

Industrieprojekt

Rotorblattenteisung

Theo Zwahlen

Dozent:	Prof. Dr. Christoph Eck
Experte:	Prof. Dr. Th. Prud'homme
Industriepartner:	Aeroscout GmbH Hr. MSc Benedikt Imbach
Abteilung:	Elektrotechnik & Informationstechnologie Hochschule Luzern , Technik und Architektur
Abgabedatum:	21. Dezember 2018
Geheimhaltungsstufe:	Rücksprache

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum

Unterschrift

Horw, 20. Dezember 2018

Abstract

In future the drones from Aeroscout should be capable to fly in high mountain regions. In these conditions it's possible that the rotors freeze which would lead to flight inability. In this project the basis to build a defrosting system should be evaluated. By building a prototype the functions of the defrosting system should be demonstrated.

To reach this, information from manned aviation were collected. Tests with a recreated rotor model with integrated heating wires have given an approximation of how much energy is needed to defrost the rotor. In these test the detaching time of frozen textile on the recreated rotor model using different heating powers was measured. Additionally, in a climate chamber at the ETH Zurich it was shown that ice can easily build on the rotor blade while he is turning. Because of missing time the construction of the heatable rotor blade could not be finished and therefore a functioning defrosting system can not be presented. However the prototype without the heatable rotor blades is ready to be tested. He is able to measure air temperature, relative air humidity and save them to an SD-card. Further he's prepared to test a heatable rotor blade with different heating powers and on-/off times.

Kurzfassung

Die Drohnen der Aeroscout sollen zukünftig für Flüge im Hochgebirge einsatzfähig sein. Dabei sind Vereisungen des Rotors möglich. Die Eisablagerungen führen zur Flugunfähigkeit der Drohne. Die vorliegende Industriearbeit soll die Grundlage für den Bau einer Enteisungsvorrichtung bieten und mit einem Prototyp diese Funktion demonstrieren. Dazu wurden Erfahrungen aus der bemannten Fliegerei zusammengetragen. Mit einem nachgebauten Rotorblattaufbau mit integriertem Heizdraht wurden Abschätzungen zur benötigten Energie für das Eis ablösen gemacht. Dabei wurden die Ablösezeiten von aufgefrorenen Stoffstücken bei verschiedenen Leistungen verglichen. In einer Klimakammer der ETH Zürich wurde gezeigt, dass sich Eis am Rotor leicht künstlich erzeugen lässt. Eine funktionierende Enteisung konnte mangels Zeit nicht demonstriert werden. Das beheizbare Rotorblatt wurde nicht fertig gestellt, der Rest des Prototyps ist jedoch bereit für Tests. Er ermöglicht die Ansteuerung eines beheizbaren Rotorblatts mit verschiedenen Leistungen und verschiedenen Ein- / Auszeiten. Weiter speichert er die Messwerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf einer SD-Karte.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Kurzfassung	4
1 Vorwort	7
I Einführung	7
2 Einleitung	7
3 Aufgabestellung	8
3.1 Problemaufspaltung	8
4 Eisverhinderung	8
4.1 Oberflächenstruktur	9
4.2 Mechanische Eisablösung	9
4.3 Elektrische Beheizung	9
4.3.1 CNT-Farbe	10
4.3.2 Textile Heizelemente	10
4.4 Beheizen durch Abwärme	10
5 Detektion	11
5.1 Sensoren zur Eisdetektion	11
5.2 Detektion von Vereisungsbedingungen	12
6 Energieübertragung	13
II Beschrieb der Komponenten	13
7 Konzept zur Beheizung	13
8 Prototyp	14
8.1 Leistungsendstufe	16

8.2 Software	17
9 Heckrotorprüfstand	19
III Versuche	21
10 Versuch zur Ermittlung der thermischen Energie	21
11 Versuch zur Eisbildung	22
11.1 Versuchsaufbau	22
11.2 Resultat	23
12 Ausstehender Versuch	25
IV Schlussteil	25
13 Fazit	25
Literaturverzeichnis	25
Abbildungsverzeichnis	28
Tabellenverzeichnis	29
V Anhang	29

1 Vorwort

Ich möchte mich herzlich bei Prof. Dr. Christoph Eck für das Vertrauen und die Betreuung meiner Arbeit bedanken. Ausserdem danke ich Prof. Erich Styger für die Beratung und Hilfe im Bereich der Softwareerstellung. Ein grosses Dankeschön geht an Robert Presel von der ETH Zürich für die Unterstützung beim Gebrauch der Klimakammer. Weiter bedanke ich mich herzlich bei Romeo Bee für die Zusammenarbeit.

I Einführung

2 Einleitung

Aeroscout entwickelt Helikopter Drohnen für diverse Aufgaben[1]. Zukünftig sollen die Drohnen für Flüge im Hochgebirge eingesetzt werden. Dabei sind Anwendungen im Bereich der Bergrettung und der künstlichen Lawinenauslösung im Fokus. Heute werden solche Flüge mit bemannten Hubschraubern oder gar nicht ausgeführt. Flüge mit bemannten Hubschraubern sind sehr teuer und bei nur kleinen Risiken wird auf Flüge verzichtet. Ein Drohnenflug ist im Vergleich billiger und wenn bei kritischen Wetterbedingungen Flüge möglich wären, wäre das ein sehr grosser Vorteil. Dazu müssen die Drohnen aber extremen meteorologischen Bedingungen standhalten können. Ein grosses Problem stellt dabei die Vereisung der Rotorblätter dar. Durch die Formveränderung, die dadurch am Rotorblatt erfolgt, ist die Aerodynamik gestört und die Drohne wird innert Kürze flugunfähig. Diese Arbeit soll daher die Grundlage schaffen, um solche Vereisungen zu vermeiden. Sie erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Romeo Bee von der Maschinentechnik. Seine Projektarbeit bezieht sich auf die Fertigung eines neuen Heckrotorblatts, in welches die nötigen Enteisungsmassnahmen integriert sein sollen. Die vorliegende Arbeit bezieht sich vorwiegend auf die elektrischen Systeme zur Ansteuerung der Enteisung und die nötige Infrastruktur für Versuchsaufbauten.

3 Aufgabestellung

Für den Heckrotor soll der Prototyp einer Enteisungsvorrichtung entwickelt werden. Dies beinhaltet die Recherche über bestehende Systeme, die Ausarbeitung von möglichen Lösungsansätzen und die Realisierung eines Testaufbaus mit dem Heckrotor. Nach Möglichkeit soll die Funktion bei verschiedenen Temperaturen und bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten aufgezeigt werden.

3.1 Problemaufspaltung

Die Aufgabenstellung kann in drei Teilprobleme unterteilt werden. Ein Teil ist die Enteisung als solches. Wie lässt sich Eisbildung verhindern oder wie entfernt man bereits gebildetes Eis. Eine weitere Teilaufgabe besteht in der Detektion der Problematik. Welche Messungen sind nötig um Vereisung oder Vereisungsbedingungen sicher zu erkennen und darauf reagieren zu können. Die letzte Teilaufgabe beinhaltet den Aufbau des Prototyps mit Bau und Anschaffung der nötigen Elektronik und die Programmierung der nötigen Software.

4 Eisverhinderung

Systeme zur Enteisung von Rotorblättern lassen sich in zwei Arten unterteilen. Die eine heisst anti-icing. Dies sind Systeme, die das Rotorblatt durchgehend eisfrei halten. Das benötigt in vielen Fällen einen hohen Energieaufwand. Die Alternative heisst de-icing. Dabei bildet sich Eis über eine definierte Zeit. Anschliessend löst das System das Eis vom Rotor und die Fliehkraft schleudert es weg. So kann ein erheblicher Teil der nötigen Energie eingespart werden[2]. Ein Nachteil dabei ist, dass das gebildete Eis bereits Einflüsse auf das Flugverhalten haben kann. Dazu kommt die Gefahr von Beschädigung am Flugobjekt durch abgelöste Eisstücke.

4.1 Oberflächenstruktur

Ein Ansatz ist, den Rotor mit einer Oberflächenstruktur zu fertigen, welche kein Ansetzen von Eis zulässt. Bis heute gibt es jedoch keine Oberfläche, die diese Anforderung erfüllt. Die Vereisung lässt sich durch Oberflächenstrukturen vermindern, jedoch nicht ganz ausschliessen. Weiter haben die Strukturen kurze Lebensdauern und sind schwer zu überprüfen.[3]

4.2 Mechanische Eisablösung

Eine Methode, die bei kleineren Flugzeugen im Einsatz ist, löst das Eis durch mechanische Verformung. Luftdruck bläht an der Flügelvorderkante angebrachte Luftkissen auf und sprengt so das Eis weg. Die Methode beinhaltet zwei wesentliche Schwierigkeiten. Zum einen müsste die Verformung genau im richtigen Moment erfolgen. Es muss sich bereits Eis gebildet haben, dieses darf aber die Flugfähigkeit der Drohne nur minimal beeinflussen. Weiter sind die nötigen Konstruktionen für eine solche Vorrichtung an einem drehenden Rotor sehr aufwändig.[4]

4.3 Elektrische Beheizung

Die in der Aviatik etablierten Systeme basieren auf elektrischem Beheizen. So lässt sich de- und anti-icing umsetzen. Beim Superpuma, ein Hubschrauber welche die Schweizer Armee einsetzt, sind die Rotoren mit Heizwiderständen ausgerüstet. Der Hauptrotor ist mit einem elektrischen de-icing-System ausgestattet. Der Heckrotor verfügt jedoch über ein elektrisches anti-icing System, um Schäden durch gelöste Eisstücke am Hauptrotor oder am Rumpf des Hubschraubers zu vermeiden.[2]

4.3.1 CNT-Farbe

Carbon Nanotube (CNT) sind leitfähige Fasern aus Kohlenstoff mit Durchmessern im Nanometerbereich. In Lacken und Kunststoffen gelöst führen sie zu elektrischer Leitfähigkeit. Die Fraunhofer-Gesellschaft bietet CNT Material in Form einer wasserbasierten Dispersion als Farbe oder Lack an. Die Farbe erzeugt eine homogene Erwärmung auf der aufgetragenen Fläche nach Anlegen von elektrischer Spannung[5]. Über die Abriebfestigkeit der Dispersion gibt die Fraunhofer-Gesellschaft keine Auskunft. Eine Verarbeitung am Rotorblatt scheint ungünstig. An der Oberfläche aufgetragen sind die mechanischen Ansprüche zu hoch für einen langlebigen Betrieb. Eine Einarbeitung in Schichten des Rotorblatts ist schwierig zu realisieren.

4.3.2 Textile Heizelemente

Die Forster Rohner AG stellt textile Heizelemente her[6]. Mit maximal $0.1 \frac{W}{cm^2}$ [6] ist die Leistung für eine Enteisung viel zu gering. Das Verfahren zur Einarbeitung von Heizelementen in Stoffe könnte jedoch gegebenenfalls auch zur Einarbeitung in die Karbonlagen des Rotorblattes als Grundlage dienen. Der technische Partner von Forster Rohner, die Firma Interactive Wear, gibt keine Auskunft über Herstellungsverfahren.

4.4 Beheizen durch Abwärme

Eine Möglichkeit besteht darin, die Abwärme des Hauptmotors direkt zum Beheizen des Rotors zu verwenden. Bei einigen Flugzeugen eingesetzte Methoden, bedienen sich genau dieses Konzepts. Dabei ist im Flügel des Flugzeuges eine Leitung integriert. Die Abgase entfliehen durch diese Leitung und erwärmen so den Flügel[7]. Da die Motoranlage beim Hauptteil der Drohne liegt und eine Zufuhr zum Heckrotor viel Entwicklungsarbeit erfordert, wird das Verfahren hier nicht weiter behandelt. Es sei aber als Idee für den Hauptrotor erwähnt.

5 Detektion

Die Erkennung von Eis ist ein weitgehendes Problem. Interesse an der Problematik haben vorwiegend die Sparten Windenergieanlagen und in der Luftfahrt sowohl Helikopter- und Flugzeugverkehr. Die meisten verfügbaren Informationen und Messdaten stammen von Windenergieanlagen. Für die Ermittlung potenzieller Vereisungsbedingungen sind die Daten aber nur bedingt hilfreich. Vereisungsbedingungen sind im Flug anders als am Boden. Windenergiewerke stellen oft den Betrieb bei Vereisung ein und sind daher eher an vorhandenem Eis interessiert. Die verfügbaren Messdaten beziehen sich mehrheitlich auf die Verlässlichkeit von Eisdetektion und weniger auf Umgebungsbedingungen, die eine Eisbildung begünstigen.

Vereisung entsteht hauptsächlich durch unterkühlte Wasser Tröpfchen in der Luft. Diese Tröpfchen haben eine Temperatur von weniger als 0°C. Mangels Kristallisationsansatz sind sie jedoch auch unter dem Gefrierpunkt in flüssigem Zustand[8]. Sobald sie auf den Rotor auftreffen, gefrieren sie augenblicklich. Die Oberflächentemperatur des Rotors muss dazu unter dem Gefrierpunkt liegen.[9]

5.1 Sensoren zur Eisdetektion

Bemannte Hubschrauber, welche mit einem Enteisungssystem ausgerüstet sind, verfügen im Normalfall einen Eissensor am Rumpf. Laut Angaben eines Piloten der Schweizer Armee, erkennt er jedoch Vereisung bereit bevor der Sensor reagiert. Hinweise sind Eisbildung an den Scheibenwischern und unruhiges Verhalten der Maschine. Daraus lässt sich schliessen, dass eine Messung am Rumpf zur Beurteilung des Rotors nicht ideal ist. Die Sensoren zur Eisdetektion arbeiten auf unterschiedlichste Art und Weise. Ein System welches bei Windenergieanlagen verwendet wird, misst die Impedanz an der Oberfläche und ermittelt daraus eine Stufe für die Eisdicke. Mittels Funksignal sendet der Sensor die Daten zu einer Station. Über kleine Solarmodule gewinnt er die zum Messen nötige Energie und arbeitet somit kabellos[10]. Durch eine Einarbeitung eines solchen Sensors in das Rotorblatt liessen sich womöglich bessere Messresultate als mit Sensoren am Rumpf erzielen. Diverse weitere Messsysteme zur Eisdetektion sind in der Arbeit von Mindermann[9] aufgeführt.

5.2 Detektion von Vereisungsbedingungen

Ein anderer Ansatz ist das Messen von Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Daraus lässt sich gegebenenfalls abschätzen, ob eine Vereisung möglich ist oder nicht. Die Firma Airborne Innovations bietet einen Sensor an, der genau eine solche Prognose abgibt. Er misst Luftfeuchtigkeit und –temperatur und ermittelt durch einen Algorithmus, ob eine Vereisung möglich ist oder nicht. Mittels RS-232-Schnittstelle gibt er eine Rotorblatt-Vereisungswarnung, eine Vergaser-Vereisungswarnung und die rohen Messwerte aus. Der Sensor wurde in einer Doktorarbeit für den Einsatz bei unbemannten Flugobjekten entwickelt. Der Sensor verfügt jedoch über keine Zertifizierung. Anfragen zur Erhältlichkeit sind unbeantwortet.[10]

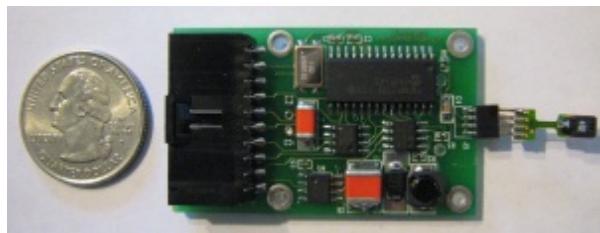


Abbildung 1 – Sensor zur Detektion von Vereisungsbedingungen von Airborne Innovations[10]

Angaben zur Vereisungsgefahr in Abhängigkeit der Lufttemperatur hat Mindermann in seiner Arbeit festgehalten. Unter -40°C tritt Wasser ausschliesslich in fester Form auf. Die Hälfte aller Vereisungen treten zwischen -12°C und -8°C auf.[9]

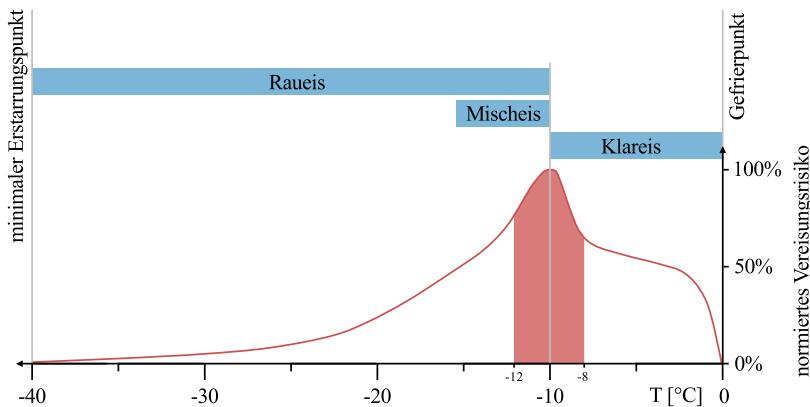


Abbildung 2 – Temperaturabhängiges auf das Maximum normiertes Risiko einer Flugzeugvereisung (rot), übliche Erscheinungsbereiche verschiedener Eisarten (blau)[9]

6 Energieübertragung

Ein Problem, das vorwiegend bei elektrischer Beheizung des Rotors besteht, ist die Energieübertragung auf den Rotor. Der Super Puma versorgt über einen mehrkontakteigen Schleifring sieben verschiedene Heizsegmente pro Rotor mit Energie[2]. Der Anspruch an die Schleifkontakte ist aber gross. Der Hauptrotor dreht mit $268 \frac{1}{min}$ [11] und es wird eine Leistung von 23kW[2] übertragen. Eine alternative Möglichkeit zur Übertragung besteht durch Induktive Drahtlosübertragung. Eine Spule am Rumpf erzeugt ein Magnetfeld, welches in eine Spule, die am Rotor mit dreht, einen Strom induziert. Solch ein System bedingt hohen Entwicklungsaufwand. Eine mehrkanalige Übertragung ist schwierig zu realisieren.

II Beschrieb der Komponenten

7 Konzept zur Beheizung

Eine in den Rotor eingearbeitete Metallform dient als Heizwiderstand. Ein Wasserstrahlschneider ermöglicht die genügend präzise Bearbeitung eines Chromstahlblechs zur Fertigung eines Musters mit der nötigen Fläche und einem definierten ohmschen Widerstand. Das Muster liegt zwischen den Karbonlagen des Rotorblatts. Daher muss es elektrisch isoliert sein. Die Details zur Herstellung hat Romeo Bee in seiner Arbeit aufgeführt. Für Tests wird ein Heckrotorblatt mit solch einem Heizelement gefertigt. Zusammen mit dem Prototyp kann dann sowohl anti- und de-icing erprobt werden.

8 Prototyp

Der Prototyp übernimmt Funktionen zum Ausprobieren, zum Messen und zum Aufzeichnen. Kernstück ist das Tiny K22 Entwicklungsbord. Es ist eine Eigenentwicklung der Hochschule Luzern und verfügt über einen NXP K22FN512 ARM Cortex-M4F Mikrocontroller. Mit einem onboard debugger, dem bestückbaren SD-Kartenhalter und der kleinen Baugrösse, deckt es alle Ansprüche.[12]

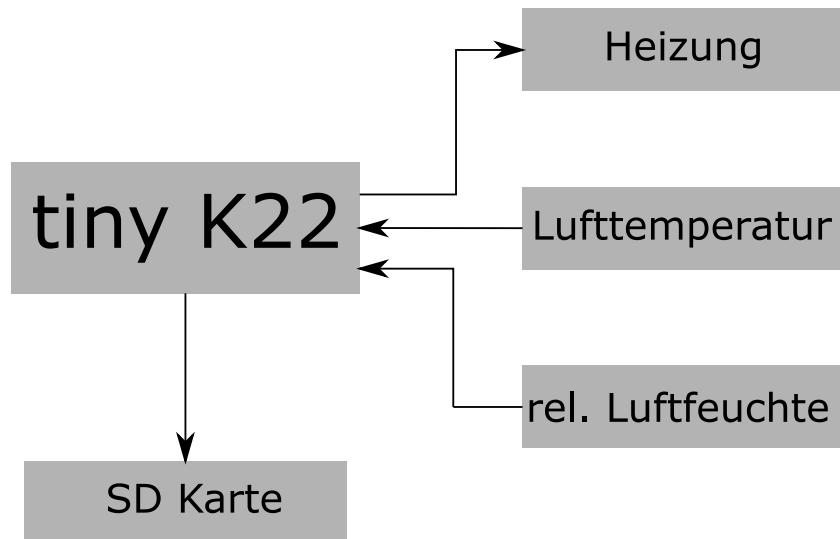


Abbildung 3 – Übersicht der Komponenten des Prototyps

Ein SHT71 Sensor misst die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. Über ein I^2C ähnliches Übertragungsprotokoll fragt das TinyK22 die Werte separat ab. Der Controller übernimmt die Umrechnung der Messwert in angenäherte relative Luftfeuchtigkeit (8.1) und in Temperatur (8.2). Die Temperaturkompensation (8.3) der relativen Luftfeuchtigkeit ist **nicht** implementiert.

$$RH_{linear} = -2.0468 + 0.0367 * SO_{RH} - 1.5955e - 6 * SO_{RH}^2 \quad (8.1)$$

Berechnung der angenäherten relativen Luftfeuchtigkeit[13]

$$T = -39.7 + 0.01 * SO_T \quad (8.2)$$

Berechnung der Lufttemperatur[13]

$$RH_{true} = (T - 25) * (0.01 + 8e - 5 * SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (8.3)$$

Temperaturkompensation der relativen Luftfeuchtigkeit(**nicht implementiert**)[13]

RH_{linear}	angenäherte relative Luftfeuchtigkeit	%
SO_{RH}	Rohmesswert der relativen Luftfeuchtigkeit	
T	Lufttemperatur	°C
SO_T	Rohmesswert der Lufttemperatur	
RH_{true}	Temperaturkompensation der relativen Luftfeuchtigkeit	%

Tabelle 1 – Zeichenerklärung zu den Messwertberechnungen

8.1 Leistungsendstufe

Zur Ansteuerung eines elektrischen Heizelements dient die Leistungsendstufe. Sie besteht aus einem N-Kanal MOSFET und dessen Beschaltung. Sie ermöglicht die Ansteuerung einer Heizung mit bis zu 60V und 12A durch den PWM Ausgang vom TinyK22. Auf die Serienschaltung einer Induktivität zum Glätten des Stroms durch die Heizung wurde bis jetzt verzichtet. Die getesteten Heizkörper verfügen über genügend Trägheit. Je nach Heizelement könnte dies aber nötig sein.

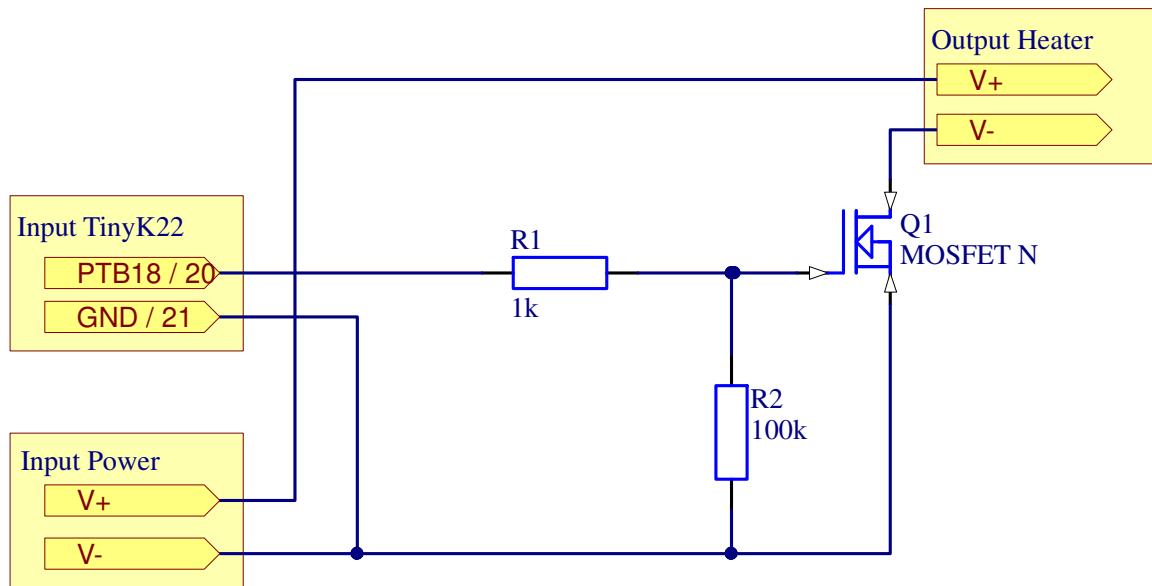


Abbildung 4 – Schalschema der Leistungsendstufe

8.2 Software

Mit einem FreeRTOS Echtzeitbetriebssystem laufen 4 Funktionen auf dem Controller. Das Programm führt die Aktionen in insgesamt 7 Tasks aus. Die Grundlage für das Projekt bieten die Beispielprojekte tinyK22Demo[14] und tinyK20DataLogger[15] von Erich Styger. Das Bild zeigt die zentralen Prozesse, die das Betriebssystem ausführt. Die Schlüssel symbolisieren mit Mutexen geschützte Daten für prozessübergreifende Zugriffe.

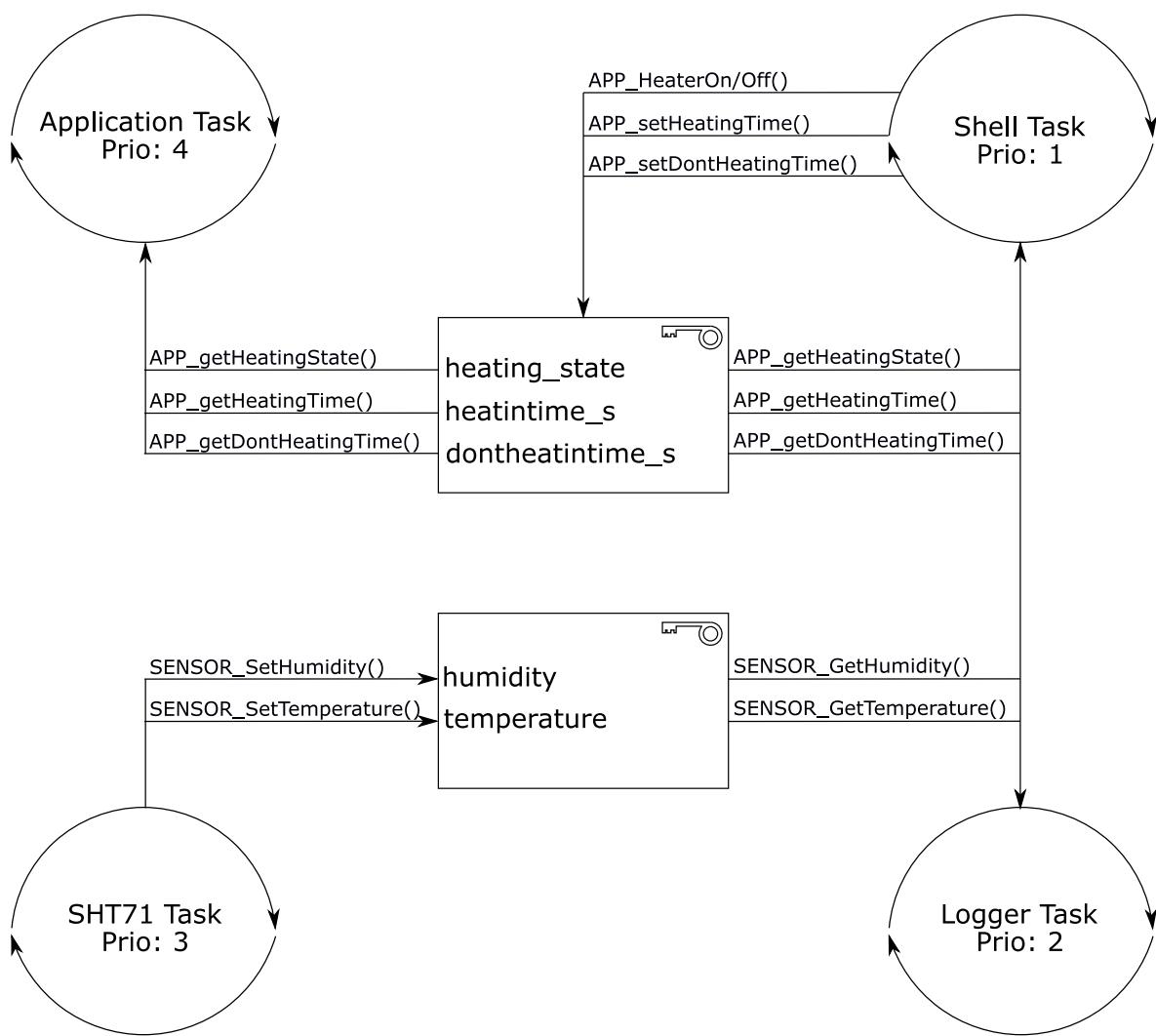


Abbildung 5 – Übersicht der wichtigsten Tasks und der übergreifenden Ressourcen

Die Hauptaufgabe ist im Application-Task realisiert und dient zur Ansteuerung eines elektrischen Heizelements. Dabei lassen sich die aktive, die inaktive Zeit für ein de-icing und das PWM-duty cycle der Heizansteuerung zur Laufzeit verstellen. Zusätzlich ermöglicht der Task die Ein- und Ausschaltung der Heizung zur Laufzeit.

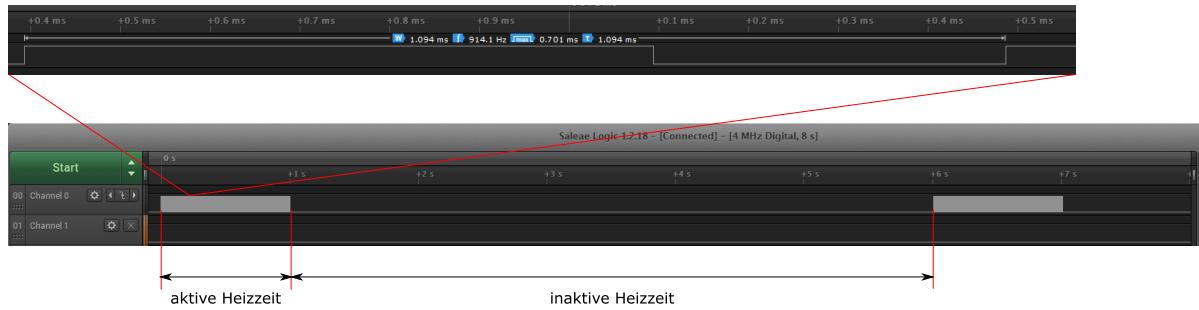


Abbildung 6 – Logic Analyser Aufnahme vom Ausgang zur Heizungsansteuerung

Eine zentrale Einheit im Code bildet das Sensor.c File. Es verwaltet die Daten der Sensoren und schützt diese gegen Mehrfachzugriffe von verschiedenen Tasks. Der SHT71 Task schreibt beispielsweise im Sekudentakt die Messwerte für Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in durch Mutexen geschützten Variablen im Sensor.c File. Der Logger Task ist für die Aufzeichnung der Werte zuständig. Mit 1 Hz schreibt er die Messwerte auf eine SD-Karte in das "LOG.TXT" Dokument. Der Zeitstempel zu den Messwerten startet bei 17:51:31 und muss manuell synchronisiert werden. Zur Ansteuerung der ganzen Applikation dient der Shell Task. Er realisiert eine Kommando Parser der über eine serielle Schnittstelle angesteuert wird. Die Baudrate der Übertragung beträgt 384000. Einige wichtige Befehle sind hier aufgeführt:

CMD> FAT32 print LOG.TXT	Druckt das momentane Logfile aus
CMD> TmDt1 time 00:00:00	Setzt die Systemzeit auf 00:00:00 Uhr
CMD> Sensor status	Gibt die aktuellen Messwerte aus.
CMD> APP set PWM 700	Setzt das PWM auf 700 Promille Duty Cycle
CMD> APP set on time 3	Setzt die Heizzeit pro Periode auf 3 Sekunden
CMD> APP set heater on	Schaltet die Heizung ein

Tabelle 2 – Übersicht der wichtigsten Shell Kommandos

9 Heckrotorprüfstand

Der Prüfstand ist nicht Resultat dieser Arbeit. Es erfolgen lediglich Anpassungen daran. Die Aeroscout stellt ihn für Versuche zur Verfügung. Die detaillierte Beschreibung soll zukünftige Versuche vereinfachen und Einarbeitungszeiten verkürzen. Der Prüfstand besteht aus einer Halterung, einem bürstenlosen DC-Motor aus der Modellflugbranche und einem Regler zur Ansteuerung. Der Regler benötigt eine Speisung von 25V DC und verträgt einen Strom von maximal 100A. Sowohl der Regler als auch der Motor sind mit einem Lüfter bestückt. Um die Drehzahl zu detektieren ist ein induktiver Näherungsschalter verbaut und mit einem Tensy 3.2 Entwicklungsboard ausgewertet. Über eine serielle Schnittstelle gibt das Teensy die Drehzahl auf ein Terminal aus. Ein Servo-Tester stellt die Geschwindigkeit am Regler ein. Der Anstellwinkel der Rotorblätter lässt sich mechanisch an der Spindel verschieben. Während dem Betrieb ist er starr.

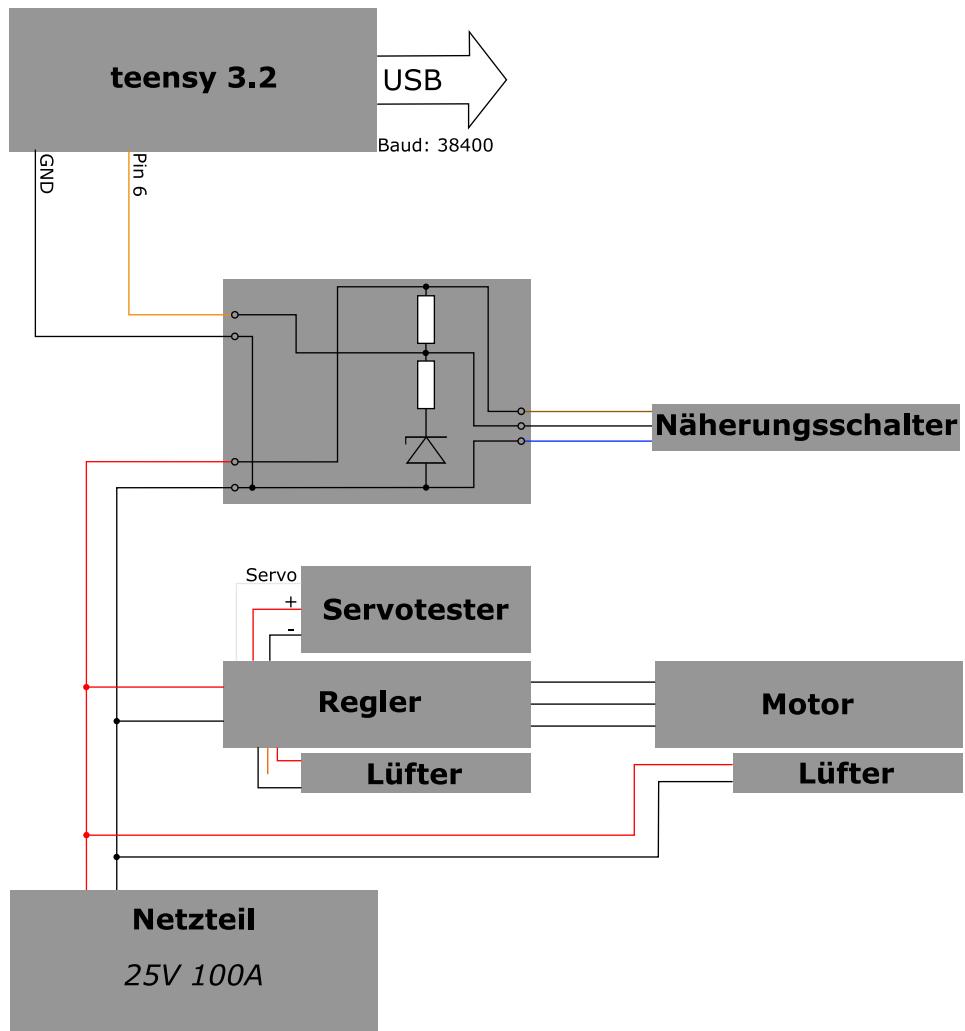


Abbildung 7 – Übersicht und Verdrahtung der elektrischen Komponenten des Heckrotorprüfstands

Der induktive Näherungsschalter ist so montiert, dass er bei jeder Umdrehung einmal ein und einmal aus schaltet. Das Teensy Board misst jeweils die Zeit zwischen zwei Flanken. Aus jeweils 5 Werten bildet es das arithmetische Mittel. Mit 2Hz druckt das Board die daraus berechnete Drehzahl auf die Konsole aus.

Für Versuch mit einem beheizten Rotorblatt ist der Prüfstand mit einem zweikontaktigen Schleifring ausgerüstet.

III Versuche

10 Versuch zur Ermittlung der thermischen Energie

Eine erste Versuchsrunde soll die nötige Energie zum Lösen von Eis zeigen. Mit einem Heizdraht versehene Proben entsprechen dem Aufbau eines Rotorblatts. Aufgefrorene Stoffstücke sollen die Eisschicht imitieren. Gewicht, das an den Stoffstücken hängt, simuliert die Fliehkraft, die am Rotor auf das Eis wirkt. Die Zeit bis sich der Stoff von der Probe löst soll zeigen welche Leistung pro Quadratzentimeter sinnvoll ist. Die Resultate der Proben mit Metalloberfläche sind nicht repräsentativ. Es kann kein Trend zur Ablösezeit in Abhängigkeit der Leistung abgeleitet werden. Die Verbindung des Stoffs zur Oberfläche ist von Versuch zu Versuch anders. Etwas besser sieht es bei der Probe mit Karbooberfläche aus. Auch deren Ablösezeit ist durch die Qualität der Eisverbindung beeinflusst. Es lässt sich aber ein klareren Trend interpretieren.

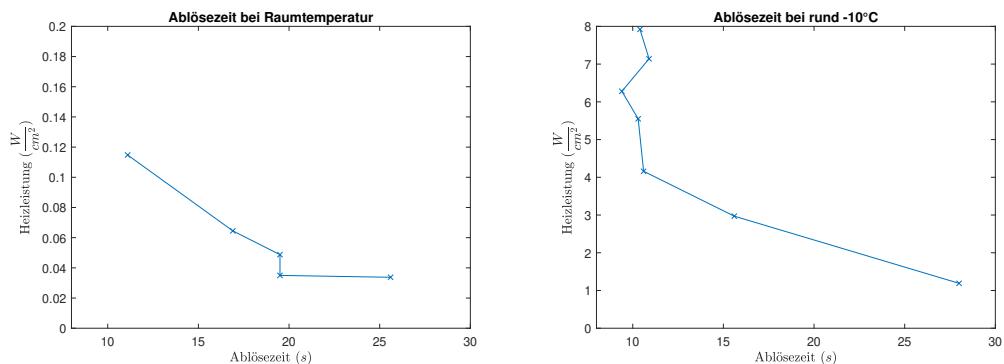


Abbildung 8 – Ablösezeit in Abhängigkeit der Heizleistung bei Raumtemperatur und in der Klimakammer mit der Probe mit Karbooberfläche

Darauf lässt sich eine grobe Abschätzung zur nötigen Energie machen. Ab $4 \frac{W}{cm^2}$ in der Klimakammer sinkt die Ablösezeit nicht mehr markant. Aufgerechnet auf die ermittelten Vereisungszonen am Heckrotor (11.2) ergibt sich daraus eine Leistung von 912W (10.1)

$$P_{\text{Heckrotor}} = (60cm * 1.2cm + 60cm * 2.6cm) * 4 \frac{W}{cm^2} = 912W \quad (10.1)$$

Abschätzung zur nötigen Leistung am Heckrotor

11 Versuch zur Eisbildung

11.1 Versuchsaufbau

In der Klimakammer soll durch Besprühen mit Wasser Eis am drehenden Rotor ansetzen. Bei -10°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit im Bereich von rund 80% dreht der Rotor mit rund $5000 \frac{1}{\text{min}}$. Eine Düse zerstäubt Wasser zu Nebel. Der Datenlogger zeichnet die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur nahe dem Rotor auf. Eine Kamera zeichnet das Rotorblatt auf. Zusätzliche Eindrücke gibt eine Wärmebildkamera.

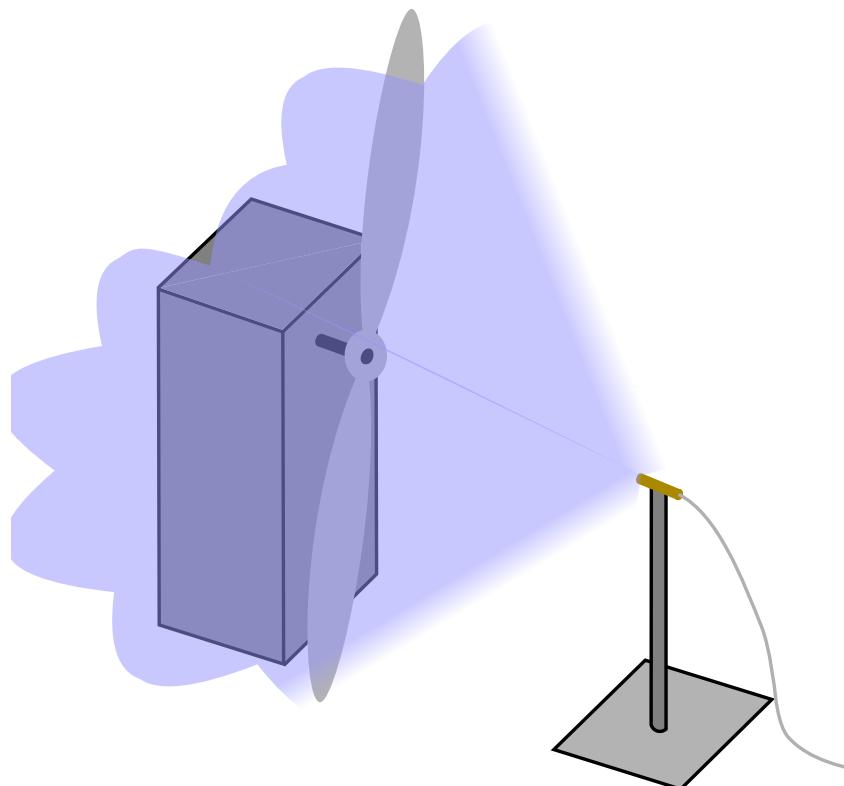


Abbildung 9 – Darstellung des Versuchsaufbau zur Rotorblattvereisung

11.2 Resultat

Auf den Bildern der optischen Kamera lässt sich lediglich das Einsetzen des Nebels erkennen. Der Rotor dreht zu schnell und ist auf den Bildern verschwommen. Auf den Bildern der Wärmebildkamera ist mangels Kontrast auch nichts zu erkennen. Eine HighSpeed Kamera würde die Auswertung zukünftiger Versuche begünstigen. Die Eisbildung erfolgt unmittelbar nach dem Einschalten des Wasserszerstäubers. Die Stromversorgung des Rotorantriebs läuft augenblicklich in die Strombegrenzung und die Drehzahl fällt auf rund $4000 \frac{1}{min}$.

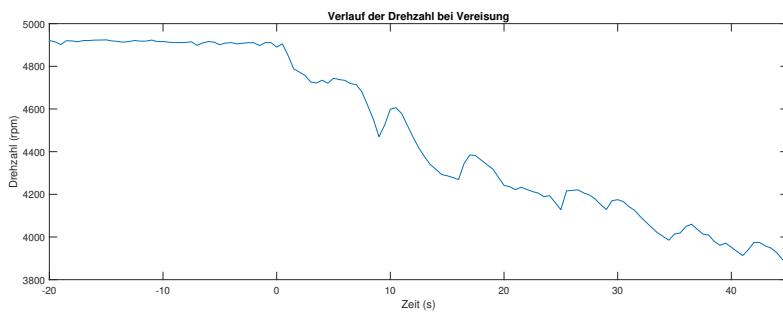


Abbildung 10 – Verlauf der Drehzahl mit Einsetzen der Vereisung bei 0s

Das Eis setzt fast ausschliesslich an der Vorderkante in Drehrichtung an. Auf der Vorderseite (in Richtung Düse) ist die Eisschicht bis ca. 12mm von der Kante nach hinten. Auf der Hinterseite (von der Düse abgewandt) ragt die Eisschicht bis 26mm von der Kante weg.

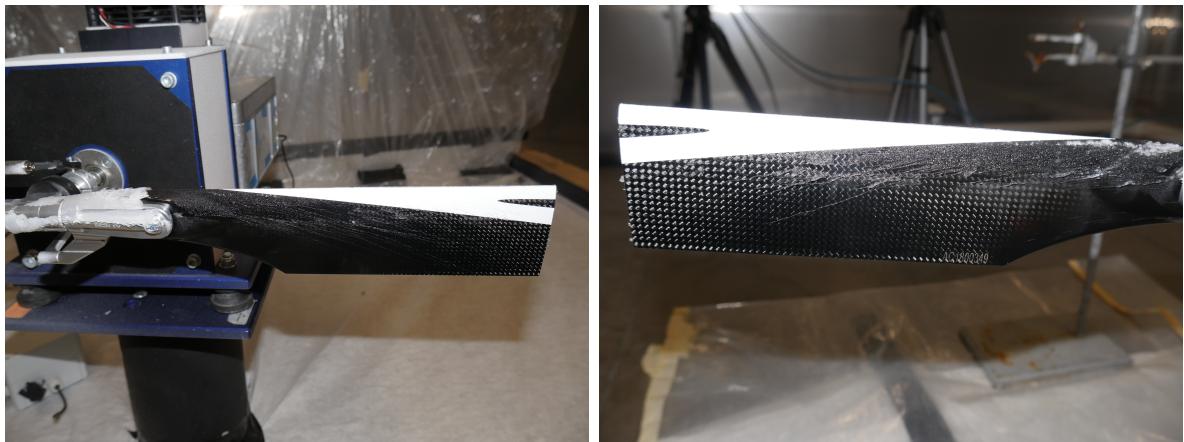


Abbildung 11 – Vereisung des Rotorblatts Vorderseite(l) und Rückseite(r)

Der SHT71 Sensor detektiert die Einschaltzeitpunkt des Zerstäubers auch nach dem er mit einer Eisschicht überzogen ist. Im ersten Verlauf(12) sind zwei Einschaltungen zu sehen.

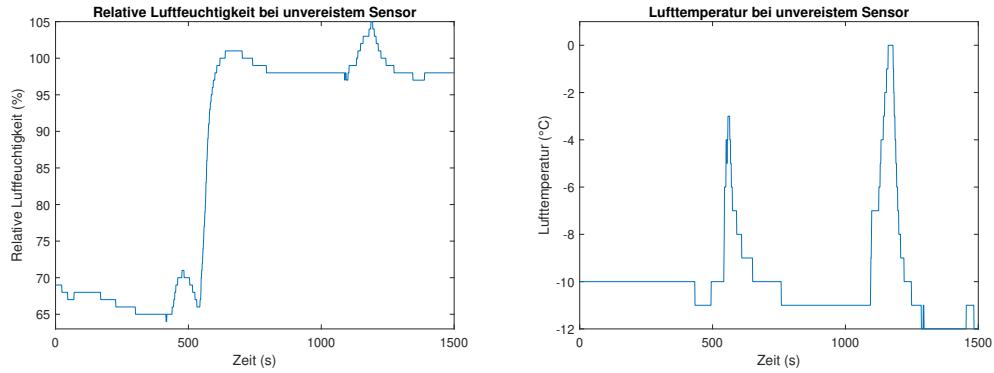


Abbildung 12 – Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit(l) und der Lufttemperatur(r) bei zu Beginn unvereistem Sensor

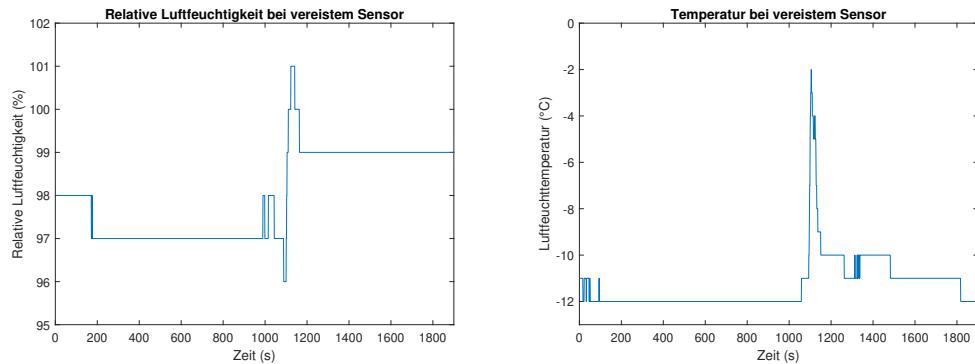


Abbildung 13 – Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit(l) und der Lufttemperatur(r) bei vereistem Sensor

In beiden Fällen ist das einsetzen des Wassernebel an der Temperatur gut zu erkennen. Da das Wasser in der Luft wärmer ist als die Umgebung steigt die gemessene Temperatur. Die relative Feuchte ist zwar nach der Vereisung des Sensors bereits auf 97%, springt jedoch nach der Einschaltung auf über 100%.

12 Ausstehender Versuch

Mangels Zeit bleibt ein Versuch zur Enteisung ausstehend. Rotorblätter mit integrierter Heizung konnten nicht vor Ende der Arbeit fertig gestellt werden. Mit den Erkenntnissen aus den beiden genannten Versuchen müsste nun der Vereisungsversuch (siehe 11) mit im Rotor integriert Heizung durchgeführt werden. Das Ziel dabei ist, optimale Werte für das PWM duty cycle, die aktive- und die inaktive Zeit der Heizung für ein de-icing zu ermitteln. Die Spannung an der Leistungsendstufe lässt sich dabei direkt an die 25V Versorgung des Prüfstands koppeln. Eine Aufzeichnung der Motorenleistung könnte direkten Aufschluss geben, wie erfolgreich die Enteisung ist.

IV Schlussteil

13 Fazit

Das Ziel der Arbeit, die Funktion einer Enteisungsvorrichtung demonstrieren zu können, wurde nicht erfüllt. Die Zeit reichte nicht, um nach der Erarbeitung der Grundlagen ein Rotorblatt zu fertigen. Die Organisation von Infrastruktur wie der Klimakammer und die Bereitstellung des Prüfstands hat die Arbeit verzögert. Der Prozess zum Herstellen eines Rotorblatts dauert relativ lange, da hierfür zuerst die spezifischen Werkzeuge für die Rotorblattform hergestellt werden müssen. Die Resultate bieten trotzdem eine gute Grundlage für eine Weiterarbeit. Die nötige Leistung für eine Enteisung durch Beheizen konnte grob abgeschätzt werden. Es zeigte sich, dass Eis relativ einfach künstlich erzeugt werden kann, was kommende Versuche mit einem beheizten Rotorblatt begünstigt. Der Prototyp ist bis auf das Heizelement Funktionsfähig und kann relevante Umgebungsparameter zuverlässig aufzeichnen. Er bietet eine solide Grundlage für zukünftige Tests und ein endgültiges Enteisungssystem.

Literatur

- [1] Aeroscout GmbH. Aeroscout - unmanned aircraft technology. <https://www.aeroscout.ch/>. Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.
- [2] Schweizer Armee. Schulungsunterlagen zur Enteisungsvorrichtung des Super Puma, 2005.
- [3] Fraunhofer IPA. Anti-eis-beschichtungen. <https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/kompetenzen/grenzflaechentechnik/plasmaverfahren/anti-eis-beschichtungen.html>, . Online; zugegriffen 15. Dezember 2018.
- [4] Aeronautics Guide. Aircraft wing and stabilizer deicing systems. <https://okigihan.blogspot.com/2017/05/wing-and-stabilizer-deicing-systems.html>, . Online; zugegriffen 15. Dezember 2018.
- [5] Fraunhofer IPA. Cnt-flächenheizung. https://www.elektronomobilitaet.fraunhofer.de/de/bauweisen_infrastruktur/cnt_flaechenheizung.html, . Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.
- [6] Forster Rohner AG. Textile flÄchenheizstrukturen – sicher, flexibel, leistungsstark. <http://www.frti.ch/technologie/>, . Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.
- [7] Aeronautics Guide. Wing anti-ice (wai) system. <https://okigihan.blogspot.com/2017/05/wing-and-horizontal-and-vertical.html#more>, . Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.
- [8] Wikipedia. Unterkühlung (thermodynamik). [https://de.wikipedia.org/wiki/Unterk%C3%BChlung_\(Thermodynamik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Unterk%C3%BChlung_(Thermodynamik)). Online; zugriff 19 Dezember 2018.
- [9] Pascal Mindermann. Detektion von atmosphärischem eis aufgrund der veränderung des wärmewiderstandes, 2014.
- [10] Airborne Innovations. Aircraft icing warning sensor. <https://www.airborneinnovations.com/ai/products/icewarning/>. Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.

- [11] Swiss Helicopter AG. Super puma as 332 c1. <https://www.swisshelicopter.ch/de/ueber-uns/flotte/super-puma-as-332-c1>, . Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.
- [12] Erich Styger. First tinyk22 board with nxp k22fn512 arm cortex-m4f. <https://mcuoneclipse.com/2017/12/08/first-tinyk22-board-with-nxp-k22fn512-arm-cortex-m4f/>, . Online; zugegriffen 12. Dezember 2018.
- [13] *Datasheet SHT7x*. Sensirion AG. Online; zugriff 15 Dezember 2018.
- [14] Erich Styger. tinyk22 demo. https://github.com/ErichStyger/mcuoneclipse/tree/master/Examples/KDS/tinyK22/tinyK22_Demo, . Online; zugriff 12. Dezember 2018.
- [15] Erich Styger. tinyk20 datalogger. https://github.com/ErichStyger/mcuoneclipse/tree/master/Examples/KDS/tinyK20/tinyK20_DataLogger, . Online; zugriff 12. Dezember 2018.
- [16] eologix sensor technology gmbh. Eologix sensor system. <https://eologix.com/de/product-ln/>. Online; zugegriffen 09. Dezember 2018.

Abbildungsverzeichnis

1	Sensor zur Detektion von Vereisungsbedingungen von Airborne Innovations[10]	12
2	Temperaturabhängiges auf das Maximum normiertes Risiko einer Flugzeugvereisung (rot), übliche Erscheinungsbereiche verschiedener Eisarten (blau)[9]	12
3	Übersicht der Komponenten des Prototyps	14
4	Schaltschema der Leistungsendstufe	16
5	Übersicht der wichtigsten Tasks und der übergreifenden Ressourcen	17
6	Logic Analyser Aufnahme vom Ausgang zur Heizungsansteuerung	18
7	Übersicht und Verdrahtung der elektrischen Komponenten des Heckrotorprüfstands	20
8	Ablösezeit in Abhängigkeit der Heizleistung bei Raumtemperatur und in der Klimakammer mit der Probe mit Karbooberfläche	21
9	Darstellung des Versuchsaufbau zur Rotorblattvereisung	22
10	Verlauf der Drehzahl mit Einsetzen der Vereisung bei 0s	23
11	Vereisung des Rotorblatts Vorderseite(l) und Rückseite(r)	23
12	Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit(l) und der Lufttemperatur(r) bei zu Beginn unvereistem Sensor	24
13	Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit(l) und der Lufttemperatur(r) bei vereistem Sensor	24

Tabellenverzeichnis

1	Zeichenerklärung zu den Messwertberechnungen	15
2	Übersicht der wichtigsten Shell Kommandos	18

V Anhang