).

4.2 Status & Adapterboard

Da wie in Abschnitt 3.2 erklärt, der Rapberry Pi nicht die benötigte 3,3V Stromversorgung bereitstellt, wird ein Adapterboard (Abbildung 13) mit einem Spannungswandler (LM3940IT-3.3) verwendet. Auf dem Adapterboard findet der einheitliche Steckverbinder sowie die Pullup-Widerstände des I2C Bus Platz. Da das Adapterboard aufgrund seiner Bauform nicht falsch montiert werden kann, kann so die Verpolung der Sensoren ausgeschlossen werden. Die Bedeutung der Status LED wird im Handbuch unter Abschnitt 7.7 erläutert.

Der überflüssige Platz auf dem Adapterboard wurde für einen Prototyping-Bereich genutzt.

³Electronic design automation

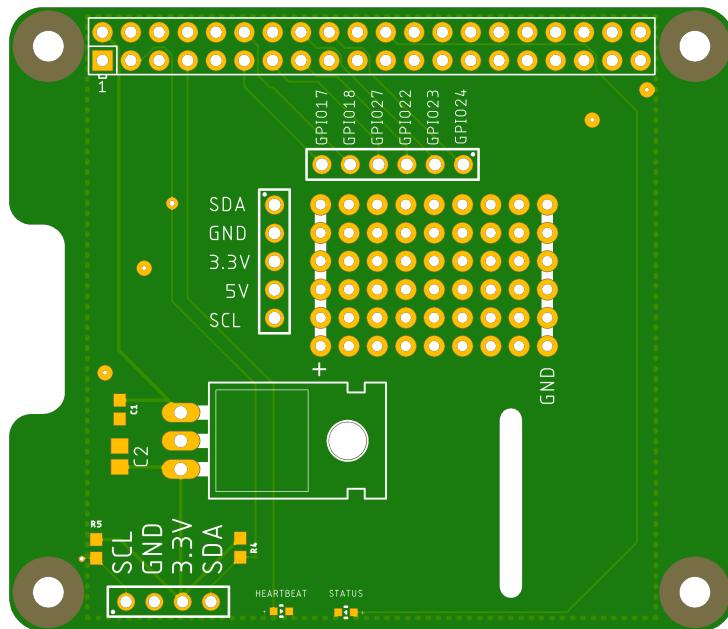


Abbildung 13: Platine des Status & Adapterboard

4.3 Sensorboard

Die Hauptaufgabe der Sensorboard Platine ist es den AS7261 und der AS7265X mit ihrem Companion Flash (Abschnitt 3.4) und über den I2C Translator (Abschnitt 3.3) dem I2C Bus zu verbunden. Außerdem werden verschiedene LEDs, Widerstände und Kondensatoren verbaut, die benötigt werden.

Status LED: Am AS7261 und AS7265X befindet sich jeweils eine rote Status-LED. Wenn es ein Problem mit dem Companion Flash gibt, fängt sie an zu blinken. Im Normalbetrieb kann die LED softwareseitig ein- und ausgeschaltet werden. Während der Messung sollte sie ausgeschaltet werden, da das rote Licht sonst die Messung verfälscht.

Pull-up-Widerstände: R7 und R8 sind die Pullup Widerstände des separaten I2C Bus welcher die AS7265X Sensoren miteinander verbindet.

R12 und R11 sind die Pullup Widerstände des I2C Bus welcher den AS7261 mit seinem LCT4316 verbindet.

R4 und R5 sind die Pullup Widerstände des I2C Bus welcher den AS72651 mit seinem LCT4316 verbindet.

I2C Enable Widerstände: Pin R6 ist mit 3.3V und Pin 8 (I2C Enable) des AS7261 verbunden. So wird I2C als Kommunikationsmodus des AS7261 ausgewählt. R3 erfüllt die gleiche Aufgabe für den AS72651.

Translation Byte Widerstände: Die 8 Widerstände auf der Rückseite, R1_XX und R2_XX, sind die in 3.3 beschriebenen Widerstände, welche das Translation Byte einstellen. Die Widerstände R1_XX bestimmen die Adresse des AS7261 und R2_XX die Adresse des AS72651.

Entstörkondensatoren: Im Datenblatt der Sensoren wird empfohlen, für jeden Sensor zwei parallele Entstörkondensatoren, mit den Kapazitäten $10\mu F$ und $100nF$, so nah wie möglich am Sensor zwischen GND und VCC zu platzieren. In Tabelle 3 sind die verwendeten Kondensatoren, ihre Abkürzung auf dem Sensorboard und der zugehörige Sensor aufgelistet.

Kürzel	Wert	Sensor
C5	$10\mu F$	AS7261
C4	$100nF$	AS7261
C1	$10\mu F$	AS72651
C8	$100nF$	AS72651
C2	$10\mu F$	AS72652
C3	$100nF$	AS72652
C7	$10\mu F$	AS72653
C6	$100nF$	AS72653

Tabelle 3: Entstörkondensatoren

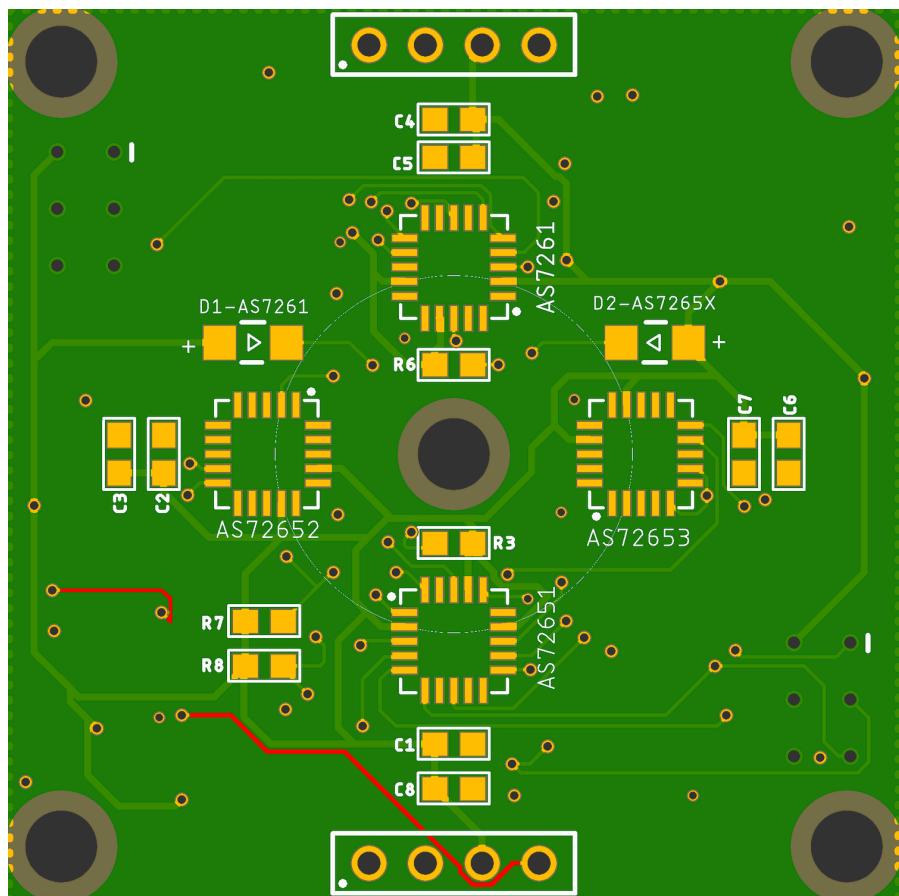


Abbildung 14: Vorderseite des Sensorboards I2C Leitungsverlauf in rot

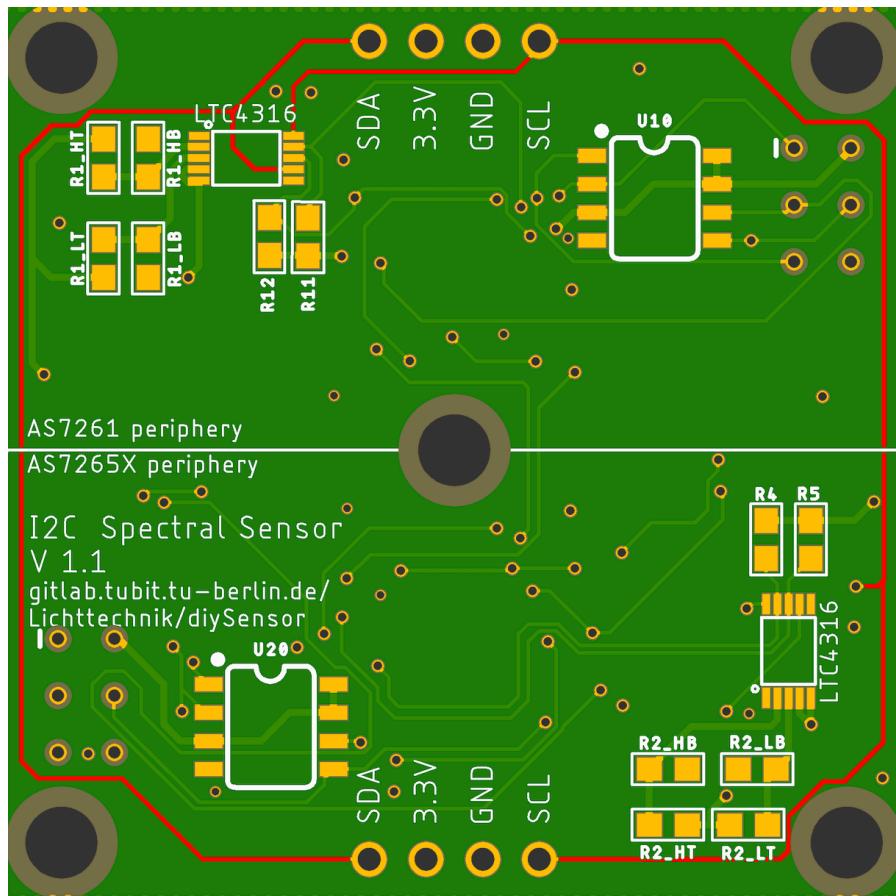


Abbildung 15: Rückseite des Sensorboards I2C Leitungsverlauf in rot

I2C Lanes: Die I2C Leitungen haben ihren Ursprung auf der Adapterplatine und werden mithilfe der seitlichen Steckverbinder über die Sensorboards durchgeschleift. Die maximal mögliche Länge einer I2C Leitung hängt von der Länge der Leitungskapazität sowie äußeren Störeinflüssen ab. Die Data und die Clock Leitung sind möglichst weit von anderen Datenleitungen, also auch voneinander entfernt platziert, da so Störeinflüsse durch elektromagnetische Felder minimiert werden. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die beiden Leitungen auf den Platinen die gleiche Länge haben, da sich sonst die Differenzen der Leitungslänge mit jeder angeschlossenen Platine addiert und es zu Timing Differenzen zwischen der Daten und Clock Leitung kommt. Der Verlauf der Leitungen ist in Abbildung 15 und 14 Rot gekennzeichnet.

Connector: Es gibt 4 durchkontakteerte Löcher auf der rechten und linken Seite der Pla-tine. Hier können unterschiedliche Steckverbinder mit 2.54 mm Pitch montiert werden. Es empfiehlt sich, verpolungssichere Steckverbinder zu verwenden, um Hardware Schäden vorzu-beugen. Für dieses Bauteil wurde keine SMD-Technik sondern Durchsteckmontage gewählt, da so eine bessere mechanische Festigkeit erreicht wird. Außerdem kann so alternativ zu einem Steckverbinder direkt ein Flachbandkabel angelötet werden.

5 Datenbank & Webinterface

Die Messdaten müssen sicher, einfach zugänglich und möglichst Speichereffizient abgelegt werden. Dafür eignet sich InfluxDB⁴ in Kombination mit einem Grafana⁵ Webinterface

5.1 InfluxDB

InfluxDB ist eine von InfluxData entwickelte Open Source Time Series Database. Time Series Database sind darauf optimiert, zusammengehörige Paare von Zeit(en) und Wert(en) zu verwalten und zu komprimieren. InfluxDB hat eine große Benutzer- und Entwicklerbasis. Es gibt vielseitige Interfaces um Daten zu visualisieren, darunter Grafana. Eine Time Series Database eignet sich für den Messaufbau, da die Spectrallmessdaten mit Zeitbezug erfasst werden.

5.2 Grafana

Grafana ist eine Open Source Anwendung zur grafischen Darstellung von Daten aus verschiedenen Datenbanken (InfluxDB, MySQL,...) in einem Webinterface. Das Webinterface ermöglicht sogenannte Dashboards (Abb. 16) anzulegen, in welchen die gespeicherten Daten vielseitig dargestellt werden können. Außerdem können die Daten im CSV-Format exportiert werden. Die Webschnittstelle eignet sich für den Messaufbau, da sie eine leicht verständliche Live-Überwachung der Messungen bietet.

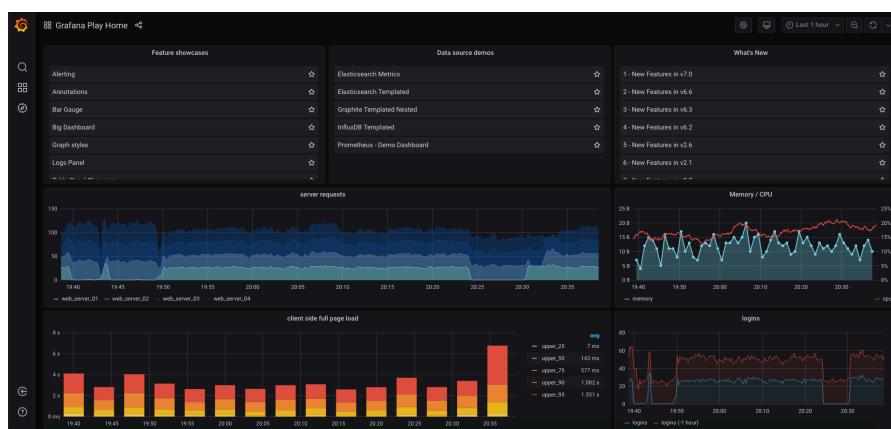


Abbildung 16: Beispiel Grafana Dashboard

⁴<http://influxdata.com>

⁵<http://Grafana.com>

6 C Code

Der Programmcode für den Messaufbau wurde in C geschrieben, da es einfach möglich ist, auf die GPIO des Raspberry Pi zuzugreifen. Im Übrigen ist die Sprache am Fachgebiet für Lichttechnik weitgehend geläufig.

Das folgende Kapitel ist in mehrere Punkte unterteilt. Zunächst werden die Funktionen der grundlegenden I2C Schnittstelle wiringPi Library vorgestellt (Abschnitt 6.1.1). Anschließend werden alle notwendigen Funktionen für die verwendeten AMS-Sensoren (Abschnitt 6.2) und die Schnittstelle zur Influx-Datenbank (Abschnitt 6.2) erläutert. Abschließend wird der eigentliche Programmablauf aus der C-Datei main.c (Abschnitt 6.4) und measurement.c (Abschnitt 6.5) dargestellt.

Der Programmcode ist auf Github⁶ und im Anhang zu finden.

6.1 wiringPi

Auf dem Rapberry Pi 4 ist die wiringPi Libarry vorinstalliert. Die Funktionalität der drei verwendeten C-Funktionen wird im folgenden beschrieben.

6.1.1 wiringPiI2CSetup

wiringPiI2CSetup baut eine I2C-Verbindung zu einem Slave-Gerät auf. Der Funktion wird beim Aufruf die I2C Adresse übergeben, mit welcher eine Verbindung aufgebaut werden soll: *wiringPiI2CSetup(address)*.

Der Rückgabewert ist der Standard Linux File Descriptor oder -1, falls ein Fehler auftritt. Der File Descriptor wird im Programmcode mit fd abgekürzt. Ein File Descriptor wird unter Linux als Bezeichner für eine Datei bzw. eine andere Ein-/Ausgabe-Ressource wie z. B. eine Pipe, einen Network-Socket oder eine I2C Verbindung genutzt.

Die Anzahl der File Descriptoren ist begrenzt. Daher muss die Verbindung mit der Funktion *close()* aus der Library: unistd.h geschlossen werden, wenn sie nicht mehr benötigt wird.

⁶<https://github.com/LennardBoediger/SpectralSensor>

6.1.2 wiringPiI2CWriteReg8

wiringPiI2CWriteReg8 überträgt ein Byte an einen I2C-Slave. Der Funktion wird beim Aufruf der File Descriptor einer aktiven I2C-Verbindung sowie ein Zielregister und die zu schreibenden 8bit Daten übergeben:

wiringPiI2CWriteReg8(fd, RegAdr, 8BitData).

Wenn der Schreibzugriff vom I2C-Slave bestätigt wurde, wird eine 0 zurückgegeben.

6.1.3 wiringPiI2CReadReg8

wiringPiI2CReadReg8 überträgt ein Byte an einen I2C-Slave. Der Funktion wird beim Aufruf der File Descriptor einer aktiven I2C Verbindung sowie ein Zielregister übergeben:
wiringPiI2CReadReg8(fd, RegAdr).

Der gelesene 8-Bit-Inhalt des Registers ist der Rückgabewert. Wenn das Lesen fehlschlägt, bleibt das Programm in einer Endlosschleife hängen.

6.2 AS726X Library

Die WiringPi_AS726X_Libary enthält alle Funktionen um den AS7261 und AS7265X zu steuern und auszulesen. Da der Beispielcode und die sonstigen Angaben im Datenblatt in vielen Detailfragen ungenau und Fehlerhaft sind, wurde die Arduino OpenSource Libarrys von sparkfun SparkFun_AS726X_Arduino_Library-master und SparkFun_AS7265x_Arduino_Library als Implementierungsgrundlage verwendet. Im ersten Schritt der Entwicklung wurde sie für die I2C Schnittstelle, wiringPi Libarry des Rapberry Pi 4 umgeschrieben und anschließend in ihrer Funktionalität erweitert, um für das Messsystem mit mehreren Sensoren auf dem gleichen I2C-Bus nutzbar zu sein.

Im Folgenden Text werden die Registeradressen mit den gleichen Namen wie im Programmcode bezeichnet. Die numerischen Adressen sowie ihre Aufgaben sind in den Abbildungen 17-22 zu finden.

STATUS Register	I ² C slave interface STATUS register Read-only	Register Address = 0x00 Bit 1: TX_VALID 0 → New data may be written to WRITE register 1 → WRITE register occupied. Do NOT write. Bit 0: RX_VALID 0 → No data is ready to be read in READ register. 1 → Data byte available in READ register.
WRITE Register	I ² C slave interface WRITE register Write-only	Register Address = 0x01 8-Bits of data written by the I ² C Master intended for receipt by the I ² C slave. Used for both virtual register addresses and write data.
READ Register	I ² C slave interface READ register Read-only	Register Address = 0x02 8-Bits of data to be read by the I ² C Master.

Abbildung 17: PhysicalRegister [8]

Bit	Bit Name	Default	Access	Bit Description
7	RST	0	R/W	Soft Reset, Set to 1 for soft reset, goes to 0 automatically after the reset
6	INT	0	R/W	Enable interrupt pin output (INT), 1: Enable, 0: Disable
5:4	GAIN	10	R/W	Sensor Channel Gain Setting (all channels) 'b00=1x; 'b01=3.7x; 'b10=16x; 'b11=64x;
3:2	BANK	10	R/W	Data Conversion Type (continuous) 'b00=Mode 0: X, Y, Z and NIR 'b01=Mode 1: X, Y, D and C 'b10=Mode 2: X, Y, Z, NIR, D and C 'b11=Mode 3: One-Shot operation
1	DATA_RDY	0	R/W	1: Data Ready to Read, sets INT active if interrupt is enabled. Can be polled if not using INT.
0	RSVD	0	R	Reserved; Unused

Abbildung 18: AS726x_CONTROL_SETUP 0x04 [8]

Bit	Bit Name	Default	Access	Bit Description
7:0	INT_T	0xFF	R/W	Integration time = <value> * 2.8ms

Abbildung 19: AS726x_INT_T 0x05 [8]

Bit	Bit Name	Default	Access	Bit Description
7:0	Device_Temp	0xFF	R/W	Internal device temperature data byte (°C)

Abbildung 20: AS726x_DEVICE_TEMP 0x06 [8]

Bit	Bit Name	Default	Access	Bit Description
7:6	RSVD	0	R	Reserved
5:4	ICL_DRV	00	R/W	LED_DRV current limit 'b00=12.5mA; 'b01=25mA; 'b10=50mA; 'b11=100mA;
3	LED_DRV	0	R/W	Enable LED_DRV 1: Enabled; 0: Disabled
2:1	ICL_IND	00	R/W	LED_IND current limit 'b00=1mA; 'b01=2mA; 'b10=4mA; 'b11=8mA;
0	LED_IND	0	R/W	Enable LED_IND 1: Enabled; 0: Disabled

Abbildung 21: AS726x_LED_CONTROL 0x07 [8]

Bit	Bit Name	Default	Access	Bit Description
5	AS72653_id	0	R	Second slave Available
4	AS72652_id	0	R	First slave available
1:0	SELECT DATA	00	R/W	0x00: Select master data 0x01: Select first slave data 0x02: Select second slave data

Abbildung 22: AS7265X_DEV_SELECT_CONTROL 0x4F [8]

Tabelle 4: Raw Data Registers [8]

Name	Adresse
AS7261_X	0x08
AS7261_Y	0x0A
AS7261_Z	0x0C
AS7261_NIR	0x0E
AS7261_DARK	0x10
AS7261_CLEAR	0x12
AS7265X_R_G_A	0x08
AS7265X_S_H_B	0x0A
AS7265X_T_I_C	0x0C
AS7265X_U_J_D	0x0E
AS7265X_V_K_E	0x10
AS7265X_W_L_F	0x12

6.2.1 virtualWriteRegister

Wie bei Embedded-Geräten üblich, werden Einstellungen auf dem Sensor verändert, indem verschiedene sogenannte Special Function Register mit Daten beschrieben werden.

Jedes Special Function Register ist 8Bit groß und hat eine Adresse. Jedes Bit des Registers repräsentiert eine Einstellung. Beispielsweise ist 0x07 (Abbildung 21) das LED Control Register des Sensors. Bit 0 des Registers beschreibt den Zustand der Status LED. Die Restlichen 7 Bit des Registers beschreiben den Zustand anderer LEDs, die für den Messaufbau aber irrelevant sind.

Wird Register 7 mit dem Dezimalwert 0 beschrieben sind alle LEDs aus. Wird es mit dem Dezimalwert 1 beschrieben, leuchtet nur die Status LED. Die Register lassen sich aber nicht direkt beschreiben. Stattdessen sind sie als sogenannte virtuelle Register implementiert. Das heißt, dass nur Register 0x01 (WRITE Register Abbildung 17) beschrieben werden kann. Um Daten in eines der Special Funktion Register zu schreiben, wird die C-Funktion virtualWriteRegister verwendet. Die Funktionsweise lässt sich in 4 Schritten zusammenfassen:

- Zeile 8 wartet, bis das WRITE Register leer ist. Was dadurch angezeigt wird, indem das Bit AS72XX_TX_VALID im Register AS72XX_STATUS_REG den Wert 1 annimmt.
- Zeile 14 schreibt die virtuelle Adresse in das WRITE Register und setzt zusätzlich Bit 8 des WRITE Register auf 1, um zu zeigen, dass es sich um einen schreibenden Zugriff auf das virtuelle Register handelt.
- Zeile 20 wartet erneut bis das WRITE Register leer ist.
- Zeile 26 schreibt die Daten in das WRITE Register

Der Sensor wird jetzt selber die übertragenen Daten aus dem WRITE Register in das angegebene virtuelle Register kopieren.

```
1
2 //Write to a virtual register in the AS726x
3 void virtualWriteRegister(uint8_t virtualAddr, uint8_t ←
4     dataToWrite, int fd){
5     uint8_t status;
6     //Wait for WRITE register to be empty
7     while (1){
8         status = wiringPiI2CReadReg8(fd, AS72XX_SLAVE_STATUS_REG);
9         if((status & AS72XX_SLAVE_TX_VALID) == 0) {
10             break; // No inbound TX pending at slave. Okay to ←
11             write now.
12         }
13     }
14 }
```

```

11         delay(POLLING_DELAY);
12     }
13     // Send the virtual register address (setting bit 7 to ←
14     // indicate a write a register).
14     wiringPiI2CWriteReg8(fd, AS72XX_SLAVE_WRITE_REG, ←
15     (virtualAddr | 0x80));
16
16     //Wait for WRITE register to be empty
17     while (1)
18     {
19         status = wiringPiI2CReadReg8(fd, ←
20             AS72XX_SLAVE_STATUS_REG);
21         if ((status & AS72XX_SLAVE_TX_VALID) == 0){
22             break; // No inbound TX pending at slave. Okay to ←
23             write now.
24         }
25         delay(POLLING_DELAY);
26     }
25     // Send the data to complete the operation.
26     wiringPiI2CWriteReg8(fd, AS72XX_SLAVE_WRITE_REG, ←
27     dataToWrite);
27 }
```

6.2.2 virtualReadRegister

Die Unterschiedlichen Messdaten des Sensors werden in dedizierten Registern gespeichert. Es ist aber nur über den indirekten Weg des AS72XX_READ_REG und der virtuellen Registeradressen möglich Daten auszulesen. Die Funktionsweise der zum Datenauslesen benötigten Funktion `virtualReadRegister` lässt sich wieder in 4 Schritte aufteilen.

- Das AS72XX_READ_REG wird ausgelesen, ohne dass die Daten verarbeitet werden.
Dieser Schritt ist wie ein Reset des Registers zu verstehen.
- Zeile 12 schreibt die virtuelle Adresse in das WRITE Register und setzt zusätzlich Bit 8 des WRITE Register auf 0 um zu zeigen, dass es sich um einen Lesendezugriff auf das virtuelle Register handelt.
- Sobald das AS72XX_STATUS_REG den Wert AS72XX_TX_VALID annimmt, sind die Daten aus dem angegebenen virtuellen Register in das AS72XX_READ_REG kopiert worden.

- Zeile 28 liest die Daten aus dem S72XX_READ_REG
-

```

1 //Read a virtual register from the AS726x
2 uint8_t virtualReadRegister(uint8_t virtualAddr, int fd){
3     uint8_t status;
4     //Do a prelim check of the read register
5     status = wiringPiI2CReadReg8(fd, AS72XX_SLAVE_STATUS_REG);
6     if ((status & AS72XX_SLAVE_RX_VALID) != 0){ //There is data ←
7         to be read
8         /*uint8_t incoming = */wiringPiI2CReadReg8(fd, ←
9             AS72XX_SLAVE_READ_REG); //Read the uint8_t but do ←
10            nothing with it
11    }
12    //Wait for WRITE flag to clear
13    while (1) {
14        status = wiringPiI2CReadReg8(fd, ←
15            AS72XX_SLAVE_STATUS_REG);
16        if ((status & AS72XX_SLAVE_TX_VALID) == 0){
17            break; // If TX bit is clear, it is ok to write
18        }
19        delay(POLLING_DELAY);
20    }
21    // Send the virtual register address (bit 7 should be 0 to ←
22    // indicate we are reading a register).
23    wiringPiI2CWriteReg8(fd, AS72XX_SLAVE_WRITE_REG, ←
24        virtualAddr);
25
26    //Wait for READ flag to be set
27    while (1)
28    {
29        status = wiringPiI2CReadReg8(fd, ←
30            AS72XX_SLAVE_STATUS_REG);
31        if ((status & AS72XX_SLAVE_RX_VALID) != 0) break; // ←
32            Read data is ready.
33        delay(POLLING_DELAY);
34    }
35
36    uint8_t incoming = wiringPiI2CReadReg8(fd, ←
37        AS72XX_SLAVE_READ_REG);
38    return (incoming);
39 }

```

6.2.3 MeasurementFromAddress

Die Funktion baut eine I2C Verbindung zur übergebenen Bus-Adresse auf und ruft die Funktion takeMeasurements mit dem File Descriptor der aktiven I2C Verbindung auf. Nachdem die Funktion takeMeasurements durchgelaufen ist, wird die I2C Verbindung wieder geschlossen.

```
1 //Calls takeMeasurements on gives I2C Address
2 void MeasurementFromAddress(int address){
3     int fd = wiringPiI2CSetup(address);
4     if (fd == -1) {
5         printf("i2c failed");
6     }
7     takeMeasurements(fd); // takesMeasurements Readings can now ←
                           be accessed via getX(), getY(), etc
8     close(fd);
9 }
```

6.2.4 takeMeasurements

Die Funktion takeMeasurements ruft die Funktion setMeasurementMode mit dem Parameter 3 auf. Das setzt den aus 3.1.1 bekannten Bank Mode der übergebenen I2C Verbindung auf Bank Mode 3. Die One-Shot Messung wird sofort gestartet. In Zeile 9 wird gewartet, bis die Messung abgeschlossen ist. Um sicherzustellen, dass die Funktion DataAvailable richtig arbeitet, muss vor der Messung das Flag DataAvailable auf 0 gesetzt werden (Zeile 3). Die Daten werden hier nicht ausgelesen, daher gibt es keinen Rückgabewert.

```
1 //Tells IC to take measurements and polls for data ready flag
2 void takeMeasurements(int fd) {
3     clearDataAvailable(fd); //Clear DATA_RDY flag when using ←
                           Mode 3
4
5     //Goto mode 3 for one shot measurement of all channels
6     setMeasurementMode(3, fd);
7
8     //Wait for data to be ready
9     while (dataAvailable(fd) == 0) delay(POLLING_DELAY); ←
                           //Potential TODO: avoid this to get faster nearly ←
                           parallel measurements
```

10

```
11     //Readings can now be accessed via getViolet(), getBlue(), ←  
     etc  
12 }
```

6.2.5 setMeasurementMode

Mit der Funktion setMeasurementMode werden die Bank Mode Bits 2 und 3 des AS726x_CONTROL_SETUP Registers mit dem gewünschten Wert für den Bank Mode beschrieben.

Da die anderen Bits des Registers noch weitere Einstellungen repräsentieren, welche nicht verändert werden sollen, muss das Register erst ausgelesen werden. Anschließend werden nur die Bank Mode Bits auf 0 gesetzt, um im nächsten Schritt mit dem gewünschten neuen Bank Modewert beschrieben zu werden. Die Bedeutung der Bank Modes ist in 3.1.1 erläutert.

```
1 //Sets the measurement mode  
2 //Mode 0: Continuous reading of VBGY (7262) / STUV (7263)  
3 //Mode 1: Continuous reading of GYOR (7262) / RTUX (7263)  
4 //Mode 2: Continuous reading of all channels (power-on default)  
5 //Mode 3: One-shot reading of all channels  
6 void setMeasurementMode(uint8_t mode, int fd) {  
7     if (mode > 0b11) mode = 0b11;  
8  
9     //Read, mask/set, write  
10    uint8_t value = virtualReadRegister(AS726x_CONTROL_SETUP, ←  
11        fd); //Read  
12    value &= 0b11110011; //Clear BANK bits  
13    value |= (mode << 2); //Set BANK bits with user's choice  
14    virtualWriteRegister(AS726x_CONTROL_SETUP, value, fd); ←  
        //Write  
15 }
```

6.2.6 dataAvailable & clearDataAvailable

Das Bit dataAvailable im Register AS726x_Control_Setup wird vom Sensor auf 1 gesetzt, wenn nach einer Messung neue Daten vorhanden sind. Interrupts müssen dafür ausgeschaltet sein. Wenn eine One-Shot Messung im Bank Mode 3 durchgeführt wird, muss das dataAvailable Bit mit der Funktion clearDataAvailable auf 0 gesetzt werden. Die Funktion dataAvailable gibt den Wert des DataAvailable Bit zurück.

6.2.7 Rohwerte des AS7261 auslesen

Die in Abschnitt 3.1.1 beschrieben 6 Channel des AS7261 werden mit den folgenden Funktionen ausgelesen:

- getX_CIE(fd)
- getY_CIE(fd)
- getZ_CIE(fd)
- getNIR(fd)
- getDark(fd)
- getClear(fd)

Der File Deskriptor einer I2C Verbindung mit einem AS7261 und das zu lesende Register (Abbildung 4) wird als Übergabeparameter erwartet.

Um den Messwert auszulesen, wir die Funktion getchannel aufgerufen. Der Rückgabewert ist der 16-Bit Messwert aus dem jeweiligen Register vom Datentyp Integer.

```
1 //Get RAW AS7261 readings
2 int getX(int fd) { return(getChannel(AS7261_X, fd));}
3 int getY(int fd) { return(getChannel(AS7261_Y, fd));}
4 int getZ(int fd) { return(getChannel(AS7261_Z, fd));}
5 int getNIR(int fd) { return(getChannel(AS7261_NIR, fd));}
6 int getDark(int fd) { return(getChannel(AS7261_DARK, fd));}
7 int getClear(int fd) { return(getChannel(AS7261_CLEAR, fd));}
```

6.2.8 getChannel

Da die Messdaten 16 Bit groß sind, der Sensor aber nur über 8 Bit Register verfügt, werden 2 aufeinander folgende Register ausgelenzen und im Big-Endian Format in einer 16 Bit Variable gespeichert . Die Funktion getChannel erwartet den File Descriptor einer I2C Verbindung zu einem Sensor und die Adressen des High Bytes eines Raw Data Registers. Der Rückgabewert ist der 16-Bit Messwert aus dem jeweiligen Register vom Datentyp Integer.

```
1 //A the 16-bit value stored in a given channel registerReturns
2 int getChannel(uint8_t channelRegister, int fd){
3     int colorData = virtualReadRegister(channelRegister, fd) ←
4         << 8; //High uint8_t
5     colorData |= virtualReadRegister(channelRegister + 1, fd); ←
6         //Low uint8_t
7     return(colorData);
8 }
```

6.2.9 Rohwerte des AS7265X auslesen

Da beim Lesen des AS7265X, 3 Sensoren unter der gleichen Adresse erreichbar sind (Abbildung 4), muss zusätzlich zum File Descriptor und des Zielregisters der Device Identifier angeben werden. Die folgenden Funktionen übernehmen diese Aufgaben und können genutzt werden, um Rohdaten auslesen:

AS72651	AS72652	AS72653
getR(fd)	getG(fd)	getA(fd)
getS(fd)	getX(fd)	getB(fd)
getT(fd)	getI(fd)	getC(fd)
getU(fd)	getJ(fd)	getD(fd)
getV(fd)	getK(fd)	getE(fd)
getW(fd)	getL(fd)	getF(fd)

Um den Messwert auszulesen, wir die Funktion getChannel_AS7265X aufgerufen.

Der Rückgabewert ist der 16-Bit Messwert aus dem jeweiligen Register vom Datentyp Integer.

6.2.10 getChannel_AS7265X

Die Funktion verarbeitet den aus Abschnitt 6.2.9 bekannten Device Identifier, indem die Funktion selectDevice aufgerufen wird. Da es aber keine Möglichkeit gibt zu überprüfen ob der Gerätewechsel erfolgreich war, muss vorher überprüft werden ob das jeweiligen Slavegerät AS72652 oder AS72653 vorhanden ist. Ist ein Slave nicht vorhanden, wird der Wert -1 zurückgegeben. Ohne diese Überprüfung ist nicht sichergestellt, dass keine falschen Werte aus den gleich nummerierten Registern des AS72651 ausgelesen werden, obwohl Werte eines nicht vorhanden oder falsch aufgelöten Slavesensors (AS72652 / AS72653) erwartet werden. Das eigentliche Auslesen des 16-Bit Messwerts erfolgt mithilfe der Funktion getChannel, das Ergebnis ist der Rückgabewert der Funktion getChannel_AS7265X.

```
1 // returns Color channel of AS7265X
2 // returns -1 if slave AS72651 or AS72652 is not available
3 int getChannel_AS7265X(int device, uint8_t channelRegister, int ←
4     fd){
5     selectDevice(AS72651_id, fd);    //select AS72651 to verify ←
6         presence of slave sensors
7     if (device == AS72651_id){
8         return getChannel(channelRegister, fd);
9     }
10    else if(device == AS72652_id && scan_AS7262(fd)){
11        selectDevice(device, fd);
12        return getChannel(channelRegister, fd);
13    }
14    else if (device == AS72653_id && scan_AS7263(fd)){
15        selectDevice(device, fd);
16        return getChannel(channelRegister, fd);
17    }
18    return -1;
19 }
```

6.2.11 selectDevice

Die Notwendigkeit für selectDevice wurde in Abschnitt 6.2.10 bereits erläutert. Laut Datenblatt sollen nur die Bits 0 und 1 des DEV_SELECT_CONTROL Registers beschrieben werden, das stimmt aber nicht.

In der Realität muss das gesamte 8-bit Register mit folgenden Werten beschrieben werden um beim anschließenden Lesevorgang Daten vom jeweiligen Sensor zu erhalten.

DEV_SELECT_CONTROL	Sensor
0x00	AS72651
0x01	AS72652
0x02	AS72653

```
1 //Select which AS7265X Device is used
2 //AS72651_id or AS72652_id or AS72653_id
3 void selectDevice(uint8_t device, int fd) {
4     //Set the bits 0:1. Just overwrite whatever is there because ←
5     //masking in the correct value doesn't work.
6     virtualWriteRegister(AS7265X_DEV_SELECT_CONTROL, device, fd);
7 }
```

6.2.12 Enable/Disable Indicator

Mit der Funktion enableIndicator wird das 0 Bit des AS726x_LED_CONTROL Register auf 1 gesetzt. So wird die rote Status LED des jeweiligen Sensors auf dem Sensorboard angeschaltet.

Mit der Funktion disableIndicator wird das gleiche Bit auf 0 gesetzt, also die LED ausgeschaltet.

Als Übergabeparameter wird bei beiden Funktionen der File Descriptor einer aktiven I2C-Verbindung erwartet.

6.2.13 softReset

Wenn einzelne Messwerte außerhalb des Erwartungsbereichs liegen oder ähnliche Probleme auftreten, kann in einigen Fällen ein Soft-Reset das Problem beheben. Da bei der hier be-

schriebenen Implementierung keine Fehler auftreten, wird die Funktion nicht benötigt, kann aber in zukünftigen Versionen verwendet werden.

Die Funktion softReset setzt das 8 Bit des Registers CONTROL_SETUP auf 1 um einen softReset auszulösen. Das Datenblatt gibt an, dass mindestens 1000 ms gewartet werden muss, bevor der softReset abgeschlossen ist und der Sensor wieder genutzt werden kann. Für beide Funktionen wird der File Descriptor einer aktiven I2C-Verbindung als Übertragungsparameter erwartet.

6.2.14 I2CScan

Die Funktion I2CScan wird zu Beginn des Programms aufgerufen um festzustellen, welche Sensoren an den I2C DataBus angeschlossen sind. Die gefundenen Sensoradressen und der Sensortyp werden in das Struct sensor_list geschrieben.

Die Adressen werden außerdem im Terminal angezeigt, so dass der Benutzer überprüfen kann, ob alle erwarteten Sensoren erkannt werden. Als Übergabeparameter wird im call by reference style ein Pointer zu einem Struct vom Typ sensor_list erwartet. Da die Daten direkt in das extern deklarierte Struct geschrieben werden, gibt es keinen Rückgabewert. Um die angeschlossenen Sensoren zu detektieren, wird zu jeder der 2^8 möglichen I2C Adressen eine Verbindung aufgebaut und ein Schreibversuch mithilfe der Funktion wiringPil2CWriteReg8 vorgenommen. Wenn die Funktion wiringPil2CWriteReg8 eine 0 zurückgibt, war der Schreibversuch erfolgreich. Somit muss ein Sensor unter dieser Adresse vorhanden sein. Das im Datenblatt nicht erwähnte Register mit der Adresse 0x05 wurde zufällig ausgewählt, da es mit dem Wert 0x01 beschrieben werden kann, ohne dass der Sensor sein Verhalten verändert. Die Funktion getVersion wird genutzt um die Version des gefunden Sensors zu ermitteln. Wenn ein AS72651 erkannt wird, wird auch abgefragt, ob die Slavesensoren AS72652 und AS72653 vorhanden sind. Diese Information wird nur im Terminal ausgegeben und nicht in das Struct sensor_list geschrieben, da es für den Programmablauf nicht notwendig ist.

```
1 // Scanns for sensors on all 128 possible addresses
2 // input pointer to to array of sensor_list struct size hast to ←
   be 128
3 // wirtes sensor address and type to array of sensor_list struct
4 void I2C_Scan(sensor_list *const s){
5     //printf("test struct address in fuction%i is value ←
6     %i\n",s[0].address, s[0].type );
```

```

6     printf("-----I2C Scan -----\\n");
7     uint8_t sensor_count = 0;
8     for (int address = 0; address < 128; ++address)
9     {
10         int fd = wiringPiI2CSetup(address);
11         if (fd != -1){
12             //try to write to some hopefully unused ←
13             register(5)-> return value: 0 indicates that ←
14             someone was listening
15             //this possibly writes to the Integration Value ←
16             Register so make shure to properly set is ←
17             before starting a measurement
18             if (wiringPiI2CWriteReg8 (fd, 5, 1) == 0){
19                 int version = getVersion(fd);
20                 if (version == SENSORTYPE_AS7261){
21                     printf("Device at: 0x%X is ←
22                         AS7261\\n",address);
23                     s[sensor_count].address = address;
24                     s[sensor_count].type = SENSORTYPE_AS7261;
25                     sensor_count++;
26                 }
27                 else if(version == SENSORTYPE_AS72651){
28                     printf("Device at: 0x%X is AS72651",address);
29                     s[sensor_count].address = address;
30                     s[sensor_count].type = SENSORTYPE_AS72651;
31                     sensor_count++;
32                     if (scan_AS7262(fd)){
33                         printf(", AS72652");
34                     }
35                     if (scan_AS7263(fd)){
36                         printf(", AS72653");
37                     }
38                     printf("\\n");
39                 }
40             }
41             close(fd);
42         }
43         printf("-----\\n");
44     }

```

6.2.15 getVersion

Die Funktion getVersion gibt den Inhalt der Registers AS726x_HW_VERSION zurück. Indem der zurückgegebene Wert mit den beiden SENSORTYPE Werten verglichen wird (SENSORTYPE_AS7261 und SENSORTYPE_AS72651), kann festgestellt werden, um welchen Sensor es sich handelt. Als Übergabeparameter wird bei beiden Funktionen der File Descriptor einer aktiven I2C-Verbindung erwartet.

6.2.16 scanAS7262

Als Übergabeparameter wird bei der Funktionen der File Descriptor einer aktiven I2C Verbindung mit einem AS72651 erwartet.

Die Funktion überprüft den Status des 4. Bit des Registers DEV_SELECT_CONTROL und gibt ihn zurück. Das Bit ist auf 1 gesetzt, wenn der Slavesensor AS7262 vorhanden ist, im Falle der Abwesenheit ist es 0.

Das AS7265X-Datenblatt gibt fälschlicherweise an, dass das 5. Bit geprüft werden muss.

6.2.17 scanAS7263

Als Übergabeparameter wird bei der Funktionen der File Descriptor einer aktiven I2C Verbindung mit einem AS72651 erwartet.

Die Funktion überprüft den Status des 5. Bit des Registers DEV_SELECT_CONTROL und gibt ihn zurück. Das Bit ist auf 1 gesetzt wenn der Slavesensor AS7263 vorhanden ist, im falle der Abwesenheit ist es 0.

6.2.18 setGain

Die Messergebnisse der Sensoren können intern verstärkt werden, was Beispielsweise in dunklen Messumgebungen oder bei der Verwendung einer relativ lichtundurchlässiger Streuscheibe notwendig ist.

Außerdem kann das Speicherregister besser ausgesteuert werden, um ein genauereres Messergebnis zu erhalten. Um den Verstärkungsfaktor einzustellen, wird die Funktion setGain benötigt.

Die Funktion setGain beschreibt das vierte und fünfte Bit des Registers CONTROL_SETUP mit einem der vier möglichen Zustände, welcher an die Funktion übergebenen wird.

Wert	Verstärkungsfaktor
0	1x
1	3.7x
2	16x
3	64x

Ist der übergebe Wert größer als 3, wird das Register auf den Wert 3 gesetzt.

$$\text{Registerwert} = \text{Integrierter Messwert} \cdot \text{Gain} \quad (2)$$

6.2.19 setIntegrationTime

Um die Integrationszeit der Messung einzustellen, wird in das Register AS726x_INT_T ein Wert (integrationValue) zwischen 0 und 255 geschrieben. Die Integrationszeit errechnet sich indem dieser Wert mit dem Faktor 2.8ms multipliziert wird. Die Funktion setIntegrationTime erwartet als Übergabeparameter das integrationValue und den File Descriptor sowie eine aktive I2C-Verbindung zu einem Sensor.

$$\text{Integrationszeit} = \text{integrationValue} \cdot 2.8ms \quad (3)$$

6.2.20 disableInterrupt

Die Funktion disableInterrupt setzt das INT Bit im Register AS726x_CONTROL_SETUP auf 0 um Interrupts auszuschalten. Da der Interrupt-Pin auf der Sensor-Platine nicht angeschlossen ist, können Messungen nur durchgeführt werden, wenn der Interrupt ausgeschaltet ist. Laut Datenblatt wird der Interrupt beim Systemstart ausgeschaltet.

6.3 influxDB Library writeToDatabase

Um die Messdaten der Sensoren in die aus 5.1 bekannte InfluxDB zu schreiben, wurde die InfluxDB Library entwickelt. Sie enthält nur eine einzige nach außen sichtbare Funktion: writeToDatabase.

6.3.1 writeToDatabase

Um die Datenbank zu beschreiben, muss zuerst ein Socket geöffnet werden um sich mit der InfluxDB Server-Instanz zu verbinden. Der InfluxDB Sever ist unter der Localhostaddress 127.0.0.1 am Port 8086 zu erreichen. Diese Werte können in der influxdb.h Datei angepasst werden, falls in Zukunft die Notwendigkeit besteht, den Server auf einem externen Gerät zu betreiben.

Die Kommunikation mit dem InfluxDB Server erfolgt über das HTTP basierte InfluxDB-Line-Protocol. In Zeile 68 wird der Datenbankname, Username, Passwort der Datenbank und die Größe des Bodys der Anfrage in den Header-Teil der HTTP Anfrage geschrieben. In Zeile 64 wird der Body-Teil der Anfrage im InfluxDB-Line-Protocol Format erzeugt. Dieser enthält den Bezeichner des Messwerts (z.B. X oder Y), die I2C Adresse des jeweiligen Sensors von dem die Messdaten stammen, den Messwert selbst sowie den Zeitstempel der Messung in ms. In Zeile 85 wird der HTTP-Request, bestehend aus Header und Body, an den Server übertragen. Die Antwort vom Server wird gespeichert und anschließen auf die erwartete Rückmeldung **HTTP/1.1 204 No Content** untersucht. Wenn der Schreibversuch fehlschlägt, wird eine Meldung im Terminal angezeigt. Außerdem geht die Power-LED auf dem Status & Adapterboard aus.

6.4 main

Die main-Funktion führt den Benutzer durch den Auswahlprozess der Einstellungen (Integrationszeit, Verstärkungsfaktor und Intervall der Messpunkte) und startet dann die Messung.

6.4.1 default_values.h

Alternativ zum Auswahlprozess können die Einstellungen in der Datei default_values.h geändert werden. Hier ist es außerdem möglich, den zu verwendenden Sensortyp auszuwählen und die benutzerfreundliche Menüführung auszuschalten(Plug-and-Play). Zudem kann eingestellt werden, dass die Messungen manuell auslöst werden, z. B. um den Sensor zu kalibrieren (Maunual-Trigger).

```
1 #define DEFAULT_INTEGRATION_VALUE 20 // [0:255] Integration ←  
Value * 2,8ms = Integration Time
```

```
2 #define DEFAULT_GAIN 4 // Set Gain [0:3] 0->1x 1->3.7x 2->16x ←
    3->64x 4->Auto Gain:
3 #define DEFAULT_Mesuremnt_Interval 1 // Set Measurement ←
    Interval in Minutes [1:65535]
4 #define USE_AS7261 1 // 1 = use AS7261 0 = ignore AS7261
5 #define USE_AS7265X 1 // 1 = use AS7265X 0 = ignore AS7265X
6 #define PLUG_AND_PLAY 0 // 1 = Start Measurement instantly 0 = ←
    Show Settings-Menu
7 #define MANUAL_TRIGGER 1 // 1 = Press Enter for next Mesurment ←
    0 = Use the given Interval
```

6.5 measurement

Die Datei measurement.c enthält alle Funktionen, die mithilfe der beiden Libraries (influxDB Library 6.3, AS726X Library 6.2), Messergebnisse von den Sensoren abfragen und in der Datenbank speichern können.

6.5.1 fixedGainMeasurementAS7261 & fixedGainMeasurementAS7265X

Bei der Messung mit konstanter Verstärkung werden alle Werte mit einer festen Integrationszeit und einem festen Gain erfasst. Es gibt also für jeden Kanal einen Wert, der unter dem gleichen Namen gespeichert wird. In der Datenbank sind sie unter den in Tabelle 5 und 6 beschriebenen Namen zu finden.

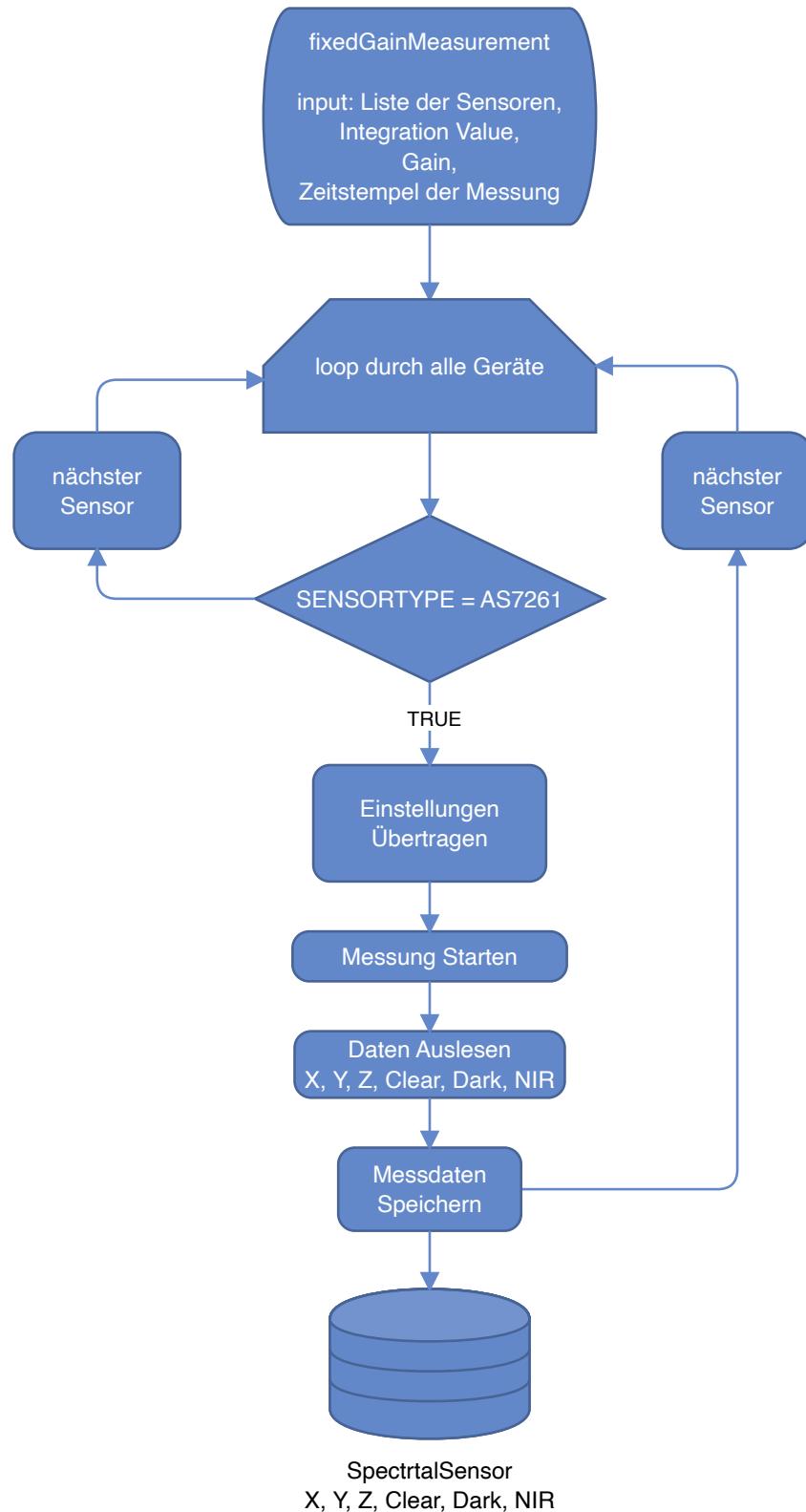
Fixed Gain	Fixed Gain		
X	R	G	A
Y	S	X	B
Z	T	I	C
Clear	U	J	D
Dark	V	K	E
NIR	W	L	F

Tabelle 5: AS7261 Datenbank-ID bei festem Verstärkungsfaktor

Tabelle 6: AS7265X Datenbank-ID bei festem Verstärkungsfaktor

Das Flussdiagramm in Abbildung 23 beschreibt den Ablauf für fixedGainMeasurementAS7261. Der Ablauf von fixedGainMeasurementAS7265X ist bis auf den SENSORTYP und die Namen der Channel identisch.

Abbildung 23: Flowchart fixedGainMeasurementAS7261



6.5.2 autoGainMeasurementAS7261 & autoGainMeasurementAS7265X

Bei der Auto-Gain-Messung wird für jeden der 4 möglichen Verstärkungsfaktoren eine Messung mit fester Integrationszeit durchgeführt. Die Messergebnisse werden in der Datenbank unter den in Tabelle 7 und 8 beschriebenen Namen gespeichert. Darüber hinaus wird bei jeder einzelnen Messung für jeden Channel individuell der Messwert ausgewählt, welcher das 16 Bit Register am besten aussteuert. Dieser Wert wird mit der Funktion `matchValueToMaxGain` (Abschnitt 6.5.3) an die maximale Verstärkung angepasst um einen sprungfreien Output-Plot zu ermöglichen (Datenbank-ID AutoGain). Zuletzt wird der verarbeitete Wert und der ursprünglich verwendete Gain in der Datenbank gespeichert.

Gain 0	Gain 1	Gain 2	Gain 3	AutoGain	UsedGain
X*0	X*1	X*2	X*3	X	gainX
Y*0	Y*1	Y*2	Y*3	Y	gainY
Z*0	Z*1	Z*2	Z*3	Z	gainZ
Clear*0	Clear*1	Clear*2	Clear*3	Clear	gainClear
Dark*0	Dark*1	Dark*2	Dark*3	Dark	gainDark
NIR*0	NIR*1	NIR*2	NIR*3	NIR	gainNIR

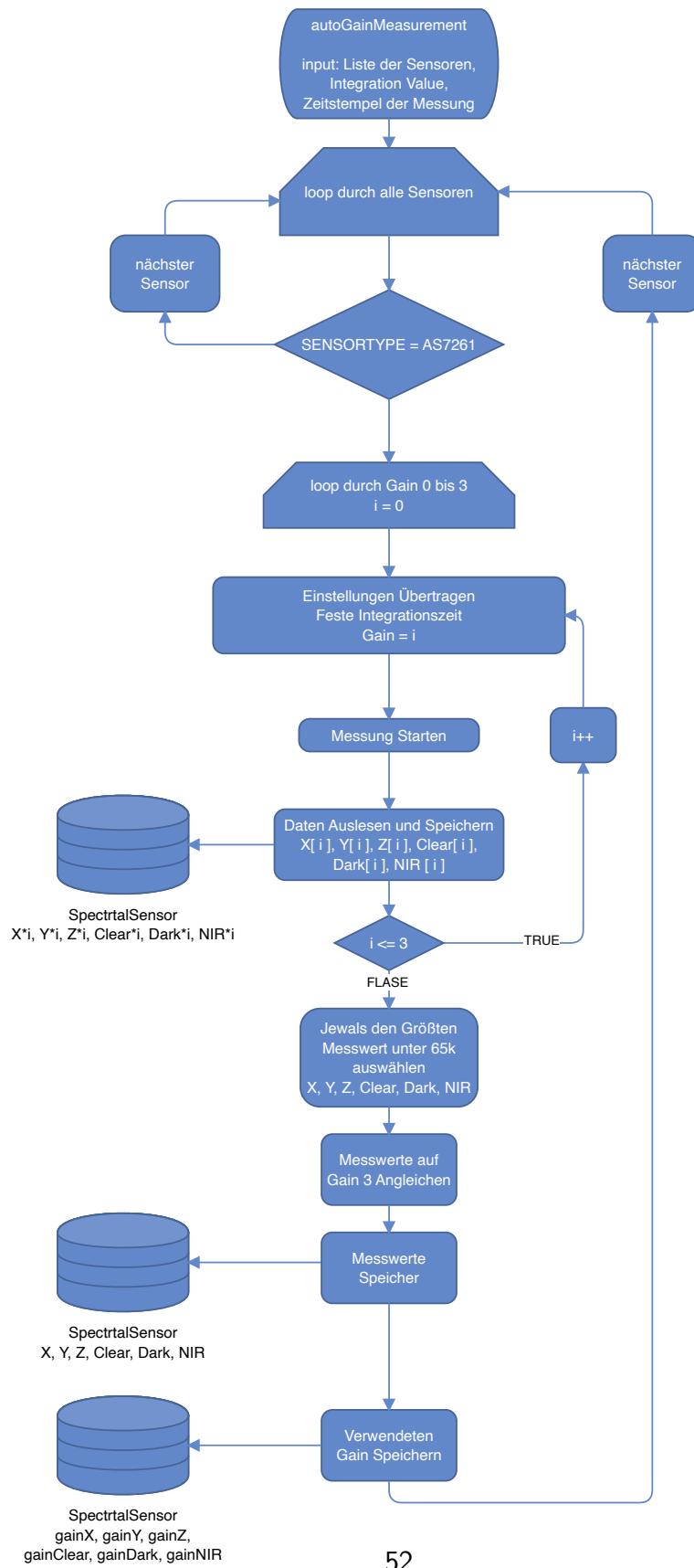
Tabelle 7: AS7261 Datenbank-ID bei automatischem Verstärkungsfaktor

Gain 0	Gain 1	Gain 2	Gain 3	AutoGain	UsedGain
A*0	A*1	A*2	A*3	A	gainA
B*0	B*1	B*2	B*3	B	gainB
C*0	C*1	C*2	C*3	C	gainC
D*0	D*1	D*2	D*3	D	gainD
E*0	E*1	E*2	E*3	E	gainE
F*0	F*1	F*2	F*3	F	gainF
G*0	G*1	G*2	G*3	G	gainG
H*0	H*1	H*2	H*3	H	gainH
R*0	R*1	R*2	R*3	R	gainR
I*0	I*1	I*2	I*3	I	gainI
S*0	S*1	S*2	S*3	S	gainS
J*0	J*1	J*2	J*3	J	gainJ
T*0	T*1	T*2	T*3	T	gainT
U*0	U*1	U*2	U*3	U	gainU
V*0	V*1	V*2	V*3	V	gainV
K*0	K*1	K*2	K*3	K	gainK
W*0	W*1	W*2	W*3	W	gainW
L*0	L*1	L*2	L*3	L	gainL

Tabelle 8: AS7265X Datenbank-ID bei automatischem Verstärkungsfaktor

Das Flussdiagramm in Abbildung 24 beschreibt den Ablauf für autoGainMeasurementAS7261. Der Ablauf von autoGainMeasurementAS7265X ist bis auf den SENSORTYP und die Namen der Channel identisch.

Abbildung 24: Flowchart autoGainMeasurementAS7261



6.5.3 **matchValueToMaxGain**

Die Funktion **matchValueToMaxGain** passt einen übergebenen Messwert mit dem verwendeten Verstärkungsfaktor von 1x, 3,7x, 16x, 64x, an die maximale Verstärkung von 64x an:

- $\text{Gain1}x \cdot 64 = 64$
- $\text{Gain3,7}x \cdot 17,2972972973 \approx 64$
- $\text{Gain16}x \cdot 4 = 64$
- $\text{Gain64}x \cdot 1 = 64$

7 Benutzerhandbuch

7.1 Hardware Setup

Der Raspberry Pi muss mit seiner Stromversorgung (USB C), einem Netzwerk (Ethernet) und 1-12 Sensorboards verbunden werden.

7.2 Messung Starten

Über das Terminal (Unter Windows cmd) muss eine SSH Verbindung zum Raspberry Pi aufgebaut werden.

ssh pi@[IP-ADRESSE]

Die Messsoftware befindet sich im Ordner `~/SpectralSensor`

cd ~/SpectralSensor

Damit die Messsoftware auch noch weiter läuft, wenn die SSH Verbindung wieder geschlossen wird, muss sie in einem Screen kompiliert werden.

screen make

Um die SSH Verbindung zu trennen, ohne die Messung zu unterbrechen, wird einfach das Terminal/CMD Fenster geschlossen.

Abbildung 25: Terminal Output bei Start der Messsoftware

Zuerst muss im Terminaloutput überprüft werden ob der NTP Server synchronisiert ist. Wird eine falsche Systemzeit, angezeigt muss das Programm nach etwa 40 Sekunden neu Gestartet werden. Anschließend sollte die Systemzeit richtig sein. (Mehr zum Programm Neustart: 7.5).

Im I2C Scann sollten alle angeschlossenen Sensoren angezeigt werden.

Die Messung wird mit den angezeigten Einstellungen gestartet, indem die Eingabeaufforderung mit **Y** bestätigt wird.

```
-----I2C Scan -----
Device at: 0x4B is AS7261
Please check if all expected devices are available.
-----Settings-----
Integration Value: 20 * 2.8ms = Integration Time
Gain: 4
Mesurement Intervall: 1 min
-----
Are The Settings Correct? Type y to continue, n to change Settings
y
--Starting Measurment Cycle--
0x4B Changed Gain to 0
0x4B getX: 37
0x4B getY: 76
0x4B getZ: 7
0x4B getClear: 719
0x4B getDark: 0
0x4B getNIR: 208
0x4B Changed Gain to 1
0x4B getX: 135
0x4B getY: 279
0x4B getZ: 28
0x4B getClear: 2645
0x4B getDark: 0
0x4B getNIR: 764
0x4B Changed Gain to 2
0x4B getX: 592
0x4B getY: 1228
0x4B getZ: 119
0x4B getClear: 11634
0x4B getDark: 2
0x4B getNIR: 3356
0x4B Changed Gain to 3
0x4B getX: 2186
0x4B getY: 4541
0x4B getZ: 433
0x4B getClear: 65535
0x4B getDark: 6
0x4B getNIR: 12150
X used gain: 3 matched value to gain 3: 2186
Y used gain: 3 matched value to gain 3: 4541
Z used gain: 3 matched value to gain 3: 433
Clear used gain: 2 matched value to gain 3: 46536
Dark used gain: 3 matched value to gain 3: 6
NIR used gain: 3 matched value to gain 3: 12150
0x4B saveX: 2186
0x4B saveY: 4541
0x4B saveZ: 433
0x4B getClear: 46536
0x4B getDark: 6
0x4B getNIR: 12150
Measurement duration: 1220 ms
-----
Next Mesurement: Mon Oct 12 00:07:00 2020
```

Abbildung 26: Terminal Output bei Start der Messung

Um die Einstellung zu verändern wird **N** ausgewählt.

```

-----
Are The Settings Correct? Type y to continue, n to change Settings
n

Set Integration Value [0:255]:
20
Set Gain [0:3] 0->1x 1->3.7x 2->16x 3->64x 4->Auto Gain:
4
Set Mesuremnt Intervall in Minutes [1:65535]
1

```

Abbildung 27: Beispielhafter Terminal Output bei Einstellungsänderungen

Die Einstellungen werden nacheinander abgefragt, die Eingaben müssen mit Enter bestätigt werden.

Integration Value bestimmt die Integrationszeit, d. h. die Belichtungszeit der einzelnen Messungen. Gain bestimmt den Verstärkungsfaktor der Messwerte. Im Auto Gain modus wird automatisch der am besten geeigneten Verstärkungsfaktor für jede einzelne Messung ausgewählt. Measurement Interval ist das Intervall, in dem alle angeschlossenen Sensoren eine Messung durchführen.

7.3 Einstellung für fortgeschrittene Benutzer

```

#define DEFAULT_INTEGRATION_VALUE 200 // [0:255] Integration Value * 2,8ms = Integration Time
#define DEFAULT_GAIN 4 // Set Gain [0:3] 0->1x 1->3.7x 2->16x 3->64x 4->Auto Gain:
#define DEFAULT_MEASUREMNT_INTERVAL 2 // Set Measurement Intervall in Minutes [1:65535]
#define USE_AS7261 1 // 1 = use AS7261 0 = ignore AS7261
#define USE_AS7265X 1 // 1 = use AS7265X 0 = ignore AS7265X
#define PLUG_AND_PLAY 0 // 1 = Start Measurement instantly 0 = Show Settings-Menu
#define MANUAL_TRIGGER 0 // 1 = Press Enter for next Mesurment 0 = Use the given Intervall

```

Abbildung 28: SpectralSensor/defaultvalues.h

In der Datei **SpectralSensor/defaultvalues.h** können die beim Programmstart vorgeschlagenen Standardeinstellungen angepasst werden.

Zusätzlich kann eingestellt werden, dass die Messung ohne manuelle Benutzerinteraktion direkt mit den Standardeinstellungen startet (PLUG_AND_PLAY).

Um die Kalibrierung zu erleichtern, kann der automatische zeitbasierte Auslöser deaktiviert werden (MAUAL_TRIGGER). Die einzelnen Messungen werden dann durch Drücken der Enter-Taste durchgeführt.

7.4 Webinterface

Das Grafana Webinterface ist unter folgender Adresse im Browser zu erreichen:
[IP-ADRESSE]:3000

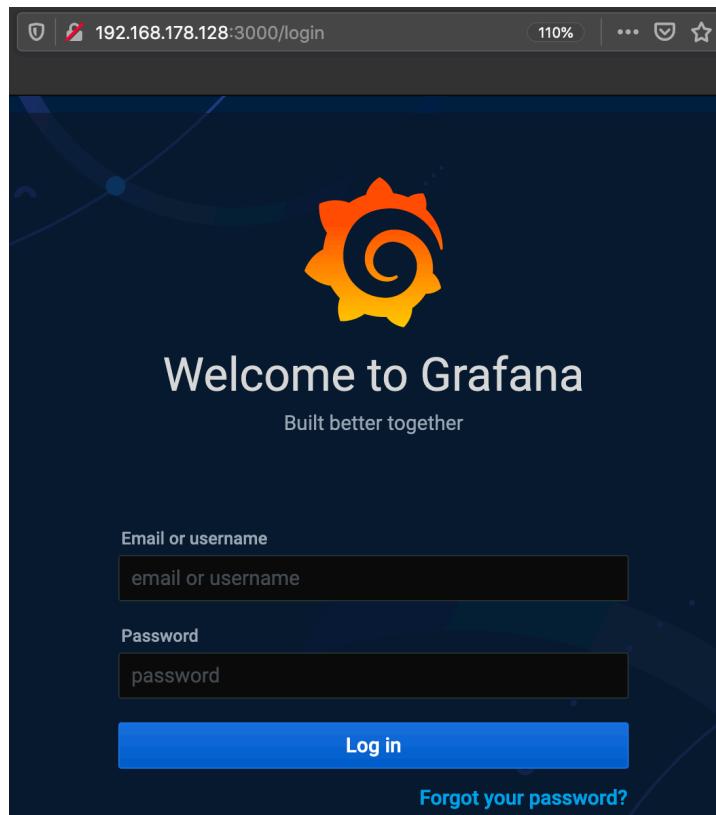


Abbildung 29: Grafana Login im Browser

Im Example Dashboard sind alle Sensordatenplots vorhanden. Wenn weniger Plots benötigt werden oder die Darstellung angepasst werden muss, kann eine Kopie angefertigt und bearbeitet werden.

Um Daten im CSV-Format zu exportieren muss zuerst der gewünschte Zeitbereich ausgewählt werden. Anschließend wird, wie in Abbildung 30 zu sehen, im Kontextmenü (Klick auf den Namen eines Plots) unter Inspect die Option Data ausgewählt.



Abbildung 30: Screenshot Grafana CSV-Export

Daten können nur pro Plot exportiert werden. Um mehr Daten auf einmal zu exportieren, müssen alle gewünschten Daten in einem Plot vereint werden.

7.5 Messsoftware Beenden/Neustarten

Das Programm kann mit Control+C beendet werden.

Falls die SSH Verbindung geschlossen wurde, muss diese erst wieder aufgebaut werden.

ssh pi@[IP-ADRESSE]

Der Screen, in welchem die Messsoftware läuft, muss Attached sein.

screen -r

Die Liste aktiver Screens kann mit **screen -list** eingesehen werden. Weiter Informationen zu Screen: <https://linuxize.com/post/how-to-use-linux-screen/>

Um die Software erneut zu starten, sollte sie wieder neu kompiliert werden, da so immer alle eventuellen Einstellungsänderungen in der Datei default_values.h übernommen werden:

cd ./SpectralSensor

screen make

7.6 IP Adress Scan

Unter Unix: sudo nmap -sn 192.168.1.0/24

Unter Windows: Mit Hilfe der Software "PortScan"

<https://www.the-sz.com/products/portscan/>

7.7 Bedeutung der Status LEDs

7.7.1 Rapsberry Pi

Die rote PWR-LED leuchtet kontinuierlich bei stabiler 5V Stromversorgung.

Die grüne ACT-LED blinkt, wenn die SD-Karte korrekt arbeitet.

7.7.2 Status & Adapterboard

Die rote Power-LED leuchtet, wenn eine Benutzereingabe zum Starten der Messungen erwartet wird.

Die grüne Heartbeat-LED leuchtet, wenn der Messzyklus gestartet wurde, geht aber immer während der eigentlichen Messung aus.

7.7.3 Sensorboard

Die roten LEDs D1-AS7261 und D2-AS7265X blinken, wenn es Probleme mit der Firmware auf dem Flaschenspeicher des jeweiligen Sensors gibt.

7.8 Hilfe

Nach dem Starten der Messung gibt es keine Ausgabe in Terminal:

Vermutlich sind keine Sensoren angeschlossen

Die Systemzeit ist falsch:

Keiner der NTP-Server aus der Liste /etc/systemd/timesyncd.conf kann erreicht werden.

Das Webinterface ist nicht erreichbar:

Entweder wurde die Adresse falsch geschrieben oder der Grafana-Server ist abgestürzt / wird nicht mehr automatisch gestartet.

Error: 500 Write to Database Failed!: Der InfluxDB-Server ist abgestürzt / wird nicht mehr automatisch gestartet.

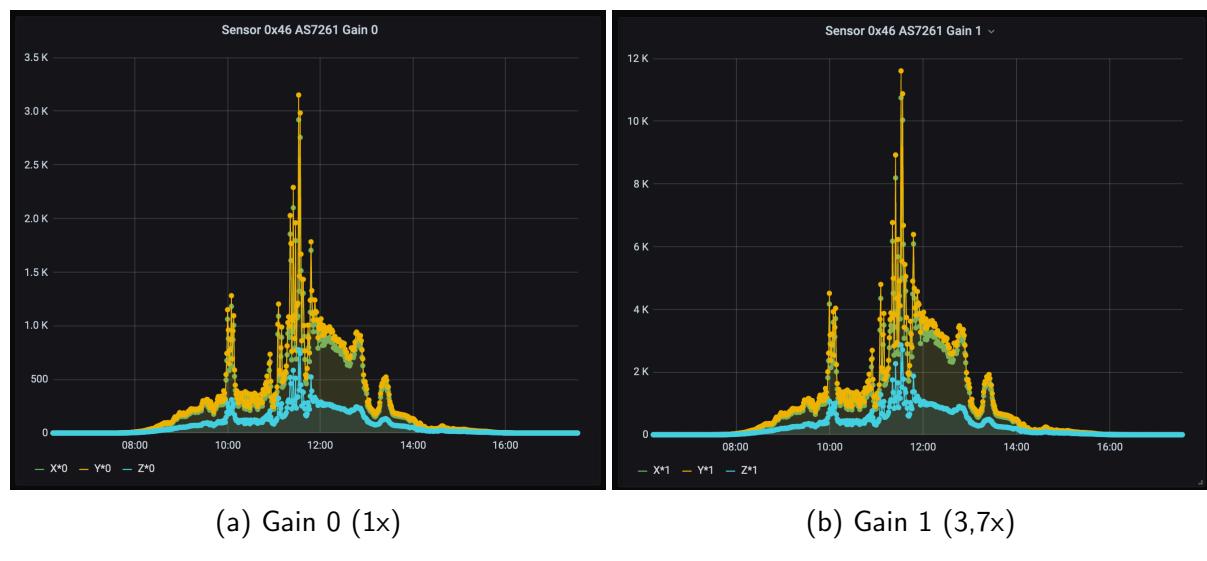
7.9 Liste Der Verwendeten I2C Adressen & Translationbytes

Die Translation Bytes (Dezimal) 0- 59 wurden bereits verwendet. Sollten weitere Sensorboards angefertigt werden, muss es hier notiert werden:

8 Messungen

Die Abbildungen 31a-32b zeigen die gleiche Messung eines wolkenfreien Dezembertages am 12.12.2020 in Berlin mit unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren. Der Integrationswert ist auf 255 gesetzt.

Es ist zu erkennen, dass die Auflösung der Y-Achse mit zunehmender Verstärkung (Gain) steigt. Aus Abbildung 32b ist jedoch ersichtlich, dass der maximale Messwert von 65.000 mit einem hohen Verstärkungsfaktor erreicht werden kann und die Daten so ihre Aussagekraft verlieren (clipping). Abbildung 33 zeigt die gleiche Messung im AutoGain-Modus. In diesem Plot werden immer die Messwerte mit dem größtmöglichen Verstärkungsfaktor zusammengefasst, bei dem es nicht zu clipping kommt. Die Ausgabedaten der Messung sind nicht kalibriert und haben keine Einheit. Bei festem Gain liegen sie zwischen 0 und 65000. Im AutoGain-Modus liegen sie zwischen 0 und 4160000. Um die Daten nutzbar zu machen, müssen sie mithilfe eines anderen Messgerätes auf allgemein verständliche Werte kalibriert werden.



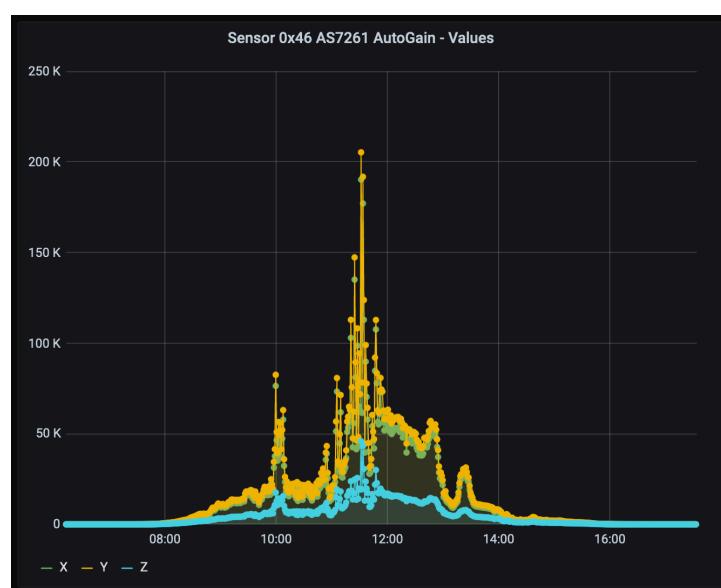
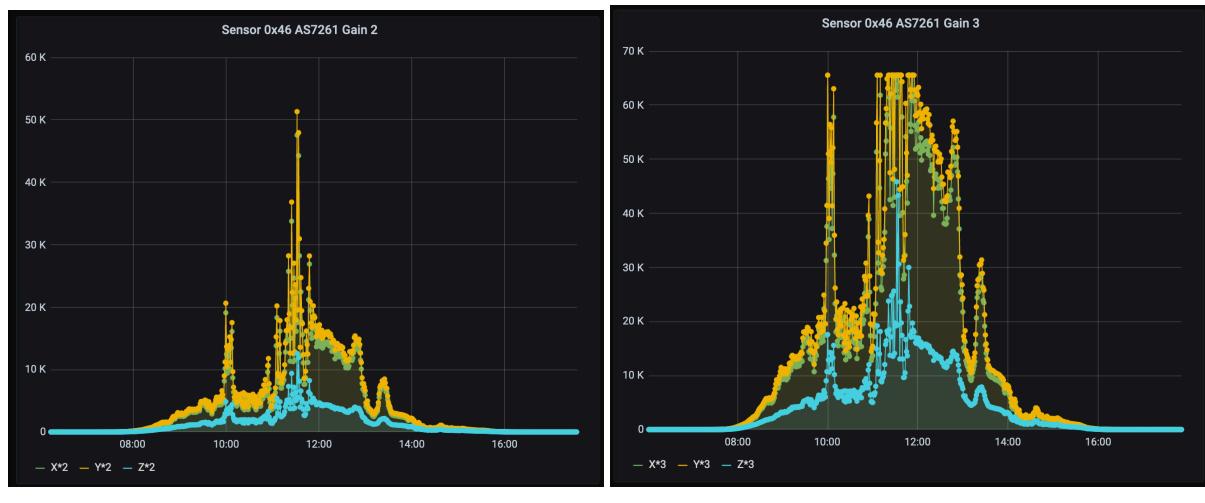


Abbildung 33: AutoGain

9 Zusammenfassung

Der Raspberry Pi hat sich als Steuergerät für den Messaufbau bewährt. Der Programmcode kann schnell und einfach über SSH ausgeführt werden und auch die Fehlersuche ist sehr komfortabel.

Grafana lässt sich in der grafischen Oberfläche sehr einfach anpassen. Jedoch ist das einmalige Einrichten eines Dashboards für viele Sensoren umständlich und zeitaufwendig. Die Datenkomprimierungseffizienz von InfluxDB übertrifft die Erwartungen, so dass es möglich ist, auch mit kleinen SD-Karten über mehrere Jahre Daten zu erfassen.

Alle Softwarekomponenten laufen im Dauertest mit einer angeschlossenen Sensorplatine seit sechs Wochen ohne Probleme. In einem weiteren Test läuft das System mit 4 angeschlossenen Sensorboards seit zwei Wochen ebenfalls ohne Probleme.

Zum Abgabezeitpunkt der vorliegenden Arbeit besteht das Problem, dass nur vier Sensorplatten, d.h. 8 I2C-Slaves, gleichzeitig am Bus angeschlossen werden können. Ab dem fünften Sensorboard kann der Raspberry Pi die I2C-Adressen der angeschlossenen Sensoren nicht mehr finden. Als Workaround gibt es die Möglichkeit, einen Bus-Multiplexer zu verwenden. Dieses Gerät wird über I2C direkt an den Bus angeschlossen und hat mehrere I2C-Bus-Ports. Über einen Befehl kann dem Multiplexer mitgeteilt werden, welcher I2C-Bus-Kanal zum Raspberry Pi durchgeschaltet wird. Eine Betaversion des Workarounds ist bereits implementiert und auf Github⁷ zu finden, wird aber in dieser Arbeit nicht behandelt.

Abgesehen davon, dass die geforderte Anzahl der anschließbaren Sensoren derzeit nicht erreicht wird, ist der Messaufbau einsatzbereit und die verbleibenden Probleme können mit überschaubarem Aufwand gelöst werden.

⁷<https://github.com/LennardBoediger/SpectralSensor>

Literatur

- [1] L. Stiny, *Aktive elektronische Bauelemente*. Seite 168.
- [2] H. Göbel, *Bauelemente der Halbleiterelektronik*. Seite 184.
- [3] K. Bücher and J. Fricke, "Solarzellen," *Physik in unserer Zeit*, vol. 21, no. 6, pp. 237–244, 1990.
- [4] N. Palina, T. Mueller, S. Mohanti, and A. G. Aberle, "Laser assisted boron doping of silicon wafer solar cells using nanosecond and picosecond laser pulses," in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 002193–002197, 2011.
- [5] "i2b-bus.org." www.i2b-bus.org.
- [6] "nxp.com." www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf.
- [7] "Datenblatt as7265x." ams.com/as7265X.
- [8] "Datenblatt as7261." ams.com/as7261.
- [9] "Raspberry pi foundation." raspberrypi.org.
- [10] "Datenblatt ltc4316." <https://www.analog.com/en/products/ltc4316.html>.

Anhangsverzeichnis

AMS_Firmware

AS7261_complete.bin
AS7265_complete_moonlight_v1

Dokumente

AS726x_Design_Considerations.pdf
AS7261_Datasheet.pdf
AS7265x_Datasheet.pdf
ITC4316-I2C-Translator_Datasheet.pdf
Program_AS72xx_FlashCatUSB.pdf

Hardware

Sensorboard_Layout.pdf
Sensorboard.brd
Sensorboard.sch
Status-Adapterboard_Layout.pdf
Status-Adapterboard.brd
Status-Adapterboard.sch

Programmcode

default_values.h
Makefile
lib
 influxDB_http_Library
 influxdb.c
 influxdb.h
 wiringPi_AS726X_Library
 AS726X.c
 AS726X.h
src
 main.c
 measurement.c
 measurement.h
 welcome.c
 welcome.h