



Bachelorarbeit

Implementierung und Evaluierung einer Branddetektion für einen autonomen Quadrocopter

Vorgelegt von

Oliver Kleinke

Matr.-Nr.: 1742985

Prüfer: Prof. Dr. Sergio Montenegro

Betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Nils Gageik

Würzburg, 27. 09. 2013

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigelegter Materialien selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Werken entnommen sind, sind in jedem Einzelfall unter Angabe der Quelle deutlich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandlungen gegen diese Erklärung und bewusste Täuschungen die Benotung der Arbeit mit der Note 5.0 zur Folge haben kann.

Würzburg, 27. 09. 2013

Oliver Kleinke

Aufgabenstellung

Die Fortschritte im Bereich Sensorik und Mikrotechnik ermöglichen heutzutage den kostengünstigen Bau kleiner unbemannter Luftfahrzeuge (UAV, unmanned aerial vehicle, Drohne) wie Quadrocopter sowie deren Ausstattung mit einer Vielzahl an Sensorik. In dieser Arbeit soll ein autonomer Quadrocopter mit Sensoren bestückt werden, die es ihm erlauben, einen Brand zu detektieren. Feuersensoren, d.h. Rauch-, Gas-, Wärmestrahlen- und Temperatursensoren sind heutzutage kostengünstig zu erwerben und ermöglichen die Detektion von Bränden.

Während es Quadrocopter für die ferngesteuerte oder GPS-gestützte Verwendung schon zu kaufen gibt, ist die Forschung im Bereich autonomer Systeme noch in den Anfängen. Folglich gibt es kein System, das autonom Brände erkennen und dieser Gefahrenquelle robust begegnen kann. Daher wird der Aufbau eines eigenen autonomen Systems am Lehrstuhl Aerospace Information Technology der Uni Würzburg erforscht und erprobt. Dieser soll später z.B. in einem brennenden Gebäude operieren können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein System zu entwickeln, welches einen Brand detektieren kann.

Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist die Feststellung und Lokalisation eines Brandes mit Hilfe geeigneter Sensorik. Zur Arbeit gehört die Auswahl und Auswertung der Feuersensoren und deren Anbindung an den Mikrocontroller des Quadrocopters. Eine ausführliche Übersicht über den Stand der Technik ist erforderlich. Die implementierte Software soll durch Datenfusion entscheiden, ob es brennt und nach Möglichkeit angeben können, in welcher Richtung das Feuer sich befindet und wo es sicher für den Quadrocopter ist. Darauf aufbauend soll eine Regelung realisiert werden können, die es dem Quadrocopter ermöglicht ein Feuer zu finden sowie in einem brennenden Haus dem Feuer auszuweichen.

Eine umfangreiche Evaluierung und eine ausführliche Dokumentation sind durchzuführen. Die fertige Software ist in die Quadrocopter-Software zu integrieren und an diesem zu evaluieren.

Aufgabenstellung (Stichpunktartig):

- Stand der Technik: Feuersensoren
- Anbindung & Datenfusion: Feuersensoren (z.B.: Wärmestrahlen, Temperatur, Rauch, Gas)
- Implementierung Feuerdetektion
- Steuerung: Finden / Ausweichen (Optional)
- Evaluierung
- Dokumentation

Zusammenfassung

Diese Arbeit dokumentiert die Konzeption, Implementierung und Evaluierung eines Branderkennungssystems für das „IQopterA8“-Quadrocopter-UAV, das am Lehrstuhl VIII der Universität Würzburg entwickelt wird. Schwerpunktmäßig wurde der Einsatz in Innenräumen betrachtet.

Als Sensoren zur Detektion von Bränden kommen ein Gassensor, ein Rauchsensor, mehrere Wärmestrahlungssensoren und die Absoluttemperatursensoren, die in den Wärmestrahlungssensoren enthaltenen sind, zum Einsatz.

Zur Auswertung und Fusionierung der Sensordaten wird ein Evidenztheoretisches Modell nach Dempster-Shafer verwendet, das entsprechend den Sensorwerten, die Brandhypothese bewertet.

In der Evaluationsphase offenbaren sich einige unvorhergesehene Probleme, zu deren Lösung es einer Veränderung des aktuellen Konzeptes bedarf. Trotz der entstandenen Schwierigkeiten, kann ein Teil der Sensorik erfolgreich integriert werden und es ergeben sich weitere Einsatzmöglichkeiten.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung.....	3
Zusammenfassung.....	4
1 Einleitung.....	6
2 Grundlagen.....	7
2.2 Brände.....	7
2.3 Temperatur, Wärme und Wärmetransport.....	9
2.4 Rauch und gasförmige Verbrennungsprodukte.....	10
2.5 Sensordatenfusion, Evidenztheorie nach Dempster-Shafer.....	11
3 Stand der Technik:.....	14
3.1 Sensorik.....	14
3.1.1 Temperaturmessungen.....	14
3.1.2 Rauchdetektoren.....	17
3.1.3 Gassensoren.....	19
3.3 Einsatz von UAVs zur Branddetektion.....	22
4 Konzept.....	23
4.2 Auswertung der Sensoren.....	26
4.2.1 Erkundungs-Ablauf.....	27
5 Implementierung.....	30
Sensoren.....	30
6 Evaluierung.....	45
6.1 Evaluierung der neuen Sensorik.....	45

1 Einleitung

Unkontrollierte Brände können eine Bedrohung darstellen und Sach- und Personenschäden verursachen. Zur gezielten und effektiven Bekämpfung eines Feuers ist es unerlässlich genaue Informationen über die Lage zu haben. Unbemannte Systeme, die mit entsprechender Sensorik ausgerüstet sind, können potentiell akkurate Informationen über einen Brand liefern, ohne dass sich hierfür Personen in Gefahr begeben müssen.

Unbemannte Fluggeräte werden schon seit einiger Zeit zur Erkennung und Beobachtung von Bränden eingesetzt. 2001 demonstrierte das „FiRE“-Projekt [Ambrosia, 2003] erfolgreich den Einsatz eines UAVs zur Überwachung von Waldbränden. Gegenstand der Forschung dieses Gebiets war in den letzten Jahren im Besonderen die automatische Auswertung der Messdaten, vorwiegend durch die Analyse von Bild- und Videoaufzeichnungen von optischen und Infrarot-Kameras. Im Fokus stehen dabei Wald- und Buschfeuer in Außenarealen, da die UAV-Technologie erst durch aktuelle Entwicklungen auch im Indoor-Bereich einsatzfähig ist.

Im Rahmen des „AQopterI8“-Projekts wird am Lehrstuhl VIII der Julius-Maximilians-Universität ein Quadrocopter entwickelt, der sich autonom in Innenräumen bewegen und dabei die Umgebung erkunden und kartographieren soll. [Schneider, 2012] Diese Quadrocopter-Plattform soll im Rahmen dieser Arbeit um die Fähigkeit, Brände in Innenräumen zu erkennen, erweitert werden.

Zu Beginn sollen in diesem Abschnitt, die grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge, die für das Verstehen und die Betrachtung des Themas von Bedeutung sind, erläutert werden. Es wird ein Überblick über die physikalischen Zusammenhänge und die theoretischen Themen gegeben, die in dieser Arbeit eine Rolle spielen.

2 Grundlagen

2.2 Brände

In der [DIN14011] („Begriffe aus dem Feuerwesen“, zitiert nach [Usemann, 2012]) wird ein Brand wie folgt definiert:

„Brennen ist eine mit Flamme und/oder Glut selbstständig ablaufende exotherme Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und Sauerstoff oder Luft.“

Wenn man unkontrollierte Brände in Innenräumen betrachtet, dann handelt es sich bei den vorzufindenden brennbaren Stoffe hauptsächlich um organische Verbindungen, also chemische Verbindungen in denen Kohlenstoff vorhanden ist. Dazu zählt beispielsweise Holz, das in Form von Möbeln und als Baustoff in der Struktur vieler Gebäude vorhanden ist, andererseits aber auch verschiedenste Kunststoffe, die in den meisten Gebäuden zahlreich – in Form von Kabelisolierungen, Fensterrahmen etc. – vorhanden sind.

Vorraussetzung für einen Brand ist also einerseits das Vorhandensein von brennbaren Material, zum anderen das Vorhandensein von Sauerstoff, der normalerweise mit ca. 21% in der Luft vorhanden ist. Außerdem muss genügend Energie vorhanden sein, um den brennbaren Stoff zu entzünden und den Brand am laufen zu halten. Zweckmäßigerweise werden in diesem Zusammenhang oft die Entzündungstemperatur (die für das Entzünden oder Entflammen notwendige Temperatur), die Verbrennungstemperatur (Temperatur beim Abbrennen), und die Mindestverbrennungstemperatur (die Temperatur, die mindestens eingehalten werden muss, um den Brand am laufen zu halten) als Kenngrößen gebraucht. [Usemann, 2012]

Bei Gebäudebränden findet eine Vielzahl von chemischen Reaktionen statt. Die Hitze durch einen Brand sorgt dafür, dass die Stoffe in der unmittelbaren Nähe erhitzt werden und sich so durch Pyrolysevorgänge die Zusammensetzung der Stoffe ändert und Rauch und Gase frei werden. Die Zusammensetzung der Verbrennungsprodukte bei Gebäudebränden ist divers und hängt von den vorhandenen Materialien im Gebäude, der Verbrennungstemperatur, als auch der Sauerstoffkonzentration und dem Vorhandensein von chemischen Katalysatoren und anderen Faktoren ab. Zugrunde liegt dem das Prinzip von Le Chatelier, auch bekannt als das Prinzip des

kleinsten Zwangs, das besagt, dass eine Veränderung der Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, Stoffmengen) eine Verschiebung des chemischen Gleichgewichts zur Folge hat. [Chemie 2008]

Bei Gebäudebränden als besonders gefährlich für den Menschen gelten die entstehenden Rauchgase. Bereits vor der Entzündung eines Brands kann Rauchgas in erheblichen Mengen entstehen, das sich durch die Luftströmung schnell im Raum oder Gebäude verbreitet.

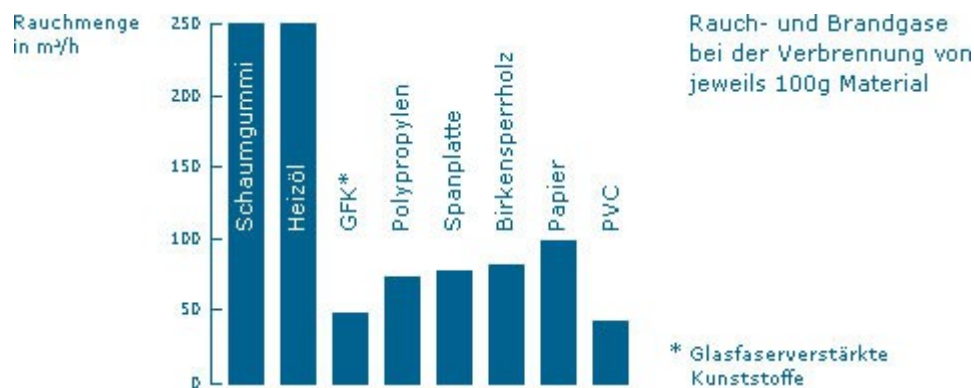


Abbildung 1: Materialspezifisches Rauchgasvolumen [FB, 2013]

Etwa 80 bis 90 % der Brandtoten sterben durch eine Rauchgasvergiftung. Das „Forum Brandrauchprävention e.V.“ nennt als gefährliche Rauchgasbestandteile: Ruß, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Chlorwasserstoff, Stickoxide, Schwefeloxide und Dioxine. [FB, 2013]

Der Begriff „Feuer“ ist ein Synonym für das Wort „Brand“. Eine klare Abgrenzung kann nicht vorgenommen werden. Die beiden Wörter werden gleichbedeutend verwendet. In der Bayerischen Bauordnung finden sich beispielsweise die Wörter „feuerhemmend“, „feuerbeständig“, „Flugfeuer“ aber auch die Wörter: „Brandausbreitung“, „Brandschutz“ und „brandsicher“, ohne erkennbaren Bedeutungsunterschied. [BayBO, 2008]

2.3 Temperatur, Wärme und Wärmetransport

Wärme ist eine Energieform, die zwischen thermodynamischen Systemen mit unterschiedlicher Temperatur übertragen wird. Wärme kann durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion übertragen werden. [Böckh / Wetzel, 2011]

Wärmeleitung

Bei der Wärmeleitung wird die Energie zwischen den benachbarten Atomen und Molekülen von zwei Systemen übertragen. Es findet aber kein Materialaustausch statt. Die Wärme wandert hier immer vom Körper höherer Temperatur zum Körper niedrigerer Temperatur.

Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von Oberflächen warmer Körpern ausgestrahlt wird. Eine wichtige Rolle spielt hier der Emissivitätsgrad, der angibt wieviel Wärmestrahlung ein Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, bezogen auf einen idealen „Schwarzen Körper“ abgibt. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz für einen schwarzen Strahler lautet [Tafelwerk, 2010]:

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4$$

Wobei Φ die Strahlungsleistung, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, ϵ die Emissivität des Strahlers, A die abstrahlende Fläche und T die Temperatur des abstrahlenden Körpers bezeichnet.

Möchte man die übertragene Netto-Leistung zwischen zwei Objekten bestimmen, darf nicht außer Acht gelassen werden, dass beide Objekte Wärme abstrahlen:

$$\Phi_{\text{netto}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Konvektion

Als Konvektion wird der Wärmetransport, der durch einen Stofftransport in Fluiden stattfindet bezeichnet. Ob es sich hierbei um eine eigene Form des Wärmetransports handelt, oder aber um eine Form des Stofftransports mit einhergender Wärmeleitung, ist in der Fachliteratur umstritten. [Böckh / Wetzel, 2011]

Temperatur

Temperatur ist eine physikalische Größe, die ein Maß für die mittlere Teilchenbewegung in einem Körper ist.

Ein Zusammenhang zwischen Wärme und Temperatur ergibt sich aus Grundgleichung der Wärmelehre, die wie folgt lautet[Tafelwerk, 2010]:

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Q bezeichnet eine übertragene Wärmemenge, C, die Wärmekapazität eines Systems und ΔT die Temperaturänderung, die durch den Wärmetransport herbeigeführt wurde.

2.4 Rauch und gasförmige Verbrennungsprodukte

Als Reaktionsprodukte entstehen bei einem Brand meist bestimmte gasförmige Stoffe und Rauch, der ein Aerosol ist und aus Feststoffpartikeln und Flüssigkeitströpfchen besteht, die bei einem Brand freigesetzt werden und zusammen mit heißen Gasen aufsteigen. Rauch, der durch unkontrollierte Brände entsteht, enthält die verschiedensten Verbrennungs- und Pyrolyseprodukte. Brennbare Gase werden von jedem brennbaren Stoff freigesetzt, der mit einer Flamme verbrennt. Brennbare Pyrolyseprodukte im Rauch können sich dann und Sauerstoffmangel ansammeln und sich dann, wenn sie mit Luftsauerstoff zusammentreffen entzünden, oder sogar explosionsartig verbrennen; dieser Vorgang wird *Rauchdurchzündung* genannt.[Cimolino, 2011]

Bei einem Brand entstandenes Rauchgas breitet sich rasch im zur Verfügung stehendem Raum aus und wird beispielsweise von Rauchmeldern als Indikator für einen Brand gewertet. Bei großen Schladfeuern, wie zum Haus- und Waldbränden, ist aufsteigender Rauch oft schon aus großer Entfernung sichtbar. Rauch ist ein hervorstechendes optisches Erkennungsmerkmal eines Brandes macht sich oft auch durch einen starken Verbrennungsgeruch bemerkbar.

2.5 Sensordatenfusion, Evidenztheorie nach Dempster-Shafer

Da sich viele Größen und Ereignisse nicht direkt messen lassen und man meist verschiedene Messprinzipien, die jeweils ihre eigenen Vor- und Nachteile aufweisen, zur Auswahl hat, ist es oftmals sinnvoll mehrere Sensoren verschiedener Art zu verwenden. Die Messergebnisse der unterschiedlichen Sensoren müssen dann ausgewertet und miteinander kombiniert werden, um auf den Wert der zu messenden Größe schließen zu können, oder aufgestellte Hypothesen zu bewerten. So können die Vorteile verschiedener Sensortypen und Messprinzipien vereint oder Schwächen ausgeglichen werden. Der Vorgang der Verbindung der einzelnen Daten zu einem Gesamtergebnis nennt sich Datenfusion. Zur Durchführung einer Datenfusion gibt es unterschiedliche Modelle und Vorgehensweisen, die auf die konkreten Messdaten angewendet und gegebenenfalls angepasst werden müssen. An dieser Stelle soll das Evidenz-Modell, dass von A. P. Dempster und G. Shafer entwickelt wurde, näher betrachtet werden.

Wenn man eine Prognose über das Eintreten eines bestimmten Ereignisses oder Auftreten eines Merkmals stellen möchte, dann bedient man sich oft der Wahrscheinlichkeitsrechnung und beziffert die möglichen Ergebnisse eines Experiments mit Wahrscheinlichkeitswerten. Ein grundlegendes Problem liegt in der Tatsache, dass in der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung immer symmetrisch vorgegangen wird.

Nimmt man an, dass ein Ereignis mit einer Wahrscheinlichkeit p eintritt, so muss man nach dem 3. Kolmogorow-Axiom gleichzeitig davon ausgehen, dass das Ereignis mit der Wahrscheinlichkeit $p-1$ nicht eintreten wird. [Papula, 2011] Angenommen man möchte eine Hypothese H anhand gesammelter Sensordaten überprüfen und diese Daten weisen nur geringfügig, zum Beispiel könnte $p(H)=0,2$ sein, daraufhin, dass H wahr ist, dann muss man, auch wenn keine Beweise gegen H sprechen, davon ausgehen, dass $\neg H$ mit einer Wahrscheinlichkeit von

$p(\neg H)=1-p(H)=0,8$ wahr ist, man also H mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,8 ausschließt.

Wenn man allerdings ausdrücken möchte, dass man zum Beispiel in 50% der Fälle keine überzeugende Aussage treffen kann und nicht weiß, ob H wahr ist oder nicht, dann stellt die klassische Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht die nötigen Mittel zur Verfügung, um diese Annahme auszudrücken.

Im Evidenz-Modell von Dempster und Shafer wird eine Potenzmenge aller Hypothesen gebildet, die Untermengen der Grundgesamtheit sind. Den einzelnen Elementen der Potenzmenge wird eine *Masse* zugewiesen. Aus diesen Massen lässt sich für jede Hypothese ein Maß für das Dafürhalten zu dieser Hypothese und ein Maß für die Plausibilität der Hypothese bestimmen.

Der Wert der sogenannten *belief-Funktion* $Bel(H)$ errechnet sich aus den Summen der Massen aller Untermengen von H. Der Wert der *Plausibilitäts-Funktion* $Pl(H)$ errechnet sich aus 1 minus der Summe der Massen aller Hypothesen, die eine leere Schnittmenge mit der Hypothese H bilden. [Hall / Llinas, 2001]

Die beiden Beispiel-Aussagen $Bel(H)=0,2$ und $Pl(H)=0,7$ bedeuten dann, dass man zu 20% von der Gültigkeit von H überzeugt ist. Der Wert, der der Unsicherheitsspanne zugeordnet wird, lässt sich aus der Differenz von $Pl(H)$ und $Bel(H)$ bestimmen:

$u(H)=Pl(H)-Bel(H)=0,5$. Dieser Wert würde also bedeuten, dass man zu 50% unsicher über den Wahrheitsgehalt der Hypothese H ist (*uncertainty*) und H in $d(H)=1-Bel(H)=0,8$, also in 80% der Fälle unwahr ist (*doubt*).

Um mehrere Aussagen aus unterschiedlichen Quellen, die für oder gegen *eine* Hypothese sprechen zu vereinen, kann man wie folgt vorgehen:

- a) Zuerst werden die Massen aller Aussagen die für eine Hypothese sprechen kombiniert:

$$Bel_{pro}(H)=1-(1-m_1(H))\cdot(1-m_2(H))\cdot...\cdot(1-m_n(H))$$

außerdem gilt:

$$Pl_{pro}(H)=1 \quad (\text{Es liegen keine Erkenntnisse vor die gegen H sprechen.})$$

- b) Auf die gleiche Art werden die Massen aller Evidenzen die gegen die Hypothese sprechen verrechnet.

- c) Um nun die sich widersprechenden belief-Werte miteinander zu vereinen geht man nach der *Regel von Dempster* [Parsons] vor:

$$Bel(H) = \frac{Bel_{pro}(H) \cdot (1 - Bel_{contra}(H))}{1 - Bel_{pro}(H) \cdot Bel_{contra}(H)}$$

und:

$$Bel(\bar{H}) = \frac{Bel_{contra}(H) \cdot (1 - Bel_{pro}(H))}{1 - Bel_{pro}(H) \cdot Bel_{contra}(H)}$$

damit ergibt sich: $Pl(H) = 1 - B(\bar{H})$

3 Stand der Technik:

3.1 Sensorik

Es gibt eine Vielfalt an Sensoren– vom einfachen Thermometer bis zum Spektrographen, – die auf unterschiedlichen Prinzipien beruhen und die verschiedenen Verbrennungsprodukte messen.

In diesem Abschnitt werden die gängigen Messprinzipien und Sensortypen vorgestellt.

3.1.1 Temperaturmessungen

Es gibt verschiedene Messprinzipien zur Temperaturmessung, die sich Temperatursensoren zu Nutze machen. Es sollen an dieser Stelle nur einige wichtige Sensortypen erläutert werden, die der elektrischen Temperaturmessung dienen, also solche die auf Temperatureinflüsse mit einer Änderung ihrer elektrischen Eigenschaften, zum Beispiel ihrer Leitfähigkeit, reagieren.

Thermistor

Bei einem Thermistor handelt es sich um einen elektrischen Widerstand, der seinen Widerstandswert der Temperatur entsprechend ändert. Ein Thermistor misst einen absoluten Temperaturwert. Das Wort Thermistor setzt sich zusammen aus „thermal“ und „resistor“. Zur Herstellung von Thermistoren werden entweder Kalt- oder Heißeiter verwendet; bei Kaltleitern erhöht sich der elektrische Widerstand bei steigender Temperatur, bei Heißeitern verringert sich der elektrische Widerstand bei steigender Temperatur.

Als besonders linear gelten Platin-Sensoren PT100, PT500, etc. die in der DIN-Norm EN 60751 beschrieben werden. Als Heißeiter werden häufig Halbleitermaterialien verwendet, deren elektrische Eigenschaften von der Umgebungstemperatur abhängig sind. Solche Halbleiter-Materialien haben den Nachteil, dass sie weniger linear als beispielsweise Platin-Messelemente sind und damit eine mehr oder weniger aufwändige Linearisierung und Kalibrierung durchgeführt werden muss.[Fraden, 2010]

Thermoelement

Thermoelemente basieren auf dem thermoelektrischen *Seebeck-Effekt*.

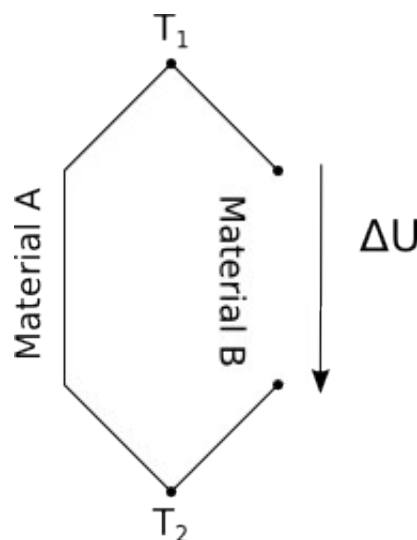
Gemäß dem Seebeck-Effekt entsteht in einem Stromkreis aus zwei Leitern unterschiedlichen Materials, an deren Verbindungsstellen verschiedene Temperaturen herrschen, eine Potentialdifferenz (Spannung). [Hoerstel, 2005]

Die erreichte Spannung ergibt sich dabei nach folgender Formel:

$$\Delta U = (\alpha_a - \alpha_b) \cdot \Delta T$$

Wobei α_a und α_b die *Seebeck-Koeffizienten* der Materialien A und B sind. Die entstehende Spannung kann dann zur Berechnung der gemessenen Temperaturdifferenz mit einem Voltmeter bestimmt werden.

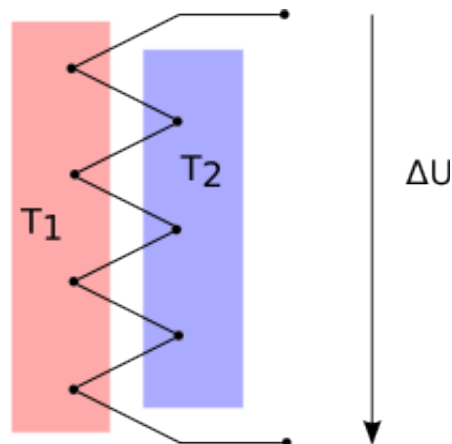
Die Seebeck-Koeffizienten selbst sind wiederum temperaturabhängig, können aber im Allgemeinen bei geringen Temperaturänderungen als weitgehend konstant angenommen werden. Geht man davon aus, dass die Seebeck-Koeffizienten konstant sind, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz und Potentialdifferenz.



Möchte man aus der gemessenen Differenz von Temperatur T_1 und Temperatur T_2 die Temperatur bestimmen, die an einer Verbindungsstelle herrscht, so muss die Temperatur der anderen Verbindungsstelle bekannt sein. Dies kann entweder durch eine zweite Messung mit einem anderen Sensor, der die Temperatur absolut misst, oder durch Kühlung bzw. Erhitzung auf eine bestimmte, vorgegebene Temperatur erreicht werden.

Thermosäule

Bei einer Thermosäule handelt es sich um eine Reihenschaltung von mehreren *Thermoelementen*, bei der die Verbindungsstellen, abwechselnd bei Messpunkt T_1 und T_2 liegen. Durch die Hintereinanderschaltung der Thermoelemente addieren sich die entstehenden Potentialdifferenzen. Das Resultat ist eine Schaltung, die bei kleinen Temperaturdifferenzen eine höhere Spannung als ein einzelnes Thermoelement erzeugt.



Wegen der hohen Empfindlichkeit werden Thermosäulen heutzutage in Wärmestrahlungs-, oder Infrarot-Thermometern eingesetzt, die die Temperatur von Oberflächen berührungslos messen können. [M90614]

Bandabstandsreferenz- / PTAT-Temperatursensor

Eine Bandabstandsreferenz ist ein elektrisches Bauteil, das eine Referenzspannung ausgibt, die der Bandabstandsspannung der Halbleitermaterialien entspricht, aus denen das Bauteil aufgebaut ist. Bandabstandsreferenzen, die nicht temperaturkompensiert sind, produzieren bei verschiedenen Temperaturen aufgrund ihrer Halbleitereigenschaften unterschiedliche Ausgangsspannungen. Dieser Effekt kann zur Absoluttemperaturmessung genutzt werden. Temperatursensoren, die mittels einer Bandabstandsreferenz realisiert sind, werden auch oft als *PTAT* bezeichnet. Sensoren dieser Bauart können aus Halbleitermaterial hergestellt werden und eignen sich daher besonders zur Umsetzung in integrierten Schaltkreisen.[Fruett, 2001]

PTAT ist eine Abkürzung für „proportional to absolute temperature“ und beschreibt damit die Eigenschaft eines Temperatursensors, eine zur absoluten Temperatur proportionale Ausgabe zu erzeugen.

3.1.2 Rauchdetektoren

Photoelektrisch

Photoelektrische Rauchmelder verfügen über eine Kammer, in die aufsteigender Rauch eindringen kann. Diese Kammer ist so gestaltet, dass zwar Luft und damit Rauch ungehindert hineingelangen können, Licht aber von den lichtempfindlichen Bauteilen fernbleibt. Der Rauch wird mit einer Lichtquelle beleuchtet und reflektiert dann, entsprechend seiner Reflexionseigenschaften das Licht auf einen photoelektrischen Sensor, – zum Beispiel einen Phototransistor, oder eine Photodiode – wodurch ein elektrisches Signal erzeugt wird.

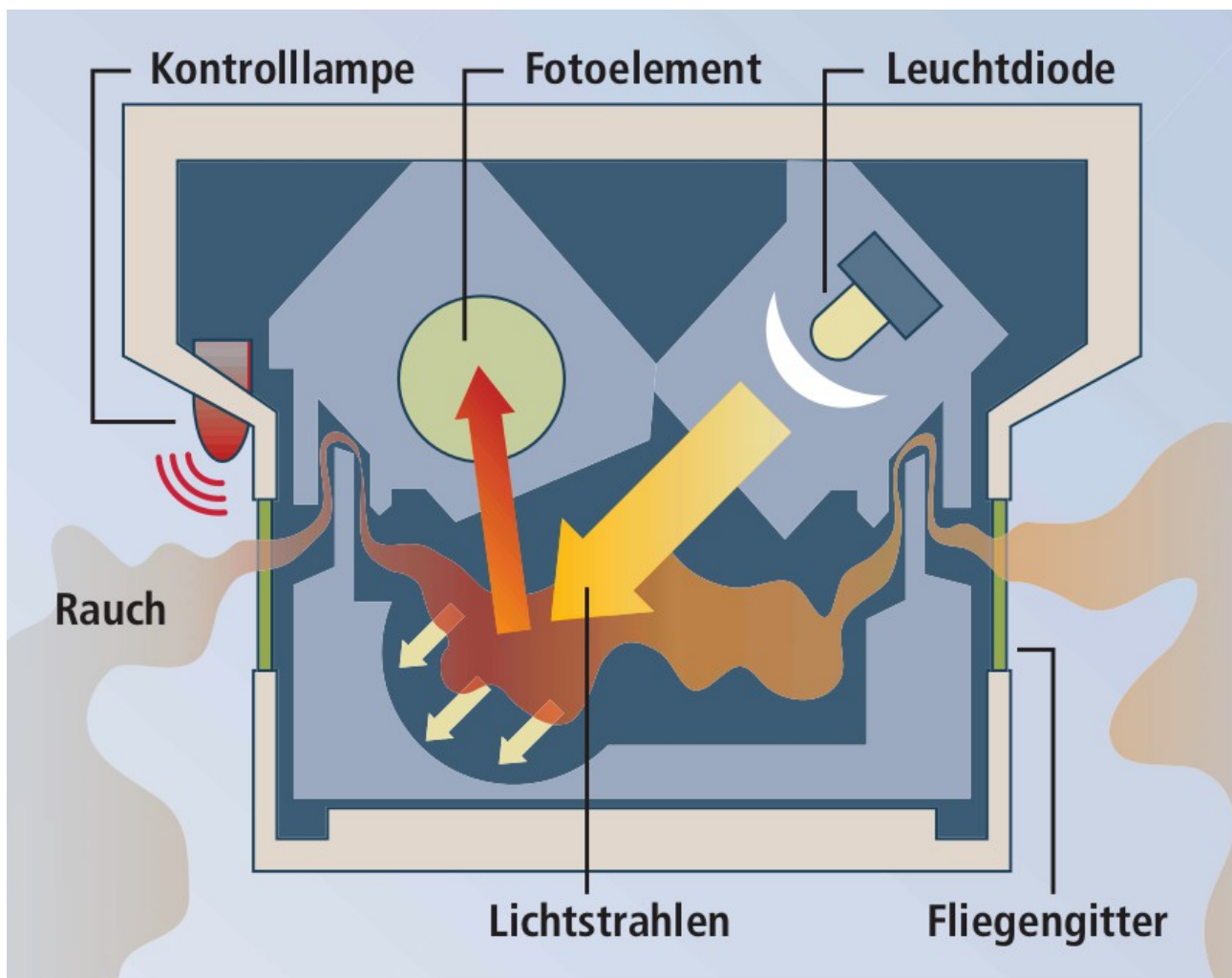


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines optischen Rauchmelders [TEST, 2002]

Ionisationsprinzip

Diese Detektoren verfügen über einen offenen Schaltkreis. Tritt Rauch in den Rauchmelder ein, so werden die enthaltenen Partikel durch radioaktive Strahlung, die von einem radioaktiven Isotop im Gerät ausgeht, ionisiert. Die Ionen sorgen dann für einen Stromfluss im Schaltkreis, der mit einem Amperemeter messbar ist und damit zum Auslösen des Alarms führt. [US EPA, 2012]

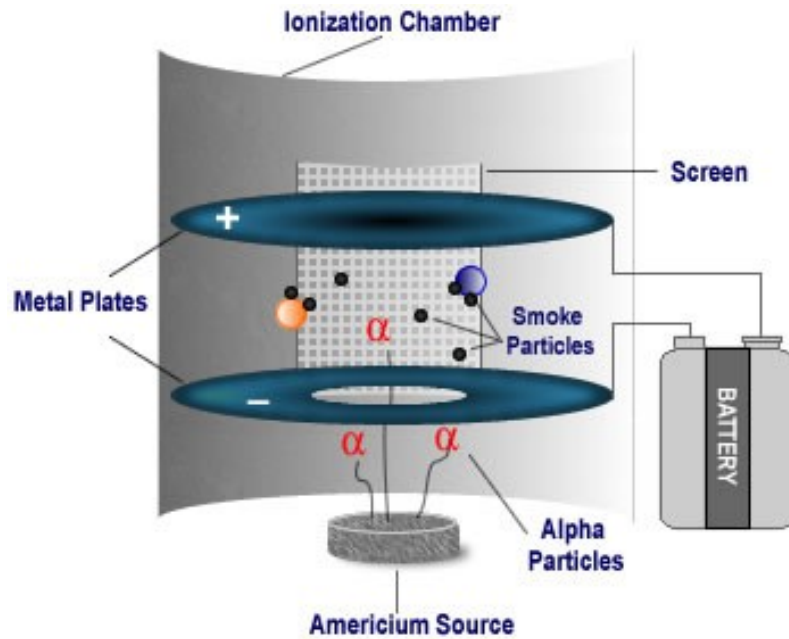


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Rauchmelders, der nach dem Ionisationsprinzip arbeitet.[US EPA, 2012]

3.1.3 Gassensoren

Für die Gaserkennung mit elektrischen Sensoren gibt es eine Reihe an Messprinzipien, die sich jeweils auf unterschiedliche chemische oder physikalische Stoffeigenschaften gründen. Die zu messende Größe kann mit diesen Sensoren nicht direkt ermittelt werden; stattdessen wird sie indirekt als Änderung einer elektrischen Größe, beispielsweise als Änderung des Sensorwiderstands, ausgegeben.

Halbleiter-Metalloxid-Gas-Sensoren

Halbleiter-Gas-Sensoren, auch bekannt als Taguchi-Sensoren nach ihrem Erfinder Taguchi Naoyoshi, bestehen aus einem Halbleiter-Element (sehr oft wird SnO_2 verwendet, aber auch ZnO oder FeO und andere sind möglich), dass seine elektrische Leitfähigkeit bei Kontakt mit oxidierbaren oder reduzierbaren Gasen ändert. Diese Leitfähigkeitsänderung ist dann als elektrische Widerstandsänderung messbar.[Delgado, 2002] Das Sensorelement wird auf eine erhöhte

Temperatur erhitzt, die optimalerweise im Bereich von ca. 250°C liegt.[US3695848] Das Halbleiter-Material kann außerdem mit anderen Stoffen, beispielsweise Palladium, imprägniert werden, um die Sensoreigenschaften zu verändern.

Herkömmliche Halbleiter-Gas-Sensoren sind günstig, leicht einzusetzen und werden aus diesem Grund gerne zur Gasdetektion eingesetzt. Die Messeigenschaften lassen sich durch das Verwenden von verschiedenen Halbleitermaterialien, das Hinzufügen von Katalysatoren und anderen Stoffen und eine andere Betriebstemperatur beeinflussen. Nachteile dieser Sensoren sind, dass sie wenig selektiv auf eine Bandbreite an oxidierbaren und reduzierbaren Gasen reagieren und durch die hohe Empfindlichkeit der Sensoren eine genaue quantitative Messung erschwert wird.

Andere Arten von Gassensoren

Neben den Halbleiter-Metalloxid-Sensoren gibt es eine Vielzahl an anderen Sensortypen zur Messung von Gasen. Die folgende Tabelle liefert einen Überblick über die verschiedenen Messprinzipien und die zugehörigen Sensortypen.

Measured physical parameter	Chemically sensitive material	Devices	Detected species	Sensors
Resistivity / conductivity	Semiconducting metal oxides, conducting polymers	Thin films or pellets of metal oxides Thin polymer films	Combustible gases Ad/absorbing species	Metal oxide sensors (Taguchi, FIS, Figaro) Conducting polymers
Potential, emf	Ion conductive metal oxides	Ion conducting metal oxides operated at high T	Oxygen, NO _x , HC	Ion conducting metal oxides, lambda sensors / HEGO sensors
Mass changes (due to frequency changes)	Organic thin films, thin metal films	Oscillating piezoelectric crystals	Ad/absorbing species enzymes, cells	Quartz Crystal Microbalance, (QMB), Surface Acoustic Wave (SAW)
Electrical polarization	Catalytic metals, polymers, metal oxides	Field effect devices: transistors, capacitors, Schottky diodes	H ₂ , NH ₃ , H ₂ S, amines, alcohols, hydrocarbons, etc.	MOSFET sensors, SiC-FET sensors
Heat generation	Catalytic metals and metal oxides, immobilized enzymes or cells	Catalysts, diodes, thermocouples and thermopiles, thermistors	Combustible gases, substrates for enzymes, poisons	Calorimetric sensors Thermistors Pellistors
Optical properties absorption, reflection, fluorescence	Organic and inorganic films, dyes, fluorescent species	Optical fibers, reflecting surfaces, absorption cells	Ad/absorbing species	Optical sensors, optical fibers
Surface Plasmon Resonance	Organic films and thin metal films	Thin metal films on quartz substrate	Ad/absorbing species	SPR-sensors (BIA core)
Potential changes	Ion selective films	Field effect devices	Ions, pH, enzymes, cells	ISFET sensors
Dielectric properties	Organic and inorganic films	Ellipsometry	Ad/absorbing species	Ellipsometry

Abbildung 6: Überblick über verschiedene Gassensor-Typen [Spetz, 2006]

3.3 Einsatz von UAVs zur Branddetektion

Der Einsatz von UAVs zur Waldbrandüberwachung wird in etwa seit dem Jahr 2000 untersucht. Ein erster Meilenstein war das FiRE-Projekt, in dessen Rahmen ein Starrflügel-UAV mit Sensoren zur Feuererkennung ausgestattet und getestet wurde.[Ambrosia, 2003] Besonders vorteilhaft ist dabei, dass UAVs eine längere Flugdauer als ein bemanntes Flugzeug zulässt, keine Menschenleben riskiert werden müssen und der Einsatz potentiell günstiger ist.

Diese Aufgabenstellung wird in [Ambrosia, 2005] umfangreich erläutert.

Das EU-finanzierte COMETS-Projekt[COMETS, 2006] hat sich mit dem Einsatz von verschiedenen Sensoren auf UAVs verschiedener Art (Prallluftschiff, Helikopter) und auf dem Boden zur Buschfeuererkennung beschäftigt. Erprobt wurden ein Verbund von UAVs, ausgestattet mit optischen und Infrarotkameras.

Forschungsarbeiten der letzten Jahre beschäftigen sich vor allem mit der algorithmischen Analyse von Kamerabildern, mit dem Ziel den Auswertungsprozess zu automatisieren und auf das UAV zu verlagern. Mit einer zuverlässigen automatischen Auswertung, könnte man sich die ständige Kontrolle der Messwerte durch eine Person ersparen.

Als Messsensoren werden dabei vorwiegend optische und Infrarot-Kameras gewählt. Diese Auswahl ist sicherlich durch die flugtechnischen Gegebenheiten (große Flughöhe) bestimmt.

Das Thema Indoor-Branderkennung wurde noch nicht behandelt oder erforscht. Das mag daran liegen, dass die meisten UAVs sich in Innenräumen nicht sicher bewegen können. Der „AQopterI8“, soll dies ermöglichen, sodass diese Anwendung möglich wird.

Die Motivation bleibt hier die gleiche, wie bei der Überwachung von Waldbränden: Personenschäden zu vermeiden, eine schnelle und präzise Aufklärung der Lage und gegebenenfalls Kostenersparnis.

Denkbar wäre der Einsatz eines solchen Quadcopter-UAVs in brennenden Gebäuden, zur Bestimmung der Lagesituation, oder als „fliegender Rauchmelder“ zur Detektion von Brandausbrüchen.

Außerdem kann ein Quadrocopter ein Gebäude aus der Luft anfliegen, und hat so mehr Bewegungsmöglichkeiten als ein Mensch

4 Konzept

Trotz der Vorteile die der Einsatz eines UAV mit sich bringen mag, gibt es doch einige Einschränkungen zu beachten:

- Es steht nur eine begrenzte Rechenleistung zur Verfügung.
- Die Datentransferrate vom UAV zum Operator ist begrenzt, je nach Einsatzszenario kann es auch möglich sein, dass zeitweise kein Kontakt besteht.
- Das UAV kann nur eine begrenzte Last tragen.
- Die Kapazität der Energiequelle, und der Stromverbrauch des Systems beschränken die Einsatzdauer des Systems.
- Hohe Temperaturen könnten das Gerät beschädigen.

Aufgrund dieser Faktoren ist es sinnvoll eine leichte, energiesparende Sensorik zum Einsatz zu bringen, deren Daten effektiv verarbeitet, gespeichert und übertragen werden können. Da sich das UAV aufgrund der sehr hohen Temperaturen dem Feuer fernhalten muss, ist es vorteilhaft, wenn alle Messungen in einem gewissen Abstand vorgenommen werden können. Gerade in Innenräumen lassen sich erhöhte Konzentration von Gasen, die typische Verbrennungsprodukte sind – beispielsweise Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid – und Rauch besonders früh feststellen, da nur eine beschränkte Ventilation stattfindet und der Raum, auf den sich Gas und Rauch verteilen können, begrenzt ist.

Schwelbrände, Glutnester und Brände, die keine (sichtbare) Flamme ausbilden können mit Wärmestrahlungssensoren besser Erfasst werden als mit optischen Kameras und Flammensensoren, die lediglich Licht, das in einem bestimmten Farbspektrum liegt detektieren. Die Auswertung von Videoaufzeichnungen optischer Kameras erfordert eine hohe Rechenleistung, (vgl. [Celik, 2006]) und ist daher eher ungeeignet für dieses Projekt.

Das fertige System soll durch Messung von Umweltbedingungen Brände erkennen, die Messergebnisse und Entscheidungen über die Lage an den Controller weitergeben. Da aus den Messwerten einzelner Sensoren falsche Schlüsse getroffen werden könnten, soll eine Datenfusion

der der Messdaten verschiedener Sensoren durchgeführt werden, um am Schluss zu einer zuverlässigen Aussage zu gelangen. Zu den folgenden Fragestellungen sollen Entscheidungen getroffen werden:

- Besteht an der aktuellen Position die Gefahr, dass der Quadrocopter Schaden nimmt?
- Besteht in der Umgebung des Quadrocopters Gefahr, dass Personen zu Schaden kommen könnten?
- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass es in der näheren Umgebung (im Gebäude oder im Raum) brennt?
- Können Brandherde in der Umgebung ausgemacht werden?

Zur Erkennung eines Brands sollen in dieser Arbeit verschiedene Sensoren verwendet werden, die auf unterschiedliche Verbrennungsprodukte reagieren. Eingesetzt werden sollen:

- Ein *elektrochemischer Gassensor*, der die Konzentration von gefährlichen Gasen in der Umgebungsluft misst.
- ein *optischer Rauchdetektor*, der das Vorhandensein von Aerosolen in der Luft qualitativ bestimmt.
- ein *Raumtemperatur / Kontakttemperatursensor*, der die Temperatur der Luft misst.
- ein *IR-Thermosäulen-Array*, das Temperatur-Strahlung misst.

Die Sensoren lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Sensoren die direkten Kontakt zum Messobjekt (Umgebungsluft) benötigen – Gas, Rauch und Umgebungstemperatursensor –, und einen Sensortyp – Wärmestrahlungssensoren –, die auf Distanz messen. Die einzelnen Sensoren werden direkt an die Haupt-MCU des UAV angeschlossen. Die Messdaten der Sensoren müssen von der MCU ausgelesen und aufbereitet werden; dazu gehören beispielsweise die Umrechnung von Zahlen zwischen verschiedenen Einheiten, oder bestimmte Korrekturen.

Der Zweck dieser Diversifikation ist es, die Erkennungswahrscheinlichkeit und damit die Zuverlässigkeit der Aussagen, die getroffen werden zu erhöhen und verschiedene Gefahrenquellen für Mensch und Quadrocopter zu erfassen.

Während die Gas-, Rauch- und Raumtemperatursensoren die Raumluft untersuchen und keine bestimmte Messrichtung haben, verfügen die Wärmestrahlungssensoren über eine bestimmte Ausrichtung. So ist es notwendig, dass zum effektiven Auffinden von heißen Objekten in der Umgebung des Quadrocopters, die Strahlungssensoren quasi omnidirektional messen können, damit der Quadrocopter auch im Vorbeiflug Hitzequellen entdecken kann und nicht aktiv nach Hitzequellen suchen muss, indem er sich im Flug um die Hochachse dreht.

Wärmestrahlungssensoren verfügen über einen bestimmten Öffnungswinkel, der den Abdeckungsbereich des Sensors festlegt. Die Wärmestrahlung aller Objekte im Blickfeld des Sensors, das man sich als Kegel vorstellen kann, wird vom Sensor erfasst und so ergibt sich eine gemessene Gesamtstrahlung, mit der die Durchschnittstemperatur der Objekte im Blickfeld berechnet wird. Der Radius des Kegels eines Sensors mit Öffnungswinkel α in einer bestimmten Entfernung s lässt sich mit der folgenden Gleichung berechnen:

$$r_{\text{kegel}} = \tan(\alpha/2) \cdot s$$

So ergibt sich beispielsweise für einen Sensor mit einem Öffnungswinkel von 10° in einer Entfernung von 5 Metern ein Kegel mit einem Radius von ca. 44 cm.

Um eine allseitige Sensorabdeckung zu erreichen muss am Quadrocopter eine ausreichende Anzahl an Sensoren befestigt werden. Hierbei muss ein Kompromiss gefunden werden, zwischen der Anzahl der Sensoren und der erzielbaren Auflösung. 6 Sensoren mit einem Öffnungswinkel von 60° können zusammen 360° abdecken, bieten aber nur eine Auflösung von 60° ; 60 Sensoren mit einem Öffnungswinkel von jeweils 10° bieten eine höhere Auflösung und können genauso einen 360° Radius abdecken.

Bei der Montage der Sensoren muss außerdem darauf geachtet werden, dass sich durch die Luftströmungen, die durch Bewegung und Rotoren erzeugt werden, keine negative Beeinflussung der Sensoren ergibt. Gerade die Temperatursensoren sind besonders empfindlich gegenüber Temperaturgradienten an ihrem Gehäuse, die leicht durch einen Luftstrom kalter oder warmer Luft entstehen können, und eine Verfälschung der Resultate zur Folge haben. Der Einfluss von Verwirbelung und Position der Rauch- und Gassensoren am Quadrocopter muss in der

Evaluationsphase untersucht werden, da nicht klar ist, ob die Luftströme die durch Rotoren und Flug entstehen, für einen besseren Luftaustausch an den Sensoren sorgt, oder selbigen verschlechtert.

4.2 Auswertung der Sensoren

Das Ziel der Auswertung ist es die Sensordaten zu verarbeiten und Erkenntnisse zu gewinnen auf deren Grundlage Entscheidungen über die Lage und gegebenenfalls die Steuerung des Quadrocopters getroffen werden können.

Im ersten Schritt müssen hierzu die Messdaten der Sensoren ausgelesen und aufbereitet werden, damit sie verarbeitet werden können.

Im nächsten Schritt müssen die Daten fusioniert und bewertet werden, sodass am Ende ein Lagebild entsteht, das möglichst zutreffend die tatsächlichen Umstände widerspiegelt.

Um nach der Datenfusion ein angemessenes Resultat zu erhalten, müssen die Eigenschaften der einzelnen Sensoren in das Fusionsmodell einbezogen werden. Beispielsweise kann das Vorhandensein von Rauch in der Luft ein Anzeichen für einen Brand sein, aber auch andere, harmlosere Ursachen haben. Wenn man allerdings gleichzeitig eine erhöhte Raumtemperatur im feststellen kann, so kann man mit größerer Bestimmtheit davon ausgehen einen Brand entdeckt zu haben. Andererseits kann wiederum eine erhöhte Umgebungstemperatur alleine das Ergebnis von ungünstiger Sonneneinstrahlung sein.

Da bei der Brandbestimmung mit den vier vorgesehenen Sensoren Situationen auftreten werden, in denen eine sichere Erkennung nicht möglich ist, bietet es sich an, auch die Unsicherheiten bei der Datenfusion zu berücksichtigen und zusammen mit den Ergebnissen anzugeben. Als Fusionsmodell soll hier das Evidenztheoretische Rechenmodell, das von Dempster-Shafer erdacht wurde, eingesetzt werden, mit dem nicht nur eine Brandwahrscheinlichkeit, sondern außerdem auch die Unsicherheit dieser Aussage bestimmt werden kann.

Angemessene quantitative Kriterien und Schwellwerte, die bei der Datenauswertung und im Fusionsprozess herangezogen werden – beispielsweise eine Raumtemperatur, ab der von einem Brand ausgegangen wird –, müssen bestimmt werden.

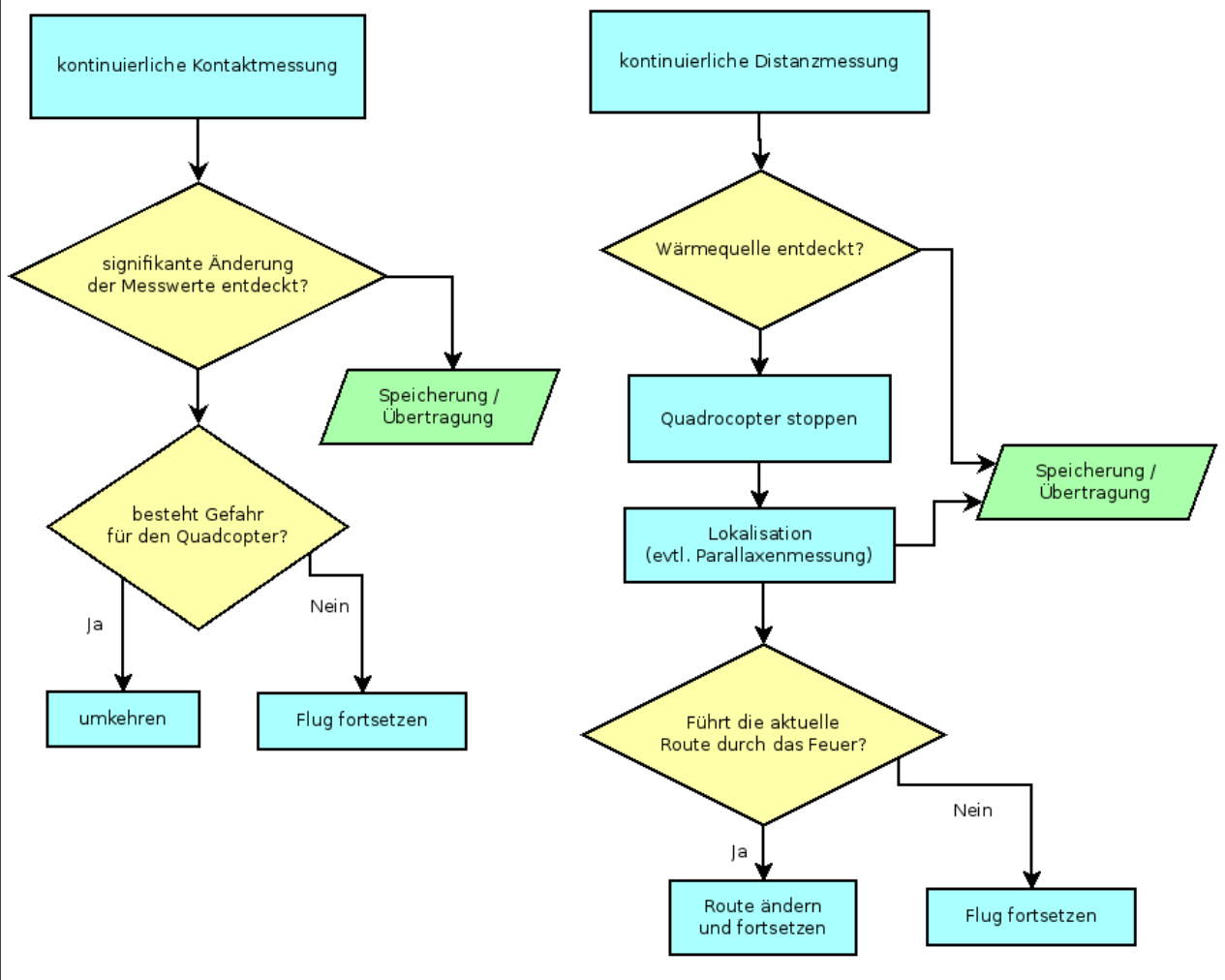
Die Messdaten und Schlussfolgerungen der Sensoren und Datenauswertung werden an das bestehende Kontrollprogramm übertragen und von diesem dargestellt, um die Kontrolle der Werte durch den Operator und die Überprüfung der einwandfreien Funktion zu vereinfachen.

Die Aussagen über die Lage sollen es dem UAV ermöglichen sich von Bränden fernzuhalten, um Beschädigungen zu vermeiden. Hierzu ist das Eingreifen des neuen Branderkennungs-Moduls in die bestehende Navigationssteuerung erforderlich. So kann der Quadrocopter angehalten werden, wenn er sich auf einen Brand zubewegt oder eine andere Route einschlagen, um zu einem sicheren Navigationspunkt zurückzukehren, falls die Umgebungstemperatur zu stark ansteigt und droht das Fluggerät zu beschädigen.

4.2.1 Erkundungs-Ablauf

Ziel des „AQopterI8“-Projektes ist die autonome Erkundung von Innenräumen. Soll der Quadrocopter autonom nach Bränden suchen, so ist es unabdingbar, dass eine Interaktion zwischen dem Branderkennungs-Modul und den Navigationskomponenten stattfindet. Dieser Eingriff soll dafür sorgen, dass der Quadrocopter zum einen nicht in Gefahr gerät durch Hitzeeinwirkung beschädigt zu werden, zum anderen mögliche Brandherde möglichst genau zu lokalisieren. Diese Bedürfnisse können es erfordern, dass das Gefährt in bestimmten Situationen stoppt, umkehrt, um Beschädigungen zu vermeiden, oder sich Hitzequellen nähert, um Sie besser untersuchen zu können. Abbildung zwei zeigt ein grobes Muster des Messablaufs beim autonomen Erkundungs- oder Wegpunktflug.

Die Interaktion mit der Navigationssteuerung wird in dieser Arbeit nicht implementiert.

**Wegpunkt-Navigation /
autonome Erkundung***Abbildung 7: Erkennungsablauf*

5 Implementierung

Sensoren

Wärmestrahlungssensoren / Temperaturmessung

Als Wärmestrahlungssensoren werden die Typen MLX90614 und MLX90620 der Firma Melexis eingesetzt, die relativ preiswert und leicht zu beschaffen sind und eine ausreichende Genauigkeit bieten. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Sensoren über eine Digitalschnittstelle verfügen. Die verwendeten Sensoren wurden freundlicherweise von der Firma Melexis zur Verfügung gestellt.

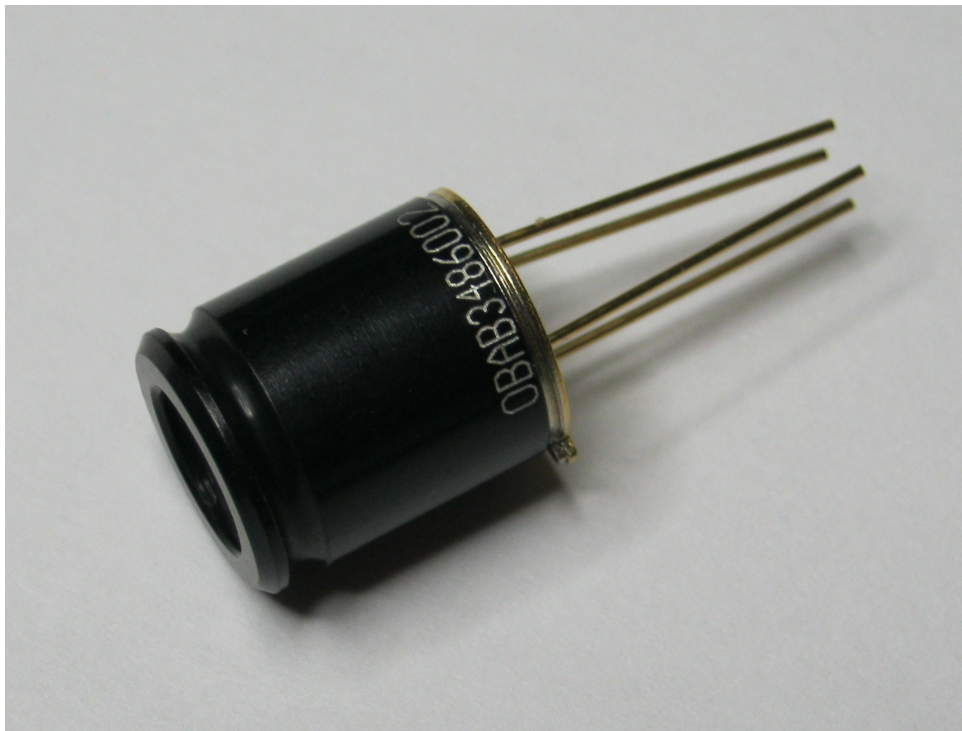


Abbildung 8: Foto eines MLX90620-Sensors

Diese integrierten Schaltkreise messen die einfallende Wärmestrahlung und erlauben so eine kontaktlose Temperaturmessung. Das zentrale Messelement der Sensoren sind Thermosäulen. Sensoren des Typs MLX90614 enthalten eine beziehungsweise zwei Thermosäulen, während MLX90620-Sensoren über eine 16-mal-4-Thermosäulenmatrix verfügen. Zusätzlich enthalten die Sensoren einen PTAT-Tempersensor zur Bestimmung der absoluten Chip-Temperatur. Die

gemessene absolute Temperatur für die einzelnen Thermosäulen wird mithilfe des PTAT-Sensor bestimmt, mit dem die Absoluttemperatur der rückwärtigen Verbindungsstellen der Thermosäulen gemessen wird.

Um ein akkurates Temperaturergebnis zu erhalten ist es notwendig den Emissivitätsgrad des abstrahlenden Körpers, dessen Temperatur gemessen werden soll, zu kennen. Praktisch muss der Emissivitätsgrad der Oberfläche geschätzt werden. Da die Emissivitätseigenschaften der Oberflächen, deren Temperatur gemessen wird in dieser Anwendung nicht bekannt sind, muss ein allgemeiner Wert festgelegt werden. Der im Sensor voreingestellte Emissivitätswert beträgt 1.

Neben den gemessenen Objekt-Temperaturwerten, geben beide Sensoren auch die PTAT-/Chip-Temperaturwerte aus. Die Sensoren verfügen über ein sehr gut temperaturleitendes Metallgehäuse und so kann über die Chip-Temperatur auch die Raumtemperatur einigermaßen genau bestimmt werden.

Die Kommunikation mit dem MLX90620 findet über das I²C-Protokoll, das auch auf der Quadrocopter-Plattform zur Kommunikation genutzt wird.

Im Gegensatz zum MLX90620 verfügt der MLX90614-Sensor über eine SMBus-Schnittstelle und die verwendete Protokoll-Untermenge ist, abgesehen von einigen Einschränkungen (beispielsweise muss ein Takt von mindestens 10 kHz generiert werden, um den Sensor auszulesen, während der I²C-Bus keine Mindesttaktrate vorgibt) kompatibel mit dem I²C-Bus.

Durch die Segmentierung des Blickfelds in ein 16-mal-4-Array ermöglicht der MLX90620-Sensor eine höher aufgelöste Richtungsbestimmung, als ein Sensor mit einem einzigen Sensorelement. Der MLX90620-Sensor ist in 2 Varianten, mit 60°- oder 40°-Öffnungswinkel erhältlich.

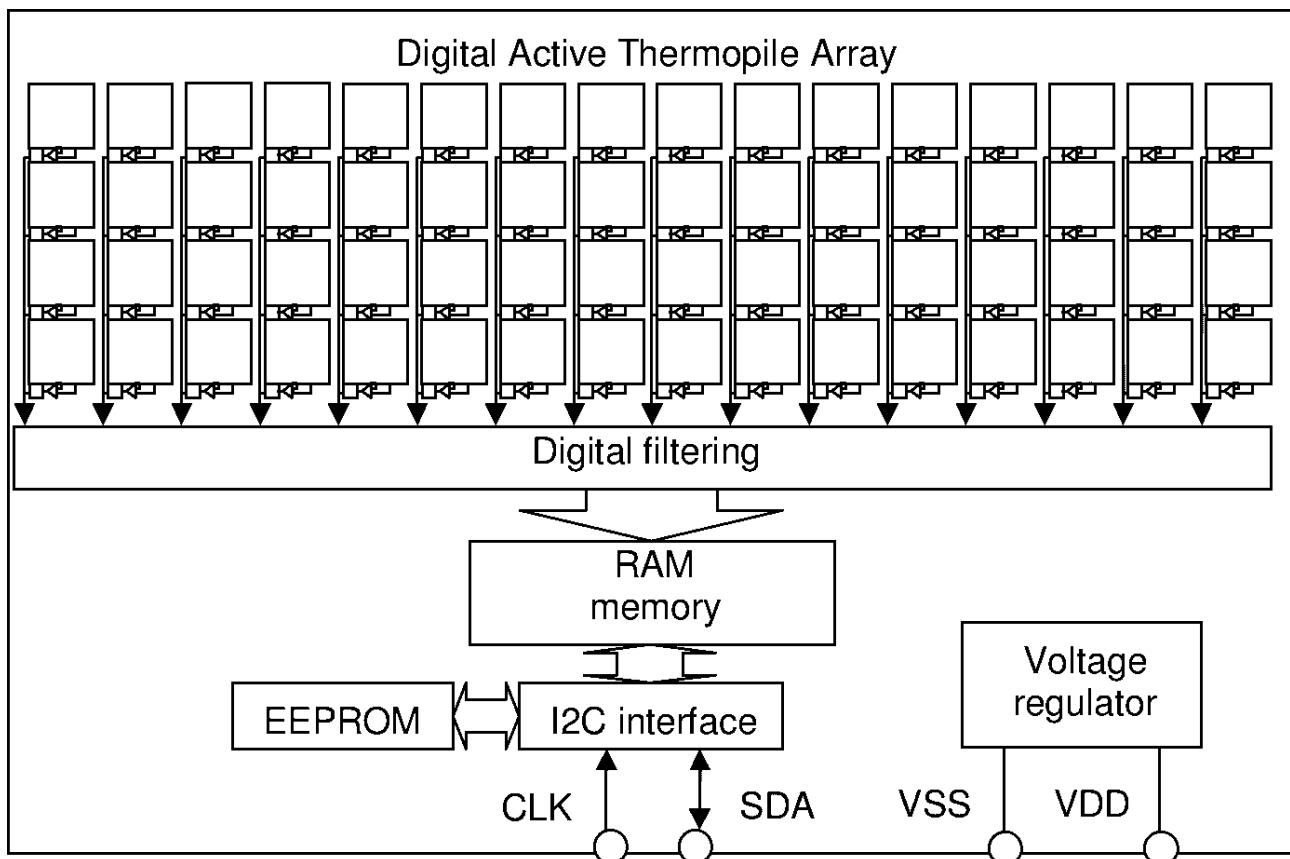


Abbildung 9: Blockdiagramm, MLX90620[2]

Bei der 60°-Version ergibt sich eine horizontale Auflösung von:

$$\frac{60^\circ}{16} = 3,75^\circ$$

Für die 40°-Version:

$$\frac{40^\circ}{16} = 2,5^\circ$$

So ergibt sich beispielsweise in 10 m Entfernung ein Messradius je Pixel von:

$$\tan\left(\frac{3,75}{2}\right) \cdot 10\text{ m} = 0,327\text{ m}$$

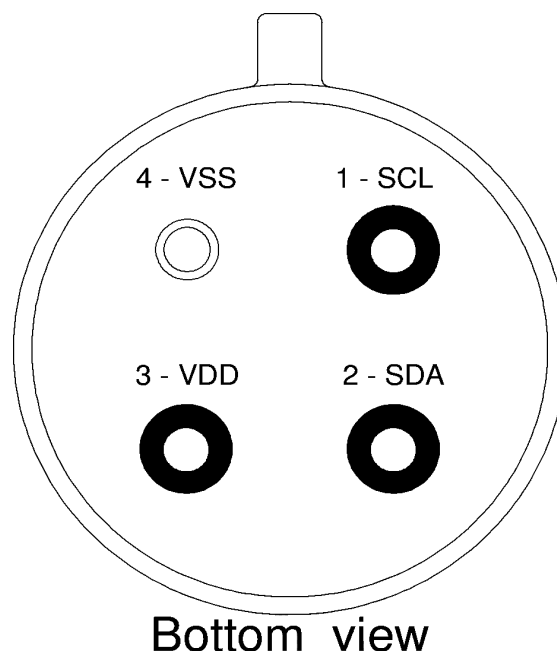
Diese Granularität sollte für den Zweck der Branderkennung genügen und daher wurde die 60°-Variante des MLX90620-Sensors beschafft.

Zur Abdeckung eines Vollkreises müssen 6 Sensoren dieses Typs am Quadrocopter angebracht werden.

Beim MLX90620 ergibt sich ein nicht unerheblicher Rechenaufwand für die MCU, da der Sensor nur Rohdaten liefert und die absoluten Temperaturwerte aus den Messdaten und Kalibrationsparametern gemäß einiger Formeln berechnet werden müssen, die im nächsten Abschnitt näher betrachtet werden.

Ansteuerung/Treiber

Die Sensoren verfügen über 4 Anschlüsse – Versorgungsspannung, Masse, I²C-Takt, I²C-Datenleitung – mit denen sie angeschlossen werden.



Bottom view
 Abbildung 10: Anschlüsse des
 MLX90614/MLX90620 [M90620]

MLX90614

Jedem MLX90614-Sensor kann eine eigene SMBus-/I²C-Adresse zugewiesen werden. Mit der Adresse 0 (General Call) lässt sich jeder Sensor ansprechen; dies ist nützlich, um die Adresse zu programmieren oder wenn der Sensor das einzige Gerät ist, das mit dem Bus verbunden ist. Die Temperaturwerte befinden sich im Sensor-RAM-Speicher, die über die digitale SMBus-Schnittstelle ausgelesen werden können.

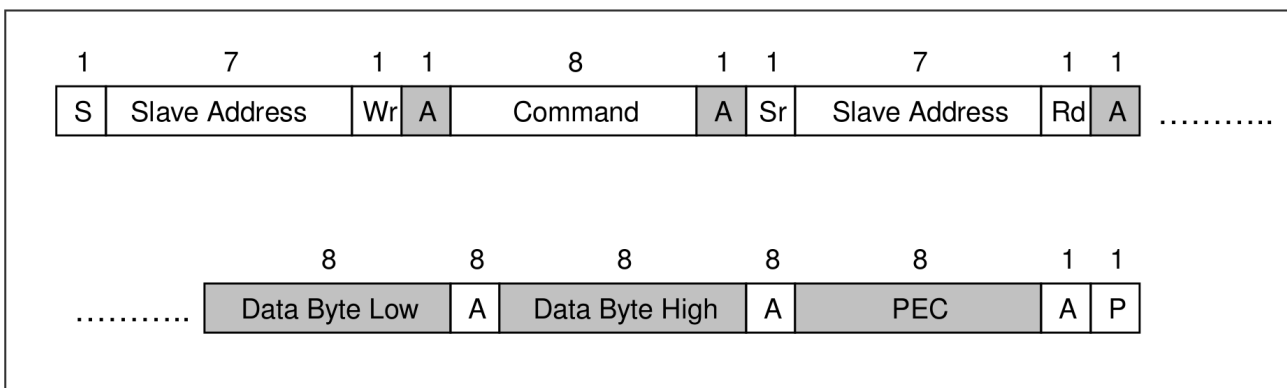


Abbildung 11: Lese-Vorgang / MLX90614 [M90614]

Zu beachten ist das PEC-Byte, das als CRC-8 Prüfsumme mit dem Polynom $x^8 + x^2 + x^1 + 1$ dient, aber beim Auslesen des Sensors ignoriert werden kann.

Die ausgelesenen Registerwerte lassen sich wie folgt in Kelvin beziehungsweise Grad Celsius umrechnen:

$$T[K] = T_{reg} \cdot 0.02 K$$

$$T[^\circ C] = T_{reg} \cdot 0.02 ^\circ C - 273.15 ^\circ C$$

MLX90620

Die Ansteuerung und das Berechnen der Temperaturwerte sind wesentlich aufwändiger für den MLX90620-Sensor.

Nach einer Startzeit von 5ms kann mit dem Sensor kommuniziert werden. Der Sensor enthält neben dem RAM einen EEPROM, auf den zugegriffen werden muss. Beide haben feste I2C-Adressen, die nicht geändert werden können! Das heißt, dass lediglich ein Gerät je Bus betrieben werden kann.

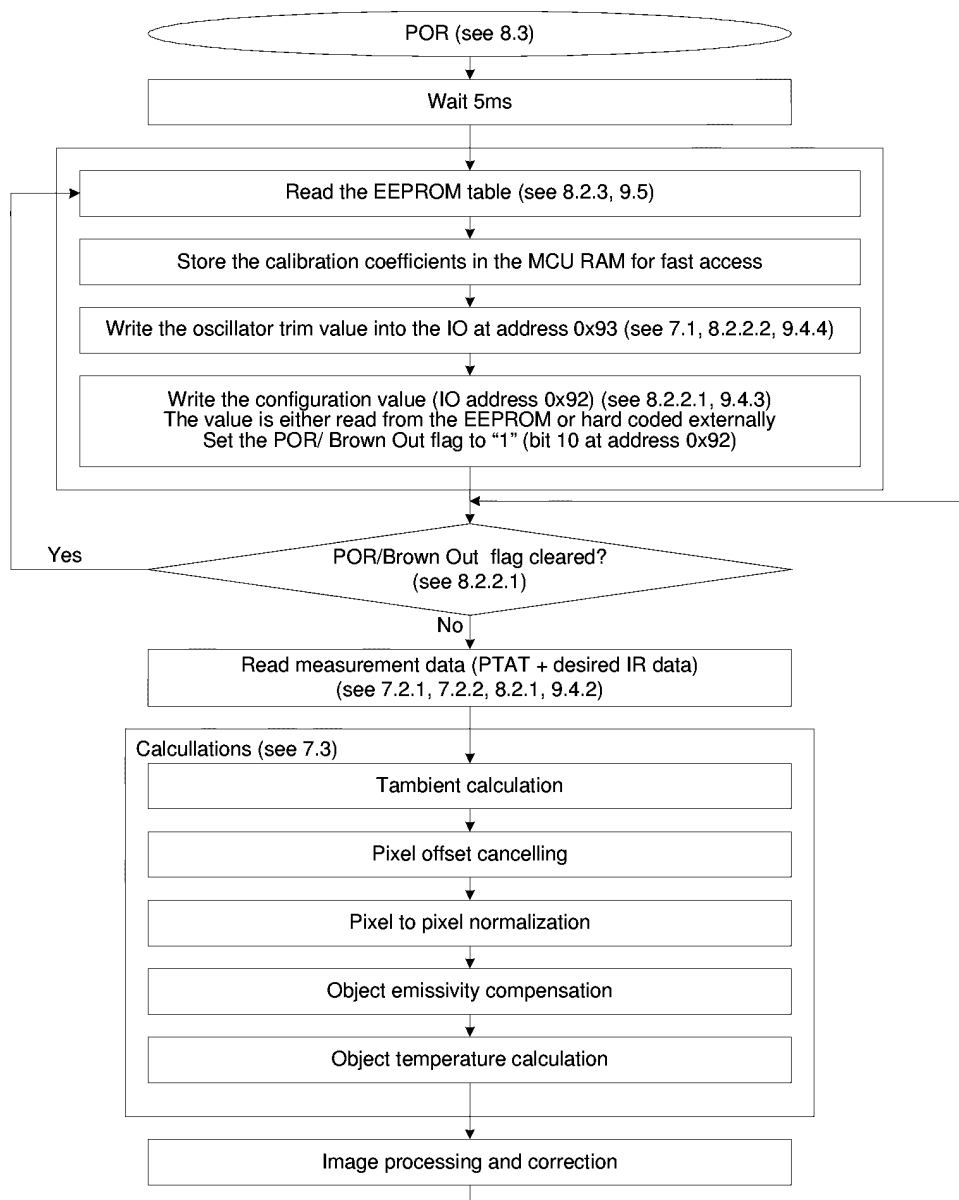


Abbildung 12: MLX90620-Auswertung [M90620]

Als erstes muss der EEPROM des Sensors ausgelesen werden. Es empfiehlt sich den gesamten EEPROM-Speicher auszulesen, da alle enthaltenen Werte konstant sind (solange man sie nicht überschreibt) und viele mehrfach verwendet werden müssen. Danach müssen das Oszillator-Trim-Register und das Konfigurations-Register mit dem vorgegebenen Wert aus dem EEPROM oder einem eigenen Wert beschrieben werden. Damit ist der Sensor fertig initialisiert und es kann gemessen werden.

Um eine hohe Auslesegeschwindigkeit zu erreichen wird empfohlen, die gesamten Temperaturwerte aus dem RAM mit einer Transaktion auszulesen.

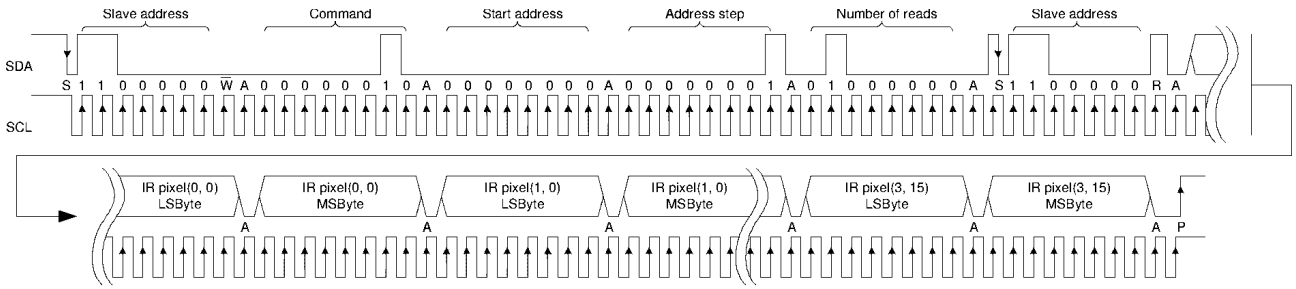


Figure 10 Whole frame (SA = 0x60, command = 0x02, Start address = 0x00,

Address step = 0x01, Number of reads = 0x40) measurement result read

Abbildung 13: Auslesen der Temperaturdaten aus dem RAM des MLX90620 [M90620]

Vor jedem Auslesen sollte das Brown-Out-Flag überprüft werden; falls es gleich 0 ist, so muss der Sensor erneut initialisiert werden. Die PTAT- und IR-Messdaten werden aus dem RAM ausgelesen und dann nach folgenden Gleichungen ausgewertet [M90620]:

PTAT-/Chip-Temperatur:

$$T_a [^{\circ}\text{C}] = \frac{-K_{t1} + \sqrt{K_{t1}^2 - 4 \cdot K_{t2} \cdot (V_{th} - PTAT[reg])}}{2 \cdot K_{t2}} + 25$$

Die Werte für V_{th} , K_{t1} und K_{t2} sind Kalibrationswerte und werden dem EEPROM entnommen.

Objekt-/Pixel-Temperatur:

$$T_{o,ij} [^{\circ}\text{C}] = 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{V_{ir,kompensiert}}{\alpha_{ij}}} + (T_a + 273,15)^4 - 273,15$$

α_{ij} wird dem EEPROM entnommen, $V_{ir,kompensiert}$ wird wie folgt berechnet:

$$V_{ir,kompensiert} = \frac{V_{ir,tgc,kompensiert}}{\epsilon}$$

ϵ ist die Emissivität und befindet sich im EEPROM. Dieser Wert kann im EEPROM überschrieben werden, um die Emissivität der Oberfläche, deren Temperatur gemessen wird zu bestimmen. Der vorgegebene Wert ist 1.

$V_{ir,tgc,kompensiert}$ wird wie folgt berechnet:

$$V_{ir,tgc,kompensiert} = V_{ir,off,kompensiert} - \frac{TGC}{32} \cdot V_{ir,cp,off,kompensiert}$$

TGC ist ein thermaler Gradientenkoeffizient, der zur Korrektur der Messwerte benötigt wird und aus dem EEPROM entnommen wird.

$V_{ir, off, kompensiert}$ wird wie folgt berechnet:

$$V_{ir, off, kompensiert} = V_{ir} - \left(A_{ij} + \frac{B_{ij}}{2^{b_{scale}}} \cdot (T_a - 25) \right)$$

$V_{ir, cp, off, kompensiert}$ wird wie folgt berechnet:

$$V_{ir, cp, off, kompensiert} = V_{cp} - \left(A_{cp} + \frac{B_{cp}}{2^{b_{scale}}} \cdot (T_a - 25) \right)$$

Die Berechnung sollte am besten für alle Pixel gleichzeitig geschehen, da dann Werte, die nicht von V_{ij} , A_{ij} , B_{ij} abhängig sind nur einmal berechnet werden müssen.

Gassensor

Zur Gasmessung wird der Metalloxid-Halbleiter-Sensor TP-401A der Firma Shenzhen Dovelet Sensors Technology auf dem Board „Grove Air Quality Sensor“ von der Firma Seeed Studio eingesetzt. Das Sensorelement besteht laut Datenblatt aus Zinnoxid, das mit anderen Materialien dotiert wurde. Der Sensor wird mit einer Spannung von 5V aufgeheizt und benötigt ca. 1 Minute um auf Betriebstemperatur zu kommen. Der elektrische Widerstand des Sensors verändert sich, wenn er in Kontakt mit einem oxidierbaren oder reduzierbaren Gas kommt. Auf der Platine ist ein LMV342M Operationsverstärker zur Signalverstärkung untergebracht.

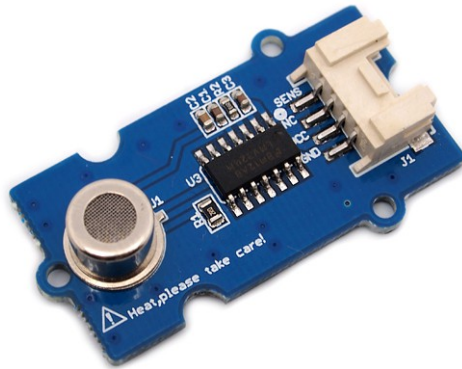


Abbildung 14: Der eingesetzte Gassensor mit Leiterkarte

Laut Datenblatt reagiert der Sensor auf folgende Gase:

„secondhand smoke, smoke generated from burning of wood and paper, volatiles of wine (alcohol) and cosmetics, ammonia, hydrogen sulfide, hydrogen, carbon monoxide, propane, methane, styrene, propylene glycol, phenol, acetone, thinner, insecticide, correction fluid, benzene, formaldehyde and so on.“[TP401]

Mit diesem Spektrum sollte der Sensor zur Detektion von Bränden geeignet sein. Eine Störung des Sensors durch andere Gase wie z.B. Aceton sollte vermieden werden. In Räumen, in denen die entsprechenden Stoffe absichtlich freigesetzt werden, muss die Verfälschung entsprechend beachtet werden, oder die Ausgabe des Gassensors ignoriert werden.

Rauchsensor

Zur Rauchdetektion wurde die Kammer mit den opto-elektronischen Elementen aus einem alten optischen Rauchmelder ausgebaut. Die Kammer besteht aus schwarzem Kunststoff und verfügt über verwinkelte Schlitzlöcher rundherum, die Rauch herein lassen, aber kein Licht.

Zur Beleuchtung befindet sich in der Kammer eine Infrarot-Leuchtdiode (Vorwärtsspannung ca. 1,5V; wird in Serie mit 200 Ohm an 3,3V angeschlossen) und eine Photodiode. Die Photodiode liefert ohne Einstrahlung eine Spannung gegen Masse von etwa 20-30 mV, bei Einstrahlung mit einer Lampe beziehungsweise dem Tageslicht ausgesetzt ca. 300 mV und in der geschlossenen Kammer mit Leuchtdiode und Rauch ca. 200mV.

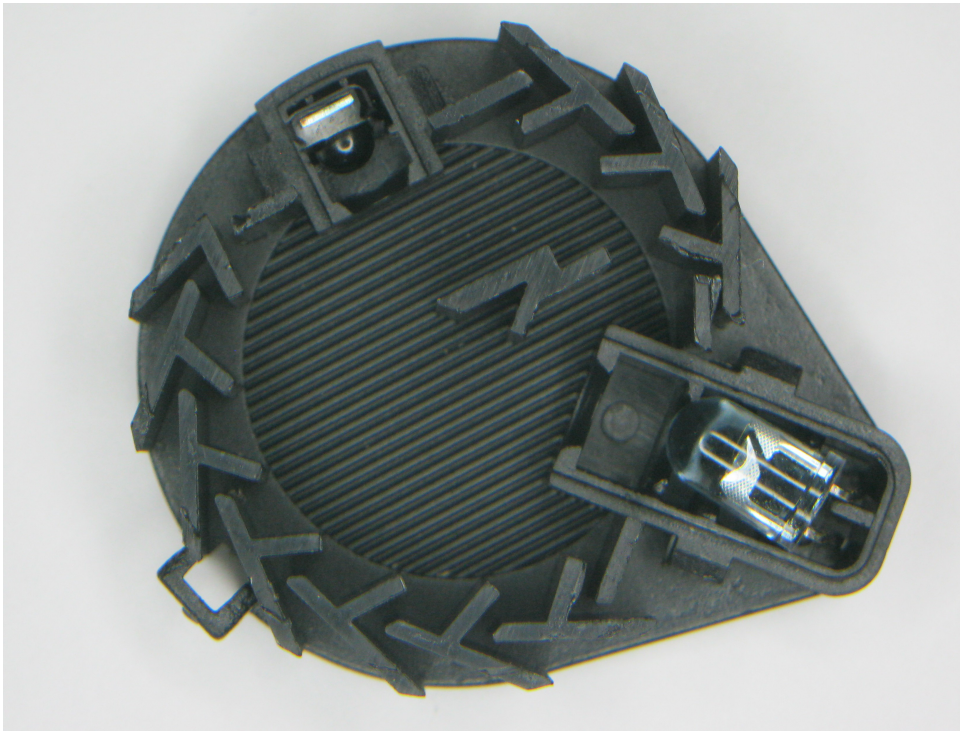


Abbildung 15: Foto des verwendeten Rauchdetektors. Die Leuchtdiode ist unten rechts zu sehen, die Photodiode oben links.

Zur Signalverstärkung wird ein nichtinvertierender Verstärker eingesetzt. Bei dieser Operationsverstärker-Schaltung wird der invertierende Eingang über R2 mit dem Ausgang, und über R1 mit Masse verbunden. Der nichtinvertierende Eingang wird mit dem Eingangssignal verbunden. Die Verstärkung beträgt: $1 + R2/R1$. Es wurde der Einfachheit halber eine Verstärkung von 11 gewählt. Hierbei hat R2 einen Zehnmal so hohen Widerstand wie R1.

Gewählt wurden: $R2 = 100 \text{ k}\Omega$ und $R1 = 10 \text{ k}\Omega$.

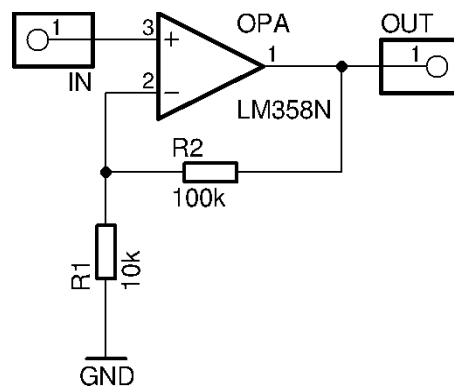


Abbildung 16: Schaltplan des nichtinvertierenden Verstärkers

Der Verstärker befindet sich auf einer eigenen Lochraster-Platine, sodass der Rauchsensor auch ohne den Verstärker getestet und angeschlossen werden kann.

Software

Die Auswertung von Rauch- und Gassensor erfolgt über die Analog Digital Converter (ADC), des AVR32-Mikrocontrollers. Die zugehörige Ansteuerungssoftware hat die Aufgabe anhand des digitalisierten Signals zu entscheiden, ob die Detektoren Gas beziehungsweise Rauch erkannt haben.

Die Treiber für die MLX90614/MLX90620-Sensoren verwenden einen in Software implementierten I²C-Bus-Master-Treiber. Der Bus-Treiber arbeitet mit den GPIO-Anschlüssen des Controllers. Da der I²C-Hardware-Controller des eingesetzten AVR32-Mikrocontrollers lediglich in der Lage ist 3 Kommandobytes zu übertragen,[Atmel, 2012] aber für die Kommunikation mit den MLX90620-Sensoren 4 Kommandobytes gesendet werden müssen, musste dieser Software-Treiber entwickelt werden. Außerdem sind die I²C-Adressen von RAM und EEPROM im MLX90620-Sensor fix; das heißt, dass nur ein MLX90620-Sensor je Bus angeschlossen werden kann.[M90620]

Der entwickelte I²C-Treiber kann mit angeschlossenem 12MHz-Quartz Bustakraten über 100kHz erreichen. Der Treiber beachtet das Clock-Stretching von angeschlossenen Geräten und ist in der Bedienung flexibel. Mit dem Treiber können beliebig viele Kommandobytes übertragen werden. Der Treiber benötigt zwei GPIO-Pins und es können, solange Pins vorhanden sind, beliebig viele

Busse verwendet werden. Der Treiber arbeitet synchron, d.h., dass die einzelnen Unterprogramme erst dann terminieren, wenn alle Daten transferiert wurden. Bei 100kHz können 1000 Bytes in ca. 15ms übertragen werden. Aufgrund der Clock-Stretching-Eigenschaft des I²C-Busses ist es ohne Probleme möglich, dass die Bus-Kommunikation durch Interrupts unterbrochen wird. Da der Master dann keinen Takt mehr generiert, pausiert auch das Slave-Gerät. Wenn der Interrupt behandelt wurde, kann die Kommunikation fortgesetzt werden. Bei der Übertragung von einer großen Datenmenge, bietet der Treiber aber auch die Möglichkeit die Übertragung in Blöcken zu je wenigen Bytes abzuwickeln.

Die Software berechnet dann für die Rohdaten aus den Thermosensoren die gemessenen Temperaturen. Mit einer linearen Suche wird in dem Array der berechneten Temperaturen der heißeste Pixel gesucht. Falls die Temperatur über der Raumtemperatur zuzüglich eingestellter Schwelle liegt, wird der Bildpunkt als „heißes Objekt“ erkannt. Aus der Zeilen- und Reihenummer (von 0 bis 3; 0 bis 15 respektive) wird dann der Winkel zum Objekt in horizontaler und vertikaler Richtung nach folgenden Formel berechnet:

$$\beta_{horizontal} = \frac{(Reihennummer - 7,5) \cdot 60^\circ}{16} + Sensorwinkel$$

$$\beta_{vertikal} = \frac{(Zeilennummer - 1,5) \cdot 16,4^\circ}{4}$$

Der Sensorwinkel gibt an, in welche Richtung der Sensor in der Horizontalebene der Sensor gerichtet ist.

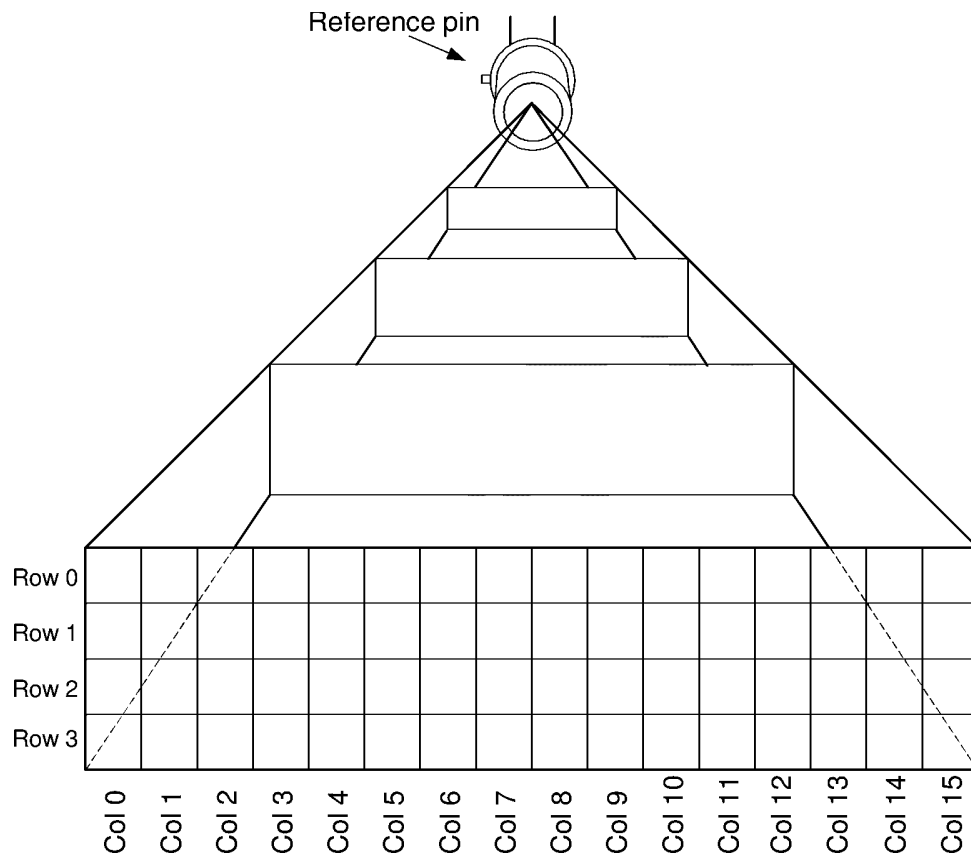


Abbildung 17: Reihen- und Spaltennummern für die einzelnen Bildpunkte[M90620]

QT-Steuersoftware

An die Steuersoftware werden einige der Messdaten gesendet, darunter:

- Ausgabe des Rauchsensors (normalisiert)
- Ausgabe des Gassensors (normalisiert)
- Umgebungstemperatur von einem der MLX906xx-Sensoren
- Wenn ein MLX90614-Sensor angeschlossen ist, die Objekt-Temperatur
- Die Temperatur des heißesten Objekts im Sichtfeld der MLX90620-Sensoren
- Die Winkel in horizontaler und vertikaler Richtung zum heißen Objekt.

Befestigung:

Die Strahlungssensoren wurden schwenkbar am Quadcopter-Rahmen mit eigens dafür angefertigten Halterungen befestigt.

Evidenzmodell

Die Evidenzen und Unsicherheiten für das Rechenmodell nach Dempster-Shafer wurden frei gewählt, da ein intensives Experimentieren mit echten Gebäudebränden nicht möglich ist. Die angegebenen werten sind Schätzwerte und sollten mit Skepsis betrachtet werden. Vermutet wird außerdem, dass die eingestellten Werte nicht für jeden Anwendungszweck geeignet sind und der Anpassung auf die konkrete Einsatzumgebung bedürfen.

Raumtemperatursensor:

- bis zu einer Raumtemperatur von 50°C kann keine Aussage zur Hypothese getroffen werden.
- ab einer Raumtemperatur von über 50°C beträgt die Evidenz für einen Brand:

$$e_{\text{Raumtemperatur}}(H_{\text{Brand}}) = T_{\text{Raum}} \cdot 0,01 ; \text{höchstens } 0,75$$

$$d_{\text{Raumtemperatur}}(H_{\text{Brand}}) = 1 - e_{\text{Raumtemperatur}}(H_{\text{Brand}})$$

Gassensor:

Da der Gassensor nur eine zuverlässige qualitative Aussage liefert wird von folgenden Werten ausgegangen.

- Gas im Raum detektiert: $e_{\text{Gas}}(H_{\text{Brand}}) = 0,75$
- kein Gas im Raum detektiert: $e_{\text{Gas}}(\neg H_{\text{Brand}}) = 0,25$

Rauchsensor:

Beim Rauchsensor ist es ähnlich wie beim Gassensor: es wird nur eine zuverlässige qualitative Aussage geliefert:

- Rauch im Raum detektiert: $e_{\text{Rauch}}(H_{\text{Brand}}) = 0,75$
- kein Rauch im Raum detektiert: $e_{\text{Gas}}(\neg H_{\text{Brand}}) = 0,25$

Wärmestrahlungssensoren:

Für die Aussage, ob es brennt oder nicht, wird die Richtung, in der ein heißes Objekt liegt, die mit den Wärmestrahlungssensoren festgestellt wird, ignoriert. Lediglich das Vorhandensein eines heißen Objekts wird als Evidenz für das Vorhandensein eines Brands gewertet. Im Umkehrfall, also wenn kein heißes Objekt erkannt wurde, könnte er sich bloß nicht im Blickfeld des Quadrocopters befinden, weil beispielsweise eine Wand zwischen Sensor und Feuer ist. Die Brandhypothese lässt sich so nicht widerlegen:

- Heißes Objekt erkannt: $e_{\text{Objekt}}(H_{\text{Brand}}) = 0,8$

Der Temperaturschwelle, die eine heißes Objekt überschreiten muss, um als solches zu gelten, wird mit 50 K über Raumtemperatur festgelegt.

6 Evaluierung

Da die Simulation von einem Gebäudebrand mit gleichzeitigem Quadrocopterflug durch das Gebäude nicht möglich war und aufwändige Flugexperimente nicht ins Zeitbudget gepasst haben, wurden die verschiedenen Sensoren zuerst einzeln und schließlich im Gesamtsystem getestet

6.1 Evaluierung der neuen Sensorik

Wärmestrahlungssensoren

Da die Wärmestrahlungssensorik nicht nur zur Temperaturmessung sondern auch zur Richtungsbestimmung eingesetzt wird, wurden beide Eigenschaften untersucht. Für diese Experimentierzwecke wurden 3 MLX90620-Sensoren verwendet, die mit einem Blickfeld von jeweils 60° in der horizontalen Ebene einen Gesamtbereich von 180° abdecken können, das für die Versuchsdurchführungen ausreicht.

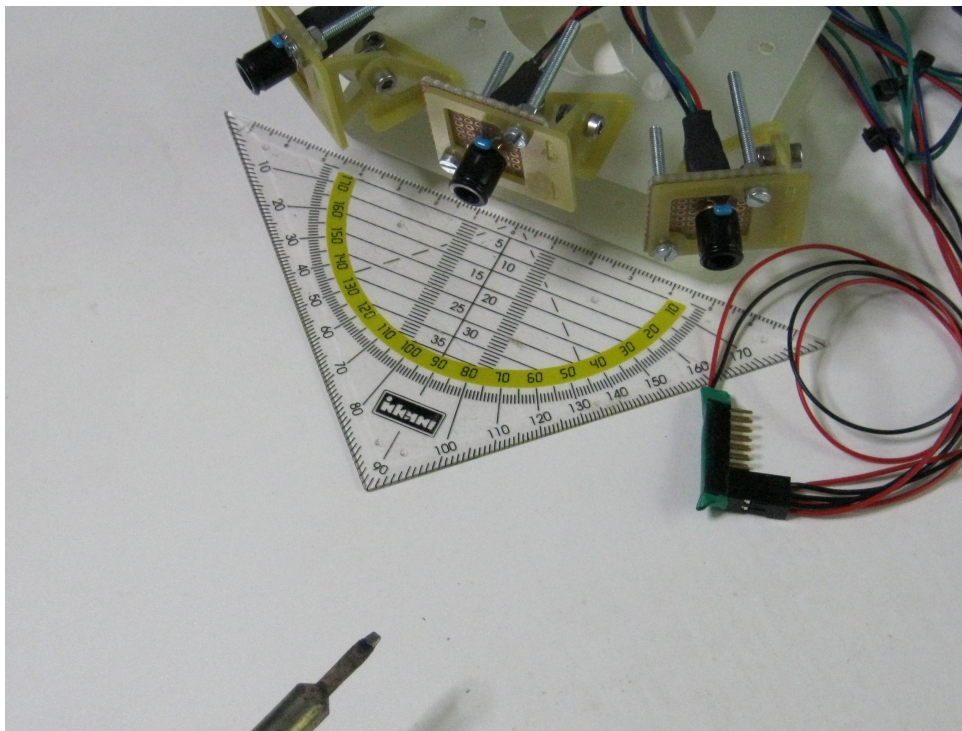


Abbildung 18: Die MLX90620-Wärmestrahlungssensoren im Versuchsaufbau

Die Wärmestrahlungssensoren wurden in ihren verstellbaren Halterungen auf einer Kunststoffplatte mit Schrauben angebracht, damit Sie einfach ausgerichtet werden können. Zur Überprüfung der Winkelausgabe wurde das folgende Experiment durchgeführt:

- Die Sensoren werden korrekt ausgerichtet und das System wird eingeschaltet.
- Ein LötKolben, der auf 300°C vorgeheizt wurde, wird in einer Kreisbewegung um die Sensoren mit einem Abstand von ca. 30 cm bewegt.
- Der durch die Software berechnete Winkel wird an die Debugging-Software übertragen.

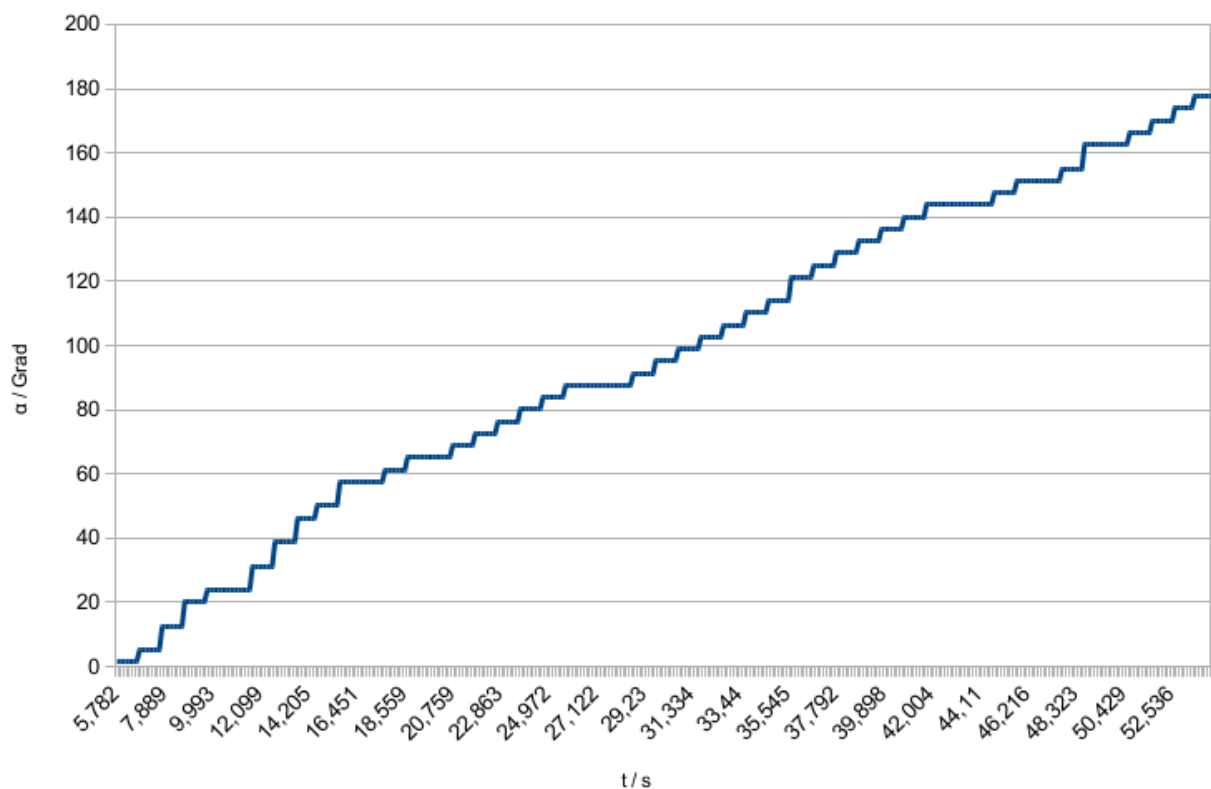


Abbildung 19: Messung der horizontalen Richtung zum Objekt

Bei der Durchführung dieses Versuchs hat sich gezeigt, dass die Quadrocopter-Software den richtigen Winkel mit einem Fehler von ca. einem Bildpunkt also etwa $3,75^\circ$ ermittelt. Da die Messungen nur sekundlich durchgeführt werden, erhält man bei einer schnellen Bewegung keine kontinuierlichen Ergebnisse, sondern es entstehen Sprünge in den Daten. Die Sensoren reagieren auf heiße Objekte im Blickfeld quasi sofort und es ist keine besondere Einstellzeit nötig:

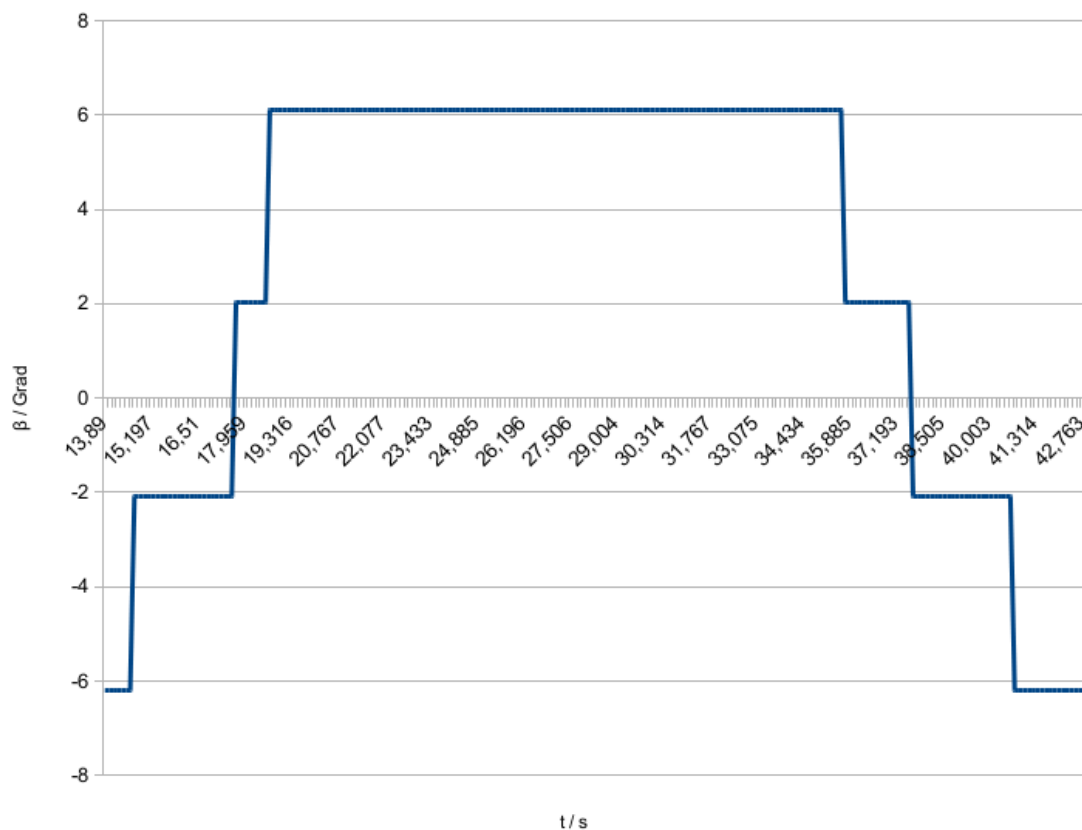


Abbildung 20: Das gleiche Experiment wurde auch in vertikaler Richtung durchgeführt.

Gut zu erkennen sind die Übergänge zwischen den einzelnen Reihen / Spalten des Thermosäulen-Arrays

Der von den MLX90620-Sensoren ausgegebene Maximalwert beträgt 300°C. Weil der Erkennungsalgorithmus mit dem voreingestellten Schwellwert 50K zu dem die Betriebstemperatur hinzuaddiert wird, welche laut Datenblatt nicht mehr als 85°C betragen sollte, heiße Objekte bereits bei gemessenen Temperaturen unter 300°C erkennt, ist diese Schwelle für die Erkennung heißer Objekte nicht von Bedeutung.

Um zu zeigen, dass die Oberflächentemperatur eines Brandherds stark schwankt, wurde ein Streichholz in verschiedenen Entfernungen vor einen der Sensoren gehalten und die Temperatur gemessen. Die Ergebnisse dieses Experiments und die gemessenen Temperaturen einiger anderer Objekte finden sich in der folgenden Tabelle.

Objekt	Entfernung	Temperatur	Raumtemperatur	Messradius (horizontal)
Wasserkocher / gefüllt mit kochendem Wasser	2,3m	79,15 °C	25,09 °C	0,075m
Wasserkocher / gefüllt mit kochendem Wasser	3m	65 °C	25,09 °C	0,098m
brennendes Streichholz	0,5m	100-200 °C	25,21 °C	0,016m
brennendes Streichholz	1m	65 – 90°C	25,22 °C	0,033m
brennendes Streichholz	2m	50-60°C	25,17 °C	0,065m
Heiße Tasse	15cm	75 °C	25,30°C	0,0049m
Heiße Tasse	30cm	69°C	25,30°C	0,0098m
Heiße Tasse	45cm	58°C	25,30°C	0,015m
Heiße Tasse	60cm	56°C	25,26°C	0,020m

Tabelle 1: gemessene Temperaturen verschiedener Objekte in unterschiedlichen Entfernungen

Die Temperatur des Streichholzes hat so starken Schwankungen unterlegen, dass stattdessen ein Temperatur-Bereich angegeben wurde, in dem sich die Temperaturen bewegt haben.

Bermerkenswert ist, dass die gemessenen Temperaturen mit größer werdendem Abstand kleiner wurden. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die Fläche, die von einem Bildpunkt erfasst wird, mit wachsender Distanz zum Sensor vergrößert. Das hat zur Folge, dass auch die Wärmestrahlung von Gegenständen gemessen wird, die sich hinter dem Messobjekt befinden. Jeder Bildpunkt misst immer den Durchschnittswert der auf die Messfläche einfallenden

Wärmestrahlung. Wenn nun ein Teil der abgestrahlten Wärme einer kalten Wandfläche hinter einem heißen Objekt in die Messung eines Bildpunktes miteinbezogen wird, dann sinkt folglich die gemessene Objekttemperatur.

Raumtemperatursensoren

Zur Messung der Raumtemperatur wurden die in den Wärmestrahlungssensoren integrierten Absoluttemperatursensoren verwendet. Zur Veränderung der Temperatur wurde wieder ein heißer Lötkolben eingesetzt, mit dessen Spitze vorsichtig das Gehäuse der Sensoren berührt wurde. Als Resultat hat sich die Chiptemperatur nur geringfügig verändert. Allerdings ist die gemessene Objekttemperatur rasant in die Höhe geschneilt.

Vermutlich hat das Gehäuse die vom Lötkolben abgegebene Wärme aufgenommen und einige am Rand der Matrix liegende Bildpunkte, deren Blickfeld teilweise durch kleine Bereiche des Sensorgehäuses verdeckt ist, haben daraufhin die erhöhte Temperatur des Sensorgehäuses erfasst, das daraufhin von der Software als heißes Objekt klassifiziert wurde. Auf diese Schwachstelle der Sensoren wird auch explizit im Datenblatt hingewiesen:

„IR sensors are inherently sensitive to difference in temperatures between the sensitive element and everything incident to that element. As a matter of fact, this element is not the sensor package, but the sensor die inside. Therefore, a thermal gradient over the sensor package will inevitably result in additional IR flux between the sensor package and the sensor die. This is real optical signal that can not be segregated from the target IR signal and will add errors to the measured temperature.

Thermal gradients with impact of that kind are likely to appear during transient conditions. The sensor used is developed with care about sensitivity to this kind of lateral phenomena, but their nature demands some care when choosing place to use the MLX90620 in order to make them negligible.“[M90620]

Um solche Probleme zu vermeiden, könnten zusätzliche Raumtemperatursensoren in das System integriert werden, die besonders schnell auf Änderungen der Umgebungstemperatur reagieren und dafür sorgen, dass fehlerhafte Messwerte der Wärmestrahlungssensoren ignoriert, oder neu bewertet werden.

Rauchsensor

Der Rauchsensor hat in früheren Funktionstests in der Konstruktionsphase zuverlässig funktioniert. Unglücklicherweise hat der Sensor während dieser Evaluierung nur sporadisch funktioniert. Vermutlich ist entweder die Photodiode beschädigt worden oder es sind Wackelkontakte in den Kabeln beziehungsweise kalte Lötstellen entstanden. Es wurde erfolglos versucht den Sensor wieder betriebsbereit zu machen. Zur Fehlerbehebung müssen wahrscheinlich alle Lötstellen und Kabel kontrolliert und die Photodiode ausgetauscht werden. Leider war kein passender Ersatz für die Photodiode vorhanden und es konnte aus Zeitgründen kein rechtzeitiger Ersatz beschafft werden. Die korrekte Funktion der Infrarot-Leuchtdiode konnte aber mit einer Digitalkamera festgestellt werden.

Gassensor

Der Gassensor wurde an einem kontrollierten Schwelbrand aus Tabakresten und Alkohol erprobt. Erwartungsgemäß hat der Sensor auf die aufsteigenden Gase reagiert und diese durch eine Spannungsänderung am Sensorausgang angezeigt.

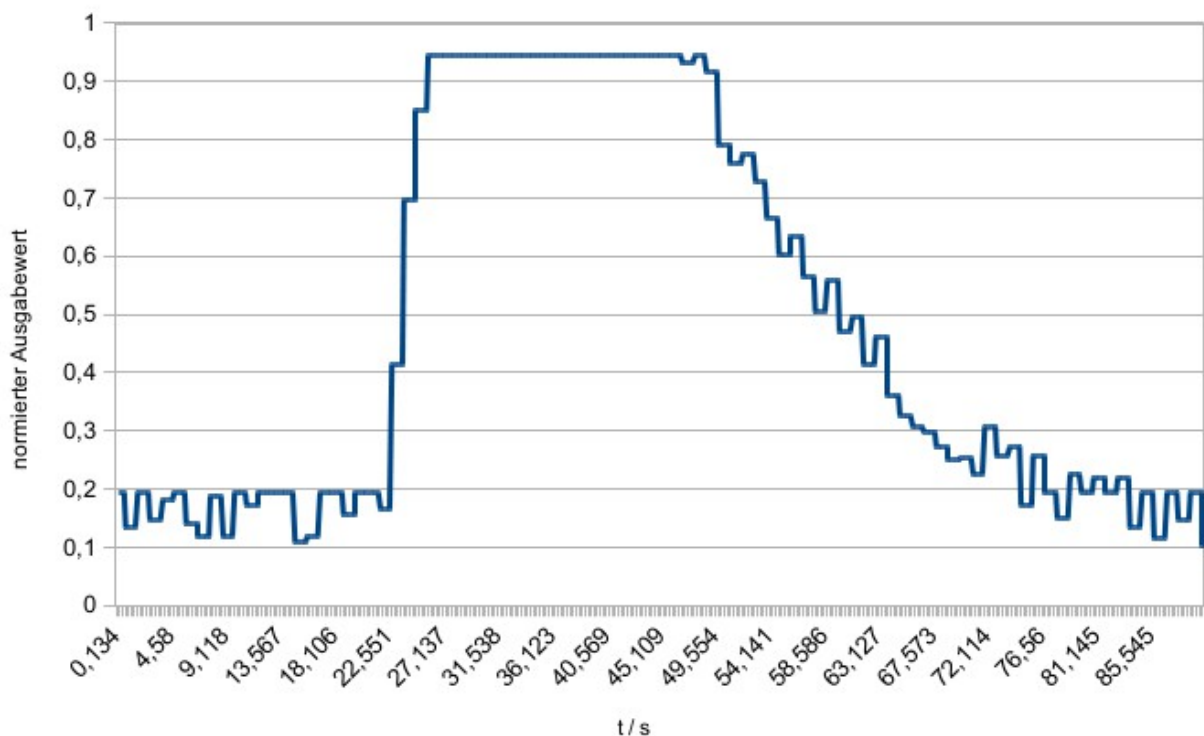


Abbildung 21: normiertes Ausgangssignal des Gassensors

Zum Zeitpunkt $t = 20\text{s}$ wurde der Sensor dem aufsteigenden Gasen ausgesetzt. Deutlich zu erkennen ist der rasante Anstieg des Ausgangssignals, der auf eine hohe Messempfindlichkeit schließen lässt. Beim Zeitpunkt $t = 40\text{s}$ wurde der Sensor wieder mit frischer Luft in Kontakt gebracht. Erst etwa 10 Sekunden ist ein Abfallen des Ausgangssignals zu erkennen. Der Sprung des Signals von etwa 0,2 auf etwa 0,95 hat nur wenige Sekunden gedauert, wohingegen das Absinken des Signals von 0,95 zurück auf den Wert von 0,2 ca. 45 Sekunden in Anspruch genommen hat. Diese Disparität mag dadurch erklären zu sein, dass sich die warmen Gase, die bei der Verschwelung des Tabaks entstanden sind, sehr schnell im Sensorgehäuse verteilt haben. Die frische Luft ist nicht erwärmt und steigt daher weder auf, noch verdrängt Sie die detektierten Gase besonders schnell aus dem Sensorgehäuse. Der rasante Anstieg des Ausgangswerts und das langsame Absinken könnten allerdings auch durch die Eigenschaften des Sensors verursacht werden.

In jedem Fall ist die schnelle Reaktion des Sensors vorteilhaft für das Branderkennungssystem.

Datenfusion / Dempster-Shafer-Modell

Der Datenfusions-Algorithmus nach dem Dempster-Shafer-Modell wurde bereits während der Implementierung mit mehreren Rechenbeispielen getestet und funktioniert einwandfrei. Da der Raumtemperatursensor und der Rauchsensor leider ausgefallen sind, macht es keinen Sinn die Ergebnisse der Datenfusion detailliert zu untersuchen, da die Menge der möglichen Ergebnisse durch die verringerte Anzahl der Sensoren auf eine kleine Anzahl zusammengeschrumpft ist.

Die Antworten zu den Fragen, ob für den Quadrocopter, oder Personen am aktuellen Ort Gefahr besteht, werden von der Branderkennungssoftware, wie im Implementationsteil spezifiziert ausgegeben.

Diskussion und Ausblick

Da die Wärmestrahlungssensoren und der Gassensor aktuell die einzigen Sensoren sind, die ihren Dienst erfüllen, entspricht das aktuelle System leider nicht dem konzeptionierten. Um das System funktionstüchtig zu machen, ist es nötig den Rauchsensor zu reparieren oder durch ein anderes Modell zu ersetzen und zusätzliche Raumtemperatursensoren zu integrieren, die auf Änderungen der Raumtemperatur schneller reagieren und vor Temperaturgradienten an den Gehäusen der Wärmestrahlungssensoren warnen.

Die Implementation der Wärmestrahlungssensoren und des Erkennungsalgorithmus haben gezeigt, dass es möglich ist, Hitzequellen und Brandherde auf große Distanz zu identifizieren und ihre Richtung zu bestimmen. Möglicherweise kann die Erkennungsroutine um weitere Funktionalität ergänzt werden, die es ermöglicht die ungefähre Größe eines Brands und die Distanz zwischen Brandherd und Quadrocopter zu schätzen.

In jedem Fall ist es unabdingbar, dass das System durch Experimente, die echte Brände in Innenräumen simulieren, überprüft und verbessert wird. Durch das Hinzufügen von weiteren oder besseren Sensoren könnten die Fähigkeiten zur Branderkennung optimiert werden.

Außerdem wäre es auch möglich die Sensoren und Teile der Programmlogik für andere Zwecke zu verwenden. Beispielsweise besteht bei Mapping-Anwendungen das Problem, dass oftmals nicht zwischen Personen, die dem Quadrocopter im Weg stehen und Wänden zu unterscheiden. Die Wärmesensoren könnten eingesetzt werden, um lebende Objekte zu erkennen und von Wänden, Säulen etc. zu unterscheiden.

Der Quadrocopter könnte mit den Wärmestrahlungssensoren auch dazu eingesetzt werden Thermografien von Gebäuden zu erstellen und dabei sonst schwer- oder unzugängliche Bereiche, wie zum Beispiel das Dach, auf entweichende Wärme zu untersuchen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialspezifisches Rauchgasvolumen [FB, 2013].....	8
Abbildung 2: Thermoelement, schematisch.....	15
Abbildung 3: Thermosäule, schematisch.....	16
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines optischen Rauchmelders [TEST, 2002].....	18
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Rauchmelders, der nach dem Ionisationsprinzip arbeitet.[US EPA, 2012].....	19
Abbildung 6: Überblick über verschiedene Gassensor-Typen [Spetz, 2006].....	21
Abbildung 7: Erkennungsablauf.....	28
Abbildung 8: Foto eines MLX90620-Sensors.....	29
Abbildung 9: Blockdiagramm, MLX90620[2].....	31
Abbildung 10: Anschlüsse des MLX90614/MLX90620 [M90620].....	32
Abbildung 11: Lese-Vorgang / MLX90614 [M90614].....	33
Abbildung 12: MLX90620-Auswertung [M90620].....	34
Abbildung 13: Auslesen der Temperaturdaten aus dem RAM des MLX90620 [M90620].....	35
Abbildung 14: Der eingesetzte Gassensor mit Leiterkarte.....	37
Abbildung 15: Foto des verwendeten Rauchdetektors.Die Leuchtdiode ist unten rechts zu sehen, die Photodiode oben links.....	38
Abbildung 16: Schaltplan des nichtinvertierenden Verstärkers.....	39
Abbildung 17: Reihen- und Spaltennummern für die einzelnen Bildpunkte[M90620].....	41
Abbildung 18: Die MLX90620-Wärmestrahlungssensoren im Versuchsaufbau.....	44
Abbildung 19: Messung der horizontalen Richtung zum Objekt.....	45
Abbildung 20: Das gleiche Experiment wurde auch in vertikaler Richtung durchgeführt.....	46
Abbildung 21: normiertes Ausgangssignal des Gassensors.....	49

Literaturverzeichnis

- Ambrosia, 2003: Ambrosia, V. G., Demonstrating UAV-Acquired Real-Time Thermal Data over Fires, ,Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2003,
- Schneider, 2012: Schneider, M., Fliegende Lebensretter aus Fränkischer Tag, Ausgabe 8.8.2012, zitiert nach:
http://www8.informatik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10030800/user_upload/quadcopter/Artikel_Quadcopter_Fraenkischer_Tag.jpg (Stand: 19.06.2013), 2012
- DIN14011: Deutsches Institut für Normung e. V., Begriffe aus dem Feuerwesen, 2010
- Usemann, 2012: Usemann, K.W., Brandschutz in der Gebäudetechnik: Grundlagen - Gesetzgebung - Bauteile - Anwendungen, Springer-Verlag 2002
- Chemie 2008: Vinke, A., Marbach, G., Vinke, J., Chemie für Ingenieure, Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2008
- FB, 2013: Forum Brandrauchprävention e.V., Gefährlicher als das Feuer ist der Brandrauch!, 2013, <http://www.rauchmelder-lebensretter.de/home/warum-rauchmelder/rauchgase/>, abgerufen: 20.09.2013
- BayBO, 2008: Karpati, A., Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, Die neue Bayerische Bauordnung 2008, 2008
- Böckh / Wetzel, 2011: von Böckh, P., Wetzel, T., Wärmeübertragung, Springer-Verlag 2011
- Tafelwerk, 2010: Erbrecht, R., u.a., Das große Tafelwerk, Cornelsen Verlag 2010
- Cimolino, 2011: Cimolino, U., Atemschutz: Sicheres und effizientes Vorgehen, Suchverfahren, Geräte und Hilfsmittel, ecomed Sicherheit 2011
- Papula, 2011: Papula, L., Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3, Vieweg+Teubner verlag 2011
- Hall / Llinas, 2001: Hall, D. L., Llinas, J., , CRC Press 2001
- Parsons: Parsons, S., Some qualitative approaches to applying the Dempster-Shafer theory, ,,
- Fraden, 2010: Fraden, J., Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, Springer Verlag 2010
- Hoerstel, 2005: Hoerstel, W., von Ardenne, M., Seebeck-Effekt aus Effekte der Physik und ihre Anwendungen, Harri Deutsch Verlag 2005
- M90614: Melexis N.V., Melexis MLX90614 Datenblatt, 2006
- Fruett, 2001: Fruett, F., The Piezoelectric Effect in Silicon. Consequences and Applications for Integrated Circuits and Sensors, 2001
- TEST, 2002: Stiftung Warentest, test, 2002
- US EPA, 2012: US Environmental Protection Agency, Ionization Technology, 2012, http://www.epa.gov/rpdweb00/sources/smoke_ion.html, abgerufen: 26.09.2013
- Delgado, 2002: Delgado, R. D., Tin Oxide Gas Sensors: An Electrochemical Approach, 2002
- US3695848: Taguchi Naoyoshi, US3695848 A, 1970, <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=03695848>, abgerufen: 20.09.2012
- Spetz, 2006: , Chemical Sensor Technologies, Tutorial 2006, Spetz, A. L.,2006,
- Ambrosia, 2005: Ambrosia, V.G. et al., Use of Unmanned Aerial Vehicles for Fire Detection, ,,2005,
- COMETS, 2006: COMETS Project, COMETS Project, 2006, <http://www.comets-uavs.org/>, abgerufen: 26.09.2013
- Celik, 2006: Celik, T. et al., Fire detection using statistical color model in video sequences, ,,2006,
- M90620: Melexis N.V., Melexis MLX90620 Datenblatt, 2012
- TP401: Shenzhen Dovelet Sensors Technology Co., Ltd, TP-401A Indoor air quality gas sensor,
- Atmel, 2012: Atmel, 32-Bit Atmel AVR Microcontroller, 2012