



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Regionalwettbewerb Jugend forscht

SINDELFINGEN



Inspektion großer Photovoltaik-Anlagen mit einer Drohne

Leonard Bröckling
Florian Wendler
Jonathan Wendel

"Inspektion großer Photovoltaik-Anlagen mit einer Drohne"



Einleitung

Wir sind 3 begeisterte Hobbypiloten von Modell-Multikoptern. Im AerospaceLab, dem Jugendforschungszentrum in Herrenberg, hat uns die Gelegenheit fasziniert, größere und komplexere Drohnen, in Form von Hexakoptern selbst zu planen und zusammenzubauen. Die erfolgreiche Bewerbung um Unterstützung durch ein mikromakro-Projekt war dann der Startpunkt mit der notwendigen materiellen Unterstützung .

Sowohl für das **MikroMakro**-Projekt als auch für die ins Auge gefasste Teilnahme an Jugend Forscht war es uns wichtig, dass wir eine neue praktische Idee mit dem Einsatz der Drohne verbinden wollten. Bekannt war, dass der Einsatz von Drohnen mit Wärmebildkamera zur Inspektion von Photovoltaik-Feldern vermehrt von verschiedenen Unternehmen in Deutschland angeboten wird. Unsere Untersuchungen kamen aber zu dem Ergebnis, dass der Einsatz doch sehr eingeschränkt ist.

Dabei lag der Vorteil einer Wärmebildkamera auf der Hand: Defekte in Photovoltaik-Feldern sind meist mit bloßem Auge nicht erkennbar. Als "Hotspots" kann man die Schadstellen mit einer Wärmebildkamera leicht identifizieren. Von unserer Herrenberger EnBW-Niederlassung erfuhren wir, dass es sehr aufwendig ist, auf einen entsprechenden Verdacht hin, mit Gerüsten und Hebeeinrichtungen einen Teil des Solardachs mit einer Wärmebildkamera im richtigen Aufnahmewinkel aufzunehmen. Also ist die Drohne die Lösung.

Trotz der eindeutigen Vorteile des Drohnenflugs mit der Wärmebildkamera sind die tatsächlichen Einsätze und Aktivitäten begrenzt. Nach unseren Gesprächen mit Betreibern von PV-Anlagen stellten wir folgende Gründe fest:

- der Inspektionsflug ist zwar interessant aber aufwändig. Die Flugzeit ist kurz und es gibt zu viele Unwägbarkeiten/Ausfallmöglichkeiten
- die Kosten für Bereitstellung von Personal ("Hobbypilot" und Solarfachmann) und Gerät sind unangemessen hoch. Komplette Systeme mit Kamera werden zwischen 20.000 und 35.000 € angeboten (nach oben offen...). Daher leiten sich die hohen Einsatzkosten der Anbieter ab.
- die Ergebnisse sind ernüchternd: es werden in der Regel nur wenige Hotspots entdeckt, welche die Gesamtleistung nur unwesentlich beeinträchtigen.

- dabei beschäftigt die Betreiber von PV-Anlagen ein anderer Kostenfaktor viel mehr über den Entscheidungen anstehen: die Errichter der Anlagen argumentieren, dass eine periodische mechanische Säuberung der Solarfelder notwendig und effizienter sei.

Vor diesem Hintergrund haben wir uns diese Projektziele vorgenommen:

- Herstellung eines kostengünstigen und zugleich stabilen Flugsystems mit Wärmebildkamera
- Trennung von effizienter Aufzeichnung und Auswertung/Analyse der Fehler an PV-Anlagen (der Solarfachmann nimmt nicht am Flug teil, sondern erhält Filme und Hinweise für die anschließende Untersuchung und Reparatur).
- da anfänglich nur wenige Hotspots auftreten ist unser Ziel, in Abständen von einem halben Jahr oder Jahr wiederkehrende und weitgehend automatisierte Flüge vorzunehmen, um Veränderungen bzw. Fortschreiten der Fehler aufzuzeigen.

Projektphasen (Bau, Inbetriebnahme und Stabilisierung)

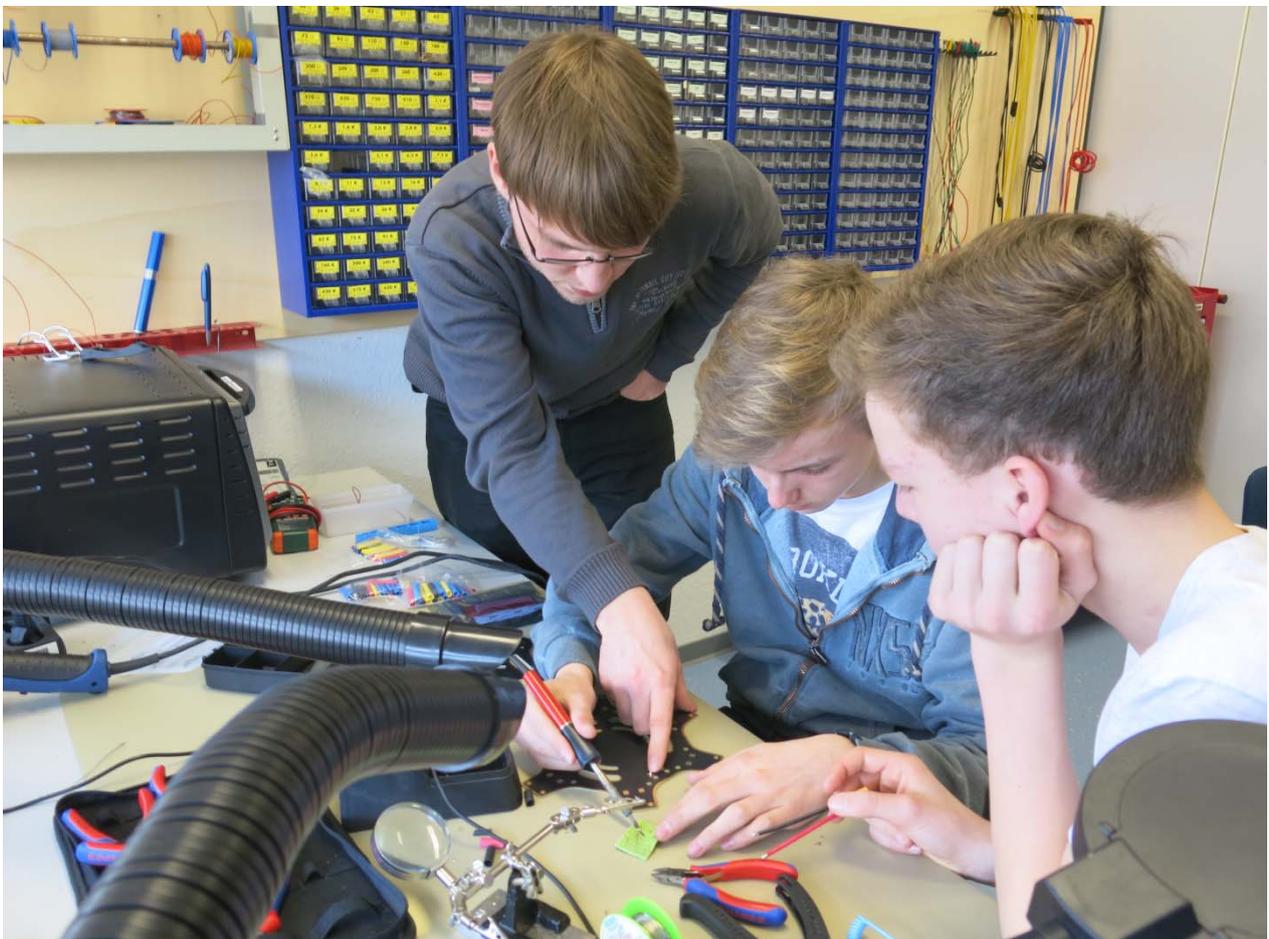
Entscheidung für den Rahmen, die Motoren und die ESCs

Zunächst haben wir entschieden den Hexacopter selber zu bauen. Begründung: Ready-to-fly-Drohnen haben unterschiedliche Funktionen und Leistungsmerkmale, die man schwer, oder gar nicht erweitern kann. Die Entscheidung für den richtigen Rahmen fiel uns nicht leicht. Parameter für unsere Entscheidung waren Größe der verwendeten Akkus und die daraus resultierende Flugzeit, die Dimensionen der Propeller und des Rahmens, der eine Wärme- und eine normale Kamera tragen muss. Das ganze natürlich in einem eingeschränkten Budgetrahmen. Aufgrund von vielen Modellen in diesem Bereich ist die Auswahl nicht grade gering. Für den Frame des F550 von DJI haben wir uns aufgrund vieler Faktoren entschieden. Natürlich wichtig ist die Stabilität und die Verbindungssteifigkeit des Gestells. Diese Kriterien erfüllt der Frame einwandfrei. Doch das fast wichtigste, ist der freie Platz zum montieren von

Hardware wie einer Flugsteuerung oder eines Gimbals, des fpv- Senders etc. Ebenfalls direkt in der Grunplatte des Modells enthalten ist die Stromverteiler an die Motorcontroller. Für Motoren und die ESCs haben wir uns aufgrund der Vollständigkeit entschieden. Beide Produkte sind auf den Rahmen angepasst und hochwertig. Durch eine hohe Verfügbarkeit von Ersatzteilen viel uns die Wahl leichter. Der Hersteller der Produkte war uns bereits bekannt, und hatte einen guten Eindruck bei uns hinterlassen. Durch viele Erfahrungsberichte, auch aus dem Internet, viel uns die Entscheidung für dieses Produkt nicht allzu schwer.

Lötarbeiten

Zu Löten gab es gegen Anfang reichlich. Der Stromverteiler war zwar bereits in der Grundplatte verlegt, doch der Anschluss für den Lithiumionenakku und die Kabel die den Strom weiter an die Motorcontroller leiten, mussten verlegt, und an den Frame musste noch gelötet werden. Die Kabel müssen eine Mindest-Dicke haben, da teilweise bei hohem Gewicht des Hexacopters hohe Ströme fließen. Bei der Steckerauswahl für den Akku entschieden wir uns, aufgrund von zu erwartendem hohem Strom, für die XT90 Variante.



Entscheidung für die Steuereinheit

Der zentrale Kern eines X-Copters ist die Steuereinheit. Durch große Auswahl unterschiedlicher sind unterschiedliche Funktionen verbaut, und verschiedene Hardware kompatibel. Für den NAZA V2 haben wir uns aufgrund folgender Gründe entschieden: Der Flugkontroller ist ebenfalls vom Hersteller DJI und ist ein Modulares System.

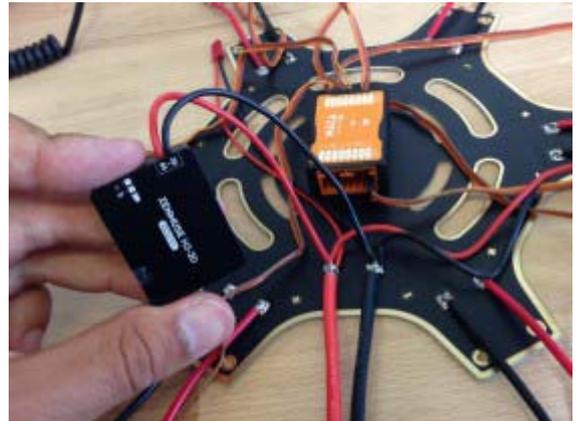
Dementsprechend ist er leicht erweiterbar mit vielen Zusatzoptionen. Durch zahlreiche Sicherheitsfeatures wie z.B. den automatischen Rückflug mit erfolgreicher Landung ist der Hexacopter nicht allzu schwer zu fliegen. Ebenfalls gibt die Steuereinheit Lichtsignale bei niedriger Akkuspannung von sich. Um den NAZA V2 in Betrieb zu nehmen, sind keine Programmierkünste notwendig. Außerdem verfügt er über einen Output, über den die Telemetriedaten des Flugobjekts drahtlos auf einem Computer oder einer Bodenstation empfangen werden können und vom Piloten ausgewertet werden können.

Wie arbeitet der NAZA

Der Flugcontroller verarbeitet die Daten der Lagesensoren oder der Fernsteuerung und steuert entsprechend die einzelnen Motoren beziehungsweise die die Motorcontroller an, sodass der gewünschte Flugzustand gehalten wird. Sämtliche Informationen des Flugzustands des Fluggeräts können an externe Geräte weitergeben werden (z.B. an ein Gimbal, oder die Bodenstation).

OSD

OSD ist eine Abkürzung für „On screen display“. Das Modul wird zwischen den Liveausgang der Kamera und den Videosender geschaltet. Es empfängt die Telemetriedaten des NAZA und schreibt die wichtigsten davon auf das Livebild der Kamera. Der Videostream wird am Boden empfangen und zeigt die Bilder aus der Luft, sowie die Daten, dem Piloten an. Das OSD ersetzt die wichtigsten Instrumente eines regulären Flugobjekts.



Quelle: www.drohnen-forum.de

Stromversorgung

Um die Stromversorgung zu gewährleisten sind große Akkus notwendig. Der Hexacopter wird mit zwei Akkus, unterschiedlichen Spannungsniveaus versorgt. Das eine für die Motoren und die Flugsteuerung, das andere für das Videosystem. Wir waren anfangs unsicher, welche Akkuspannung benötigt wird, in Anbetracht der noch unbekanntem Nutzlast und des Gesamtgewichts des Hexacopters. Deshalb entschieden wir uns für Motoren, die 4S wie 3S Akkus zuließen. Unsere 3-Zellen Akkus haben eine Nennspannung von 11,1 Volt, die 4-Zeller von 14,8 Volt. Beim ersten Flug haben wir die 3-Zellerakku eingesetzt. Es stellte sich recht schnell heraus, dass wir mehr Spannung und Akkukapazität benötigen, um bei größeren Solarfeldern erfolgreich die Hotspots zu finden. Dadurch ergibt sich, dass wir heute fast ausschließlich mit 4S-Akkus fliegen, die eine Kapazität von 5000-8000 mAh haben.

[Grafik was alles an den Akku angeschlossen ist]

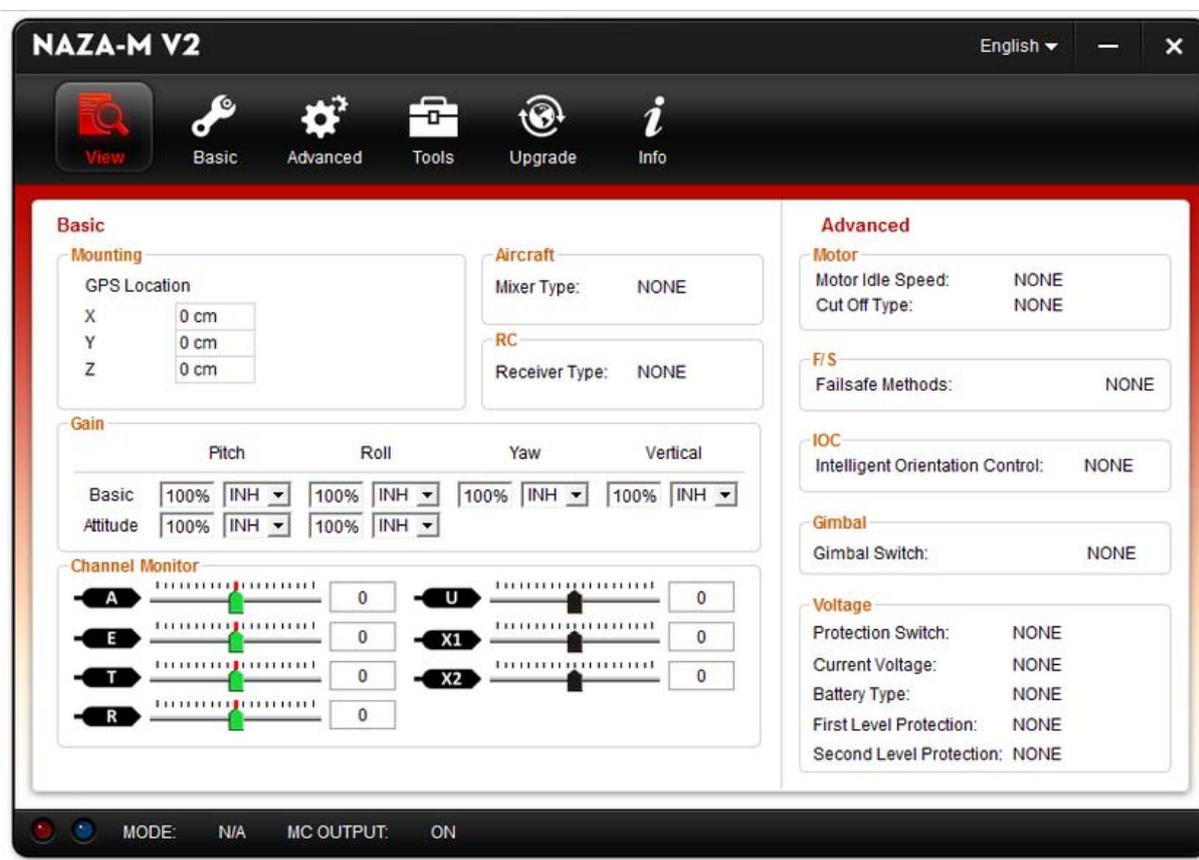
Fernsteuerung

Als Fernsteuerung setzten wir eine bereits im Aerospacelab vorhandene Spektrum DX-8 mit 2.4 GHz und 8 Kanälen, welche für unsere Zwecke zunächst ausreichend sein sollten.

Diese Technologie macht es möglich, dass viele Benutzer zur gleichen Zeit auf dieser Funktion funken können und sich dabei nicht gegenseitig stören. Sender und Empfänger suchen sich automatisch einen freien Kanal und nutzen diesen. Eine Eigenart gibt es dabei, Sender und Empfänger müssen einander bekannt gemacht, „gebunden“ werden. Ein weiterer Vorteil gegenüber den bisherigen 34 MHz Steuerungen ist, dass nur ein sehr kurzer Antennenstummel gebraucht wird.

Einrichtung NAZA mit Assistant im PC

Der Vorteil der NAZA war das Vorhanden sein einer Software zur Konfiguration und Installation: NAZA-Assistent. Es erfolgt die Hardwareeinstellung, die Kalibrierung des Empfängers und der Fernsteuerung, sowie auch die Einstellung der verschiedenen Flugzustände, in denen sich der Hexacopter befinden kann. Man kann auswählen aus: Manuell, Höhe halten, GPS-Position halten und dem Failsafemode. Bei letztem steuert der NAZA den Copter bei Ausfall der Fernsteuerung oder einem niedrigen Akkustand eigenständig zum Ausgangspunkt zurück und absolviert eine selbständige Landung.



Gimbal

Die Wärmebildkamera welche zur Aufnahme der Solarmodule bestimmt ist, muss in der Neigung während des Flugs veränderbar sein. Um das zu gewährleisten haben wir sie auf einem Gimbal aufgehängt. Ein Gimbal ist eine Kardanische Aufhängung einer Kamera in 1, 2 oder 3 Ebenen. In unserem Fall, ist lediglich die Neigung, die wir dem zu beobachtenden Dach anpassen wollen, vertreten. Über einen Drehknopf an der Kamera können wir die Ausrichtung der Kamera während des Flugs verändern.

Transcent Videorekorder

Videorecorder

Quelle: Shenzhen Unitoptek
Electronics Co., Ltd. China

Nach langen Recherchen ist es uns
gelingen, einen für unsere
Zwecke sinnvollen



Onboardvideorekorder als Platine zu erwerben. Damit können wir die beobachteten Wärmebildaufnahmen sowohl im Hexacopter speichern als auch die Daten direkt zur Überwachung während des Flugs zu Bodenstation zu schicken.

Bodenstation

Als Bodenstation haben wir einen Hochauflösenden 7 Zoll Monitor mit zwei eingebauten 5.8 GHz Empfangssystemen gewählt. Der Monitor hat einen eigenen 3S, 12 Volt Akku mit 1000 mAh. Zudem verfügt das Gerät über zwei unabhängige Antennen. Die Lichtstärke ist hell genug, dass man selbst bei Starkem Sonnenlicht die Szenerie auf dem Bildschirm beobachten kann. Der Monitor erkennt automatisch, bei welcher Antenne das stärkere Signal anliegt, und wählt diese zu Videoübertragung aus. Damit gewährleistet das System auch in ungewöhnlichen Flugsituationen eine sichere Übertragung.

GPS-ANTENNE seitliche Versetzung

Da wir die Antenne nicht mehr mittig befestigen konnten, musste sie etwas seitlich befestigt werden. Dem Flugcontroller muss das natürlich mitgeteilt werden, damit er entsprechen korrigieren kann.

Location and Orientation



Check & Configure GPS Orientation

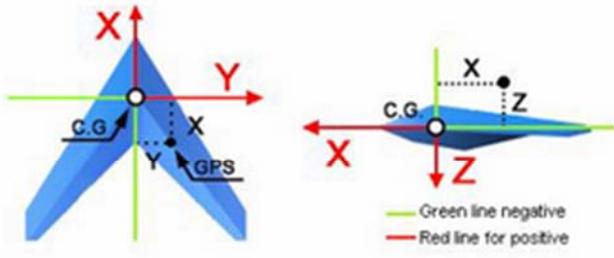
1. The main label on the GPS should face the sky and the arrow point to the nose direction of the multi-rotor.
2. Fill in the distance between the center of the GPS and the C.G. of multi-rotor in X, Y & Z axis.

Important
If the GPS location are not accurate enough or the signs are wrong; this could cause the multi-rotor to oscillate.

Controller Orientation



Mounting Location



— Green line negative
— Red line for positive

GPS	
X	-8 cm
Y	-5 cm
Z	-10 cm

Press Enter to Write. Mount the MC as close to C.G. as possible

default

PV-Fehler, Inspektionsflüge, Entdeckung von Hotspots in PV-Feldern

Photovoltaik-Anlagen

Photovoltaikanlagen wandeln Sonnenenergie direkt in elektrische Energie um. Seit ca. 30 Jahren wird diese Art genutzt elektrische Energie zu gewinnen. Es gibt verschiedene Arten von Solarzellen. Die hergestellten Größen von Solarzellen gehen von 10x10 bis hin zu 15x 15 Zentimeter. Zum Schutz werden vor die Solarzellen Frontgläser eingesetzt und die Rückseite wird mit einer Folie ein laminiert und versiegelt. Anschließend werden noch wasserdichte Anschlusskabel verlötet. Und gerade an diesen Anschlussdrähten können beispielsweise Hotspots entstehen. Schlechte Lötstellen können nämlich abbrechen. Wenn dies passiert kann diese Solarzelle keine Sonnenenergie mehr in Elektrische Energie umwandeln. Sie wirkt dann sogar als Widerstand. Die Solarzelle erhitzt sich stark. Um 2000 boomte die Solarindustrie enorm. 2011 wurde in Deutschland rund 52% mehr investiert als im Vorjahr. Allein Baden-Württemberg hat Mittler Weile schon 582 Solaranlagen. Gerade jetzt wo es so viele Solaranlagen gibt müssen wir uns um die Wartungen kümmern.

<http://www.mwsolar.de/photovoltaik/solarzellen.html>

<http://www.pv-log.com/photovoltaikanlagen-l-deutschland>

Hotspots:

Ein häufig auftretender Fehler an Solarzellen sind beispielsweise so genannte Hotspots (Heißer Fleck). Hotspots sind Temperaturschwankungen innerhalb eines Solarmoduls welche beispielsweise durch Fertigungsfehler, schlechte Lötstellen, Verschattungen (Laub, Schnee,...) oder Spannungen hervorgerufen werden. In dem Moment wo eine Solarzelle keine Sonnenenergie mehr in elektrische Energie umwandeln kann wirkt sie als "Widerstand". Da Solarzellen in Reihe geschaltet sind fließt der ganze Strom dann durch diesen "Widerstand". So gibt es Verluste. Die Solarzelle erhitzt sich. Außerdem könnte so ein Hotspot noch andere Lötstellen durch die Hitze kaputt machen und sich somit ausbreiten. Dies kann bis zur vollständigen Zerstörung führen. Zum Beispiel kann auch das Glas von einer Solarzelle zerspringen und somit Wasser eindringen, welches dann zu einem Kurzschluss führen kann. Hotspots lassen sich beispielsweise von Bypass Dioden verhindern, da sie den Strom korrekt umleiten können, dass der Strom nicht mehr durch den "Widerstand" muss.

Hotspots kann man mit Hilfe von Wärmebildkameras identifizieren. Wenn man Hotspots mithilfe von Wärmebildkameras untersuchen möchte gibt es jedoch bestimmte Merkmale, auf die man achten muss. Z.B. sollte man einen Betrachtungswinkel von 5-60° einhalten. Sonst können fälschliche Ergebnisse entstehen, da Spiegelungen auftreten können.

Avio NEC Thermo Shot F30:

Wir haben uns für eine "Avio NEC Thermo Shot F30S" Wärmebildkamera entschieden. Diese Kamera wird durch eine stabilisierende Kamerahalterung an unserem Sechspeller-Modellflieger befestigt. Durch das sogenannte Gimbal (Kamerastabilisierung) können wir die Kamera in der Vertikale verstellen, was für die korrekte Aufnahme von Hotspots sehr wichtig ist. Die Anschaffungskosten der Kamera sind verhältnismäßig mit ca. 4.000 Euro sehr gering. Das Jugendforschungszentrum hat diese mit Unterstützung der EnBw gekauft.

Die Kamera eignet sich besonders für unseren Verwendungszweck, da sie sehr leicht ist. Dafür hat sie aber nur eine Auflösung von 160x120 Pixel. Wir haben gelernt, dass diese Auflösung für unsere Zwecke vollkommen ausreichend ist. Sie ist ähnlich aufgebaut wie eine handelsübliche Digitalkamera und ist äußerst handlich. Die Kompaktkamera liefert Wärmebilder mit einer

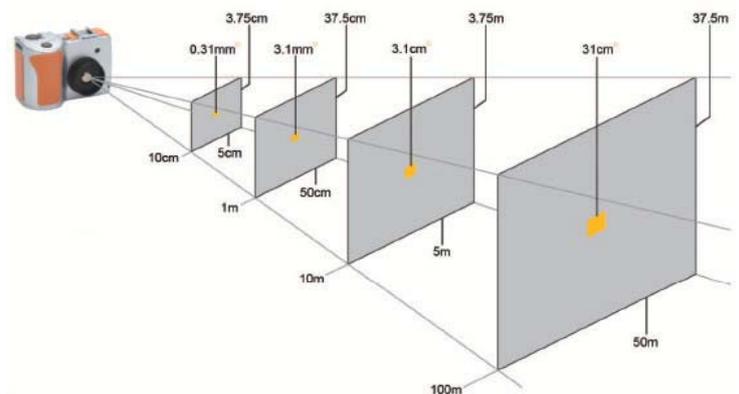
Temperaturauflösung von bis zu 0,1 Kelvin und hat ein Gewicht von ca. 300g inkl. Batterie. Integriert ist eine digitale Echtbildkamera, welche zum Vergleich gleichzeitig ausgelöst wird. Zudem besitzt sie einen Videoausgang. Datum und Zeit (B) werden angezeigt, ebenfalls der eingestellte Emissionsgrad (C) zur späteren Auswertung. Auch hier wird der aktuelle Temperaturbereich (D) angezeigt. Alle Informationen bleiben auf der Aufnahme erhalten.

Bevor man jedoch fliegen kann muss man die Kamera perfekt auf die Umgebung anpassen. Außerdem muss man die richtige Entfernung treffen. Man sollte die Wärmebildkamera auf 0,9 einstellen. Wir haben herausgefunden, dass eine Entfernung von 10-15 Metern perfekt ist, um eine ganze Reihe von Solarmodulen seriös zu überprüfen.

Die Kamera liefert Wärmebilder mit einer

Temperaturauflösung von bis zu 0,1 Kelvin und hat ein Gewicht von ca. 300g inkl. Batterie. Integriert ist eine digitale Echtbildkamera, welche zum Vergleich gleichzeitig ausgelöst wird. Zudem besitzt sie einen Videoausgang. Datum und Zeit (B) werden angezeigt, ebenfalls der eingestellte Emissionsgrad (C) zur späteren Auswertung. Auch hier wird der aktuelle Temperaturbereich (D) angezeigt. Alle Informationen bleiben auf der Aufnahme erhalten.

Bevor man jedoch fliegen kann muss man die Kamera perfekt auf die Umgebung anpassen. Außerdem muss man die richtige Entfernung treffen. Man sollte die Wärmebildkamera auf 0,9 einstellen. Wir haben herausgefunden, dass eine Entfernung von 10-15 Metern perfekt ist, um eine ganze Reihe von Solarmodulen seriös zu überprüfen.



Quellen: <http://waermebildkamera.irpod.net/produkte/portable-infrarot-waermebildkameras-nec-avio/mini-waermebildkamera-avio-nec-thermo-shot-f30w/?v=3a52f3c22ed6>

Projektidee

Unsere Art der Überprüfung von Solarmodulen und Solarfeldern ist ökonomisch gesehen perfekt. Bis jetzt ist es nämlich extrem aufwendig Solarfelder zu untersuchen. Denn meistens muss die Feuerwehr anrücken, was selbstverständlich nicht gerade preisgünstig ist. Und in manche Regionen kann auch die Feuerwehr nicht mehr eindringen. Laut EnBW kostet ein solcher Einsatz pro Tag an die 1000€. Gerade für solche Fälle eignet sich unsere Drohne hervorragend. Sie kommt überall hin, der Aufwand ist minimal und der Preis logischer Weise auch. Wir haben uns das so vorgestellt, dass ein Modellflug erfahrener Fachmann die Drohne fliegt und die Aufnahmen tätigt. Diese Aufnahmen werden dann an einen 2. Spezialisten (Solarfachmann) übergeben, welcher die Aufnahmen dann auswertet, damit nicht 2 Fachmänner an den Untersuchungsort müssen. Dies würde die Kosten dann auch nochmal senken. Wir kamen auf unser Projekt, da wir 3 begeisterte Hobbypiloten sind und uns überlegt haben, was man sinnvolles mit einer Drohne anstellen kann. Nach einem Überflug eines Solarfeldes haben wir einen Hotspot entdeckt. Der Betreiber meinte jedoch, dass ein Hotspot für ihn nicht so viel ausmacht. Deshalb haben wir uns überlegt, wie wir uns attraktiver machen können. Wir kamen auf die Idee periodische Erkundungsflüge zu machen. Zum Beispiel alle halbe Jahre. Dann können wir vergleichen, ob sich der Hotspot vergrößert oder sich sogar vermehrt und ob damit eine Reparatur notwendiger wird. Dies wurde dann gleich mit Begeisterung angenommen.

Hotspots Erkundungsflüge

Wiesenhof Altingen

Auf diesem Landwirtschaftlichen Anwesen haben wir mit Zustimmung des Eigners die ersten Inspektionsflüge unternommen. Dabei stellten wir fest, dass die aufgenommenen Dachflächen wenig Unregelmäßigkeiten



zeigen, also alle in Ordnung schienen. Fast durch Zufall stellten wir bei einem etwas höheren Flug auf einem dahinterliegenden Dach einen Hotspot aus einer größeren Entfernung fest. Aus dieser Erfahrung haben wir gelernt, dass wir wesentlich höher fliegen können, als vorher angenommen und damit größere Felder aufnehmen können. (siehe Entfernungsskala/Bildgröße oben)



Solarfeld Schwarzwald:

Die Erlaubnis zum Befliegen großen Photovoltaikfeldes dann in Neuweiler im Die Größe des Solarfelds ist Herausforderung für uns und begrenzten Flugzeiten nur gesteuerte automatisierte durchgeführt werden. Der entdeckte Hotspot konnte auch gleich erfüllt werden - zu heiß zum Anfassen.



eines sehr bekamen wir Schwarzwald. eine kann wegen der durch GPS- Flüge erste hier

