

Interner Bericht

DLR-IB-FT-BS-2022-199

TICS-Tip Clearance Sensor, Entwicklung eines Sensors zur Erfassung des Blattspitzenabstands bei Koaxialhubschraubern

Bachelorarbeit

Peter Scheuermann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institutsbericht
DLR-IB-FT-BS-2022-199

TICS-Tip Clearance Sensor, Entwicklung eines Sensors zur Erfassung des Blattspitzenabstands bei Koaxialhubschraubern

Peter Scheuermann

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

76 Seiten
26 Abbildungen
9 Tabellen
10 Referenzen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abteilung Hubschrauber

Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

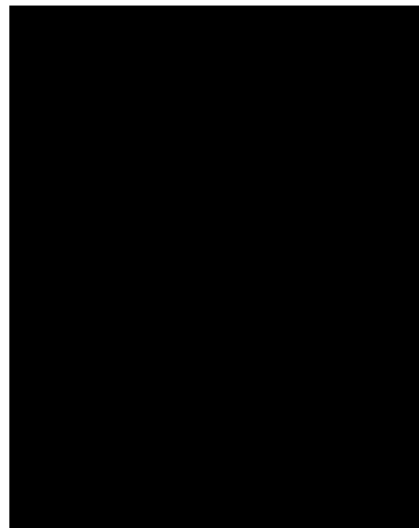
Braunschweig, den 01.02.2022

Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag

Abteilungsleitung: Dr. Klausdieter Pahlke

Betreuer:in: Oliver Schneider

Verfasser:in: Peter Scheuermann



Bachelorarbeit

TICS-Tip Clearance Sensor

Entwicklung eines Sensors zur Erfassung des
Blattspitzenabstands bei
Koaxialhubschraubern

Bachelorarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“

an der Hochschule Esslingen

Fakultät Mobilität und Technik

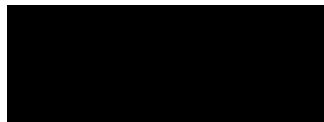
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Flugtechnisches Institut

Braunschweig

vorgelegt von

Peter Scheuermann



Prüfer und Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Hugo Gabele (Hochschule Esslingen)

Herr Oliver Schneider (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Bearbeitungszeitraum

01 September 2021 – 31 Januar 2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

 _____

Braunschweig, 01. Februar 2022

Sperrvermerk

Die vorliegende Bachelorarbeit beinhaltet vertrauliche und interne Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt.

Die Einsicht in dieses ist Unbefugten nicht gestattet. Ausgenommen hiervon sind die Gutachter, Betreuer sowie die Mitglieder des Prüfungsausschusses. Die Vervielfältigung und Veröffentlichung dieser Arbeit – auch Teilweise- ist grundsätzlich nicht erlaubt.

Eine Ausnahme von dieser Regelung bedarf einer Zustimmung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt.

Zusammenfassung

Hubschrauber gehören mit zu den komplexesten Fluggeräten. Sie verhalten sich im Vergleich zu einem Flächenflugzeug instabil, tendieren also immer dazu, in eine Richtung wegzukippen. Es gibt sie in vielen verschiedenen Bauformen. Neben den klassischen Hubschraubern mit einem Haupt- und einem Heckrotor gibt es auch Systeme, die mit zwei Rotoren arbeiten. Auch hier gibt es verschiedenen Bauformen, z.B. die ineinander kämmenden oder coaxial angeordnete Rotoren. Ein Rotorsystem der letzteren Art wird in dieser Arbeit behandelt. Dabei sind zwei Rotoren übereinander angeordnet. Diese drehen zwecks Ausgleichs des Drehmoments gegensinnig zueinander, was einen Heckrotor überflüssig macht. Da beide Rotoren jeweils ein zentrales Schlaggelenk aufweisen und sich die einzelnen Rotorblätter zudem elastisch verformen können, ist es möglich, dass sich in bestimmten Flugsituationen die Blattspitzen des oberen und des unteren Rotors nahekomen. Um eine Kollision zu vermeiden, müssen die Rotoren mit einem entsprechend großen Abstand zueinander angeordnet werden. Zudem gibt es aktuell keine Möglichkeit, den Blattspitzenabstand im Betrieb zu erfassen und ihn dem Piloten im Cockpit anzuzeigen. Das hat zur Folge, dass der Pilot die Maschine nicht in ihren Grenzbereiche fliegen kann.

Um den Blattspitzenabstand erfassen zu können und somit die Sicherheit im Flugbetrieb zu erhöhen, soll ein Sensor entwickelt werden, welcher die Unterschreitung eines Mindestabstands der Blattspitzen dem Piloten meldet. Neben der dadurch erhöhten Sicherheit kann auch eine Verringerung des konstruktiven Abstands in Betracht gezogen werden.

Ein solcher Sensor ist zurzeit nicht auf dem Markt verfügbar. Vom DLR wurde ein Patent für ein entsprechendes Sensorprinzip auf Basis von Induktionsspannungen in einer Spule angemeldet und eingetragen [1]. Im Rahmen dieser Arbeit soll nun mit Hilfe von Simulationen, Berechnungen und Messungen zuerst die Machbarkeit eines solchen Sensors geprüft und bei Erfolg dieser entwickelt werden.

Zu Beginn wird der Verlauf einer induzierten Spannung simuliert. Es wird versucht, diesen mit den Messwerten eines im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Prüfstands in Einklang zu bringen. Es finden Messungen statt, um verschiedene Parameter und deren Einfluss auf die Induktionsspannung darstellen und bestimmen zu können. Nach Auswertung der Messdaten des Prüfstands können alle untersuchten Parameter auf Originalmaßstab skaliert und im relevanten Einsatzbereich beschrieben werden. Die Machbarkeit des Sensorprinzips konnte nachgewiesen werden. Eine einfache Form des Abstandssensors ist bereits experimentell einsetzbar.

Vorwort

Die vorliegende Bachelorarbeit trägt den Titel **TICS – Tip Clearance Sensor**. Dabei handelt es sich um einen neuartigen, induktiven Sensor, für den grundlegende Parameter definiert und untersucht werden sollen. Der Sensor soll später in der Luftfahrttechnik zum Einsatz kommen und soll den Blattabstand koaxialer Hubschrauber messen. Die Entwicklung basierte dabei sowohl auf Simulationen als auch auf experimentellen Versuchen.

Diese Bachelorarbeit verfasste ich als Abschlussarbeit meines Studiums Fahrzeugtechnik an der Hochschule Esslingen beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Ziel war es, die definierten Parameter zu untersuchen und auf Basis der vorhandenen Patentschrift festzustellen, ob und wie ein Sensor für den Einsatz in einem Koaxialhubschrauber dimensioniert werden muss und welche sonstigen Anforderungen der Sensor zu erfüllen hat. Zudem sollte ein Prototyp gebaut werden, welcher die geforderte Funktion der Abstandserkennung bereits rudimentär beherrscht. Die Bearbeitung dieser Aufgabe fand zwischen September 2021 und Januar 2022 beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig am Institut für Flugsystemtechnik statt.

Durch die umfangreiche Betreuung von Herrn Oliver Schneider konnte ich bereits zu Beginn meines Bearbeitungszeitraums schnell Fortschritte erzielen. Durch seinen großen Erfahrungsschatz konnte ich auch abseits des eigentlichen Themas von der Materie Hubschrauber viel Neues lernen und mein Wissen in diesem Bereich so erweitern. Für alle Belangen in Bezug auf die Prüfungsleistung und die Hochschule stand mir Herr Prof. Hugo Gabele stets zur Seite. Durch die schnellen und unkomplizierten Absprachen konnte ich mir auch bei Problemen sicher sein, dass zügig eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden würde.

Die Arbeit war stets geprägt von einem konstruktiven Arbeitsumfeld, ehrlicher Kommunikation und hilfsbereiten Kollegen. Daher möchte ich meinem Betreuer Herrn Oliver Schneider und Herrn Prof. Hugo Gabele an dieser Stelle für die reibungslose Kommunikation und den spannenden und lehrreichen Ablauf der Bachelorarbeit sehr danken. Zudem gilt mein Dank auch den Kollegen und Kolleginnen der Gruppe Rotorversuchsstand, die ich jederzeit und bei allen Themen zurate ziehen konnte.

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen dieser Bachelorarbeit.

A black rectangular box redacting the signature of the author.

Braunschweig, 01. Februar 2022

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1. Aufgabenstellung	8
2. Stand der Technik	10
2.1 Sensorik.....	10
2.1.1 Kapazitiver Sensor	11
2.1.2 Induktiver Sensor	11
2.1.3 Ultraschall Sensoren.....	11
2.1.4 Laser Sensor	12
2.1.5 Konfokaler Sensor	12
2.1.6 Infrarot Sensor.....	13
2.2 Patentschrift	13
3. Versuchsaufbau.....	15
3.1 Prüfstand	15
3.2 Elektronik.....	18
3.2.1 Harvester	20
3.2.2 Gleichrichter	21
3.2.3 Energiespeicher	22
3.2.4 Verbraucher.....	22
3.3 Bauteile und Parameter.....	23
4. Versuchsdurchführung und Auswertung.....	25
4.1 MATLAB Simulation	29
4.2 Prüfstand	31
4.3 MATLAB Auswertung der Messdaten.....	35
4.3.1 Glätten.....	36
4.3.2 Triggerpunkte	37
4.3.3 Kurvenkonstruktion.....	38
4.3.4 Durchschnittskurve	39
4.3.5 Leistungsermittlung.....	40
4.4 Arduino	41
5. Ergebnisse	43
5.1 Güteklasse.....	43

5.2	Dicke und Durchmesser des Magneten.....	44
5.3	Anzahl der Wicklungen	46
5.4	Drahtdurchmesser	47
5.5	Kantenlänge und Spulendurchmesser.....	48
5.6	Abstand Magnet – Spule	50
5.7	Rotordrehzahl	52
6.	Fazit	55
7.	Ausblick	56
8.	Quellen.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CoAX 2D der Firma edm aerotec GmbH [2]	8
Abbildung 2: Aufteilung der drei Arbeitsbereiche im Sensor	10
Abbildung 3: Lichtspektren des konfokalen Sensors [6]	12
Abbildung 4: Aufbau des Prüfstands	16
Abbildung 5: Rotor vor (links) und nach der aerodynamischen Optimierung (rechts)	17
Abbildung 6: Energiegewinnung aus mech. oder elektr. Energie	18
Abbildung 7: Holz- und Kunststoffspulen	19
Abbildung 8: Schaltung für die Auswertung des Spannungssignals	21
Abbildung 9: Abstand zwischen Magnet und Spule	25
Abbildung 10: Abstand z über zv mit $zh = 100mm$	26
Abbildung 11: Induzierte Spannungen im einzelnen Leiter der Spule	27
Abbildung 12: Spitzenspannungen bei variablem Abstand	28
Abbildung 13: Simulation des Spannungsverlaufes über variablem Abstand	30
Abbildung 14: Tastkopf am Oszilloskop	31
Abbildung 15: Optimaler Messbereich am Oszilloskop	33
Abbildung 16: Aufgezeichneter Spannungsverlauf mit 10 Perioden	35
Abbildung 17: Interpolieren und Glätten eines verrauschten Messsignals	36
Abbildung 18: Triggerpunkte und gemittelte Verläufe	37
Abbildung 19: Nachgebildete und Gemittelte Kurven	39
Abbildung 20: Arduino Uno mit Steckkabeln	41
Abbildung 21: Spannungsverlauf bei variabler Wicklungszahl	46
Abbildung 22: Spannungsverlauf bei variablem Leiterdurchmesser	47
Abbildung 23: Spannungsverlauf bei variablem Abstand	50
Abbildung 24: Spannungsverlauf bei $z_h > 100mm$	51
Abbildung 25: Spannungsverlauf bei variabler Drehzahl	52
Abbildung 26: Parameter der Exponentialfunktion bei variabler Drehzahl	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Spulen.....	19
Tabelle 2: Eigenschaften Neodym-Magnete [8].....	23
Tabelle 3: Parameter der MATLAB Simulation.....	29
Tabelle 4: Leistungsverhalten im Spulennahen Bereich	32
Tabelle 5: Einfluss des Magnet-Durchmessers auf die Induktionsspannung.....	44
Tabelle 6: Verhalten der Spannungen bei variablem Magnetdurchmesser	45
Tabelle 7: Verhalten der Spannung bei variablem Leiterdurchmesser	47
Tabelle 8: Spannungsänderung bei variabler Leiterlänge.....	49
Tabelle 9: Exponentialregression	54

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A_D	mm^2	Kreisfläche Draht
B	T	Flussdichte
B_r	T	Remanenzfeld des Magneten
B_{rz}	—	Zuwachs des Remanenzfelds
B_{r35}	T	Remanenzfeld des Magneten der Güteklasse N35
B_{r52}	T	Remanenzfeld des Magneten der Güteklasse N52
c	m	Rotorblatattiefe
C_E	F	Elektrolyt-Glättungskondensator (ELKO)
D_D	mm	Durchmesser Draht
D_M	mm	Durchmesser Magnet
D_s	mm	Durchmesser Spule
H	mm	Höhe des Magneten
l_s	mm	Leiterlänge Spule
n_R	$1/min$	Drehzahl Rotor
n_s	—	Wicklungszahl Spule
R_M	mm	Radius des Magneten
U_i	V	Induzierte Spannung
U_m	V	Gemittelte Spannung
U_{N35}	V	Induktionsspannung mit Magnet N35
U_{N52}	V	Induktionsspannung mit Magnet N52
v_{rot}	m/s	Relative Geschwindigkeit Magnet zu Spule
z	mm	Effektiver Abstand Magnet zur Spule
z_h	mm	Horizontaler Abstand Magnet zur Spule
z_v	mm	Vertikaler Abstand Magnet zur Spule

1. Aufgabenstellung

Der in der Gesellschaft bekannteste Hubschrauber besteht üblicherweise aus einem Hauptrotor und einem Heckrotor. Hierbei erzeugt der Hauptrotor den Auftrieb, während der Heckrotor das Drehmoment ausgleicht. Dies ist notwendig, da nach dem 2. Newtonschen Gesetz jede Kraft eine entsprechende Gegenkraft erzeugt. Das vom Triebwerk abgegebene Moment, welches größtenteils in den Hauptrotor geleitet wird, erzeugt eine Drehung des Rumpfes um die Hochachse. Um eine unkontrollierte Drehung zu vermeiden, wird ein Heckrotor benötigt, welcher ein entsprechendes Gegenmoment aufbaut und so den Rumpf des Hubschraubers stabilisiert.

Neben diesem Aufbau gibt es weitere Konstruktionsformen, z.B. den NOTAR (*No Tail Rotor*) oder den Hubschrauber mit Koaxial-Rotor. Beim erstgenannten wird durch ein Gebläse, welches im Heckausleger des Hubschraubers verbaut ist, in diesem ein Luftdruck erzeugt. Dieser kann dann am hinteren Ende des Auslegers durch eine steuerbare Lufterdüse gezielt in eine Richtung abgelassen werden. Die dadurch am Heckausleger vorhandene Kraft wirkt über dessen Länge als Gegendrehmoment zum Drehmoment des Hauptrotors. Beim Hubschrauber mit Koaxial-Rotor ist kein Drehmomentausgleich notwendig. Bei dieser Bauform werden zwei Rotoren übereinander angeordnet. Durch die entgegengesetzte Drehrichtung des unteren zum oberen wird das Moment kompensiert und es bedarf keinen weiteren Ausgleich.



Abbildung 1: CoAX 2D der Firma edm aerotec GmbH [2]

In dieser Arbeit handelt es sich um die Bauform eines Hubschraubers mit Koaxial-Rotor des Typs **CoAX 2D** der Firma **edm aerotec GmbH**. Dieser zweiseitige Ultraleicht-Hubschrauber ist der erste seiner Art, welcher eine Zulassung in Deutschland bekommen hat. Er erhielt seine Musterzulassung bereits am 29.03.2017 [3]. Wie in **Abbildung 1** zu sehen, sind die beiden Rotoren mit einem Abstand von $0,644\text{ m}$ [4] konstruiert. Das ist notwendig, da es aktuell noch keine Möglichkeit gibt, im Flug den Abstand zwischen den Flügelspitzen des oberen und des unteren Rotors zu detektieren.

Um eine mögliche Berührung je nach Lastpunkt und Fluglage des Hubschraubers ausschließen zu können, ist ein entsprechend großer Rotorabstand nötig. Es ist erstrebenswert, diesen zu reduzieren, da sich das positiv auf den Kraftstoff-Verbrauch auswirkt.

Die Anforderungen an einen solchen Sensor sind vielseitig, denn durch den Einsatz im Rotorblatt ist ein autarker Sensor wünschenswert. Er sollte also ohne Signal- oder Stromkabel auskommen, was dazu führt, dass zwingend eine Sendeinheit mit verbaut werden muss, um den Datentransfer zu gewährleisten. Über folgende Eigenschaften sollte der Sensor deshalb verfügen:

- Solide und robuste Bauweise
- Unempfindlich gegen hohe Beschleunigungskräfte
- Temperaturunempfindlich
- Wenn möglich autark arbeitend (ohne Versorgungs- oder Signalleitungen)
- Leicht, um die Kinematik des Blattes nicht zu stören
- Flache Bauweise (durch die Blattform bedingt)
- Große Reichweite
- Witterungsbeständig

Für die Bearbeitung des Themas wird zu Beginn ein Zeitplan erstellt (siehe **Anhang 1**). Aufgrund der Vorgehensweise und Änderungen, die während der Bearbeitung festgelegt werden, muss auch der Zeitplan regelmäßig aktualisiert und auf dem neuesten Stand gehalten werden.

2. Stand der Technik

Der Sensor soll später zwei Hauptaufgaben erfüllen. Zum einen soll er zuverlässig den Abstand der Blattspitzen erfassen und zum anderen die Information kabellos in das Innere des Cockpits weiterleiten. Aus diesem Grund wird der Sensor an dieser Stelle in drei Bereiche aufgeteilt (**Abbildung 2**).

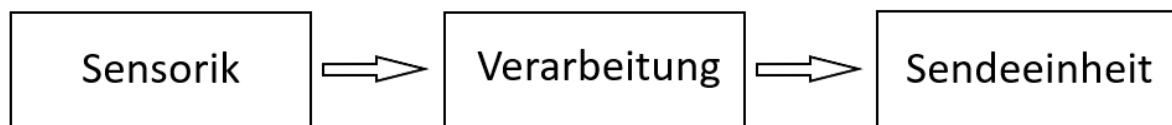


Abbildung 2: Aufteilung der drei Arbeitsbereiche im Sensor

2.1 Sensorik

Im Bereich der Abstandssensoren finden sich bereits viele Modelle, welche auf unterschiedlichen physikalischen Grundsätzen beruhen. Im Folgenden werden nur die berührungslosen Sensoren aufgeführt, da die berührenden (wie ein Seilzugsensor) für die geplante Anwendung nicht in Frage kommen.

1. Kapazitiver Sensor
2. Induktiver Sensor
3. Ultraschall Sensor
4. Laser Sensor
5. Konfokaler Sensor
6. Infrarot Sensor

2.1.1 Kapazitiver Sensor

Dieser Sensor besteht aus zwei Elektroden, welche parallel zueinander angeordnet sind. Sie ähneln dem Aufbau eines Kondensators, wobei die eine Seite den Sensor und die andere das zu messende Objekt darstellt. Im Falle einer Abstandsmessung ändert sich die Kapazität zwischen den beiden Elektroden. Diese Änderung wird gemessen und der Abstand daraus errechnet. Allerdings benötigt dieser Sensor eine Versorgungsspannung. Da diese nicht bereitgestellt werden kann, ist dieser Sensortyp für den geplanten Anwendungsfall ungeeignet.

2.1.2 Induktiver Sensor

Der induktive Sensor arbeitet ähnlich wie der kapazitive, allerdings basiert er auf einer anderen physikalischen Größe. Während der kapazitive Sensor die Kapazität als Messgröße hat, arbeitet der induktive Sensor mit der Änderung des Magnetfelds. Dazu wird mit Hilfe eines Schwingkreises eine hochfrequente Wechselspannung erzeugt. Diese erzeugt ein Magnetfeld. Sobald ein elektrisch leitendes Material in den Einflussbereich des Magnetfelds kommt, werden in dem Material Wirbelströme induziert, was zu einer Änderung der Amplitude und der Frequenz des Schwingkreises führt. Da es sich hier ebenfalls um einen aktiven Sensor handelt, ist auch er nicht für diese Anwendung geeignet.

2.1.3 Ultraschall Sensoren

Beim Ultraschallsensor handelt es sich um einen akustischen Sensor. Dieser sendet hochfrequente Schallimpulse aus, welche für das menschliche Ohr nicht hörbar sind. Das Signal wird von dem erfassenden Objekt reflektiert und vom Sensor empfangen, wodurch die Laufzeit des Signals erfasst wird. Da sich der Schall mit Schallimpulse mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten, kann mit Hilfe der Laufzeit eine exakte Entfernung errechnet werden. Da es sich hierbei um einen aktiven Sensor handelt, welcher zudem starken Messschwankungen durch turbulente Strömungen unterliegt, wird er nicht näher in Betracht gezogen.

2.1.4 Laser Sensor

Bei diesem Sensor handelt es sich um einen optischen Sensor. Im Sensor ist eine Lichtquelle enthalten, welche einen Laserstrahl ausgibt. Dieser wird an dem zu messenden Objekt reflektiert und auf einer zeilen- oder Flächenkamera detektiert [5]. Über die Lichtlaufzeitmessung kann ähnlich wie beim Ultraschall Sensor die Entfernung berechnet werden. Im Vergleich zu diesem wird der Laser Sensor nicht durch Strömungen beeinträchtigt. Da allerdings sein Aufbau komplex ist und er eine Versorgungsspannung benötigt, ist er für den Einsatz im Rotorblatt ungeeignet.

2.1.5 Konfokaler Sensor

Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen optischen Sensor, welcher neben Abständen auch Materialdicken messen kann. Dafür wird Weißlicht durch einen Satz Linsen in sein Farbspektrum zerlegt. Diese treffen nun gebündelt, aber mit unterschiedlichen Konvergenzpunkten, auf das zu messende Objekt (**Abbildung 3**). Je nach Abstand des Objekts zum Sensor trifft jede Farbe mehr oder weniger gebündelt auf die Oberfläche des Objekts, welches das Licht zurückwirft. Über eine Photodiode kann nun die Zusammensetzung des reflektierten Lichts und somit die Entfernung des Objekts ermittelt werden. Da der Sensor aber einen großen Bauraum hat, komplex aufgebaut ist und Energie benötigt, ist der für diesen Einsatzzweck nicht geeignet.

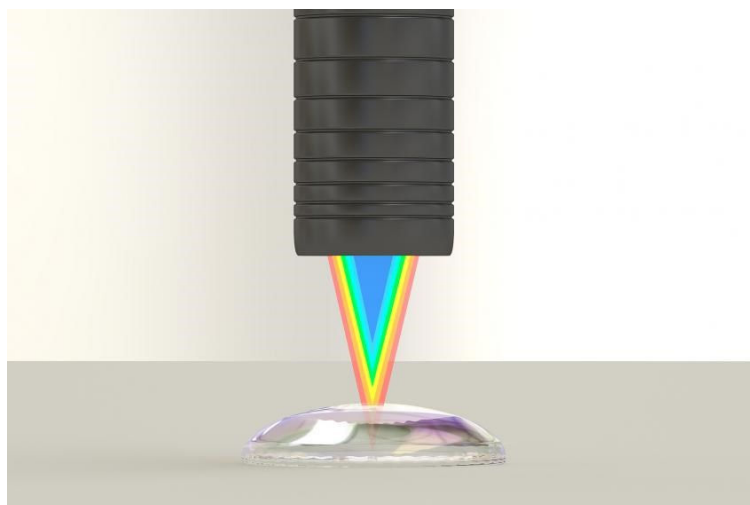


Abbildung 3: Lichtspektren des konfokalen Sensors [6]

2.1.6 Infrarot Sensor

Bei diesem, ebenfalls optischen, Sensor wird mit einer Infrarot-LED (IR-LED) ein gepulstes Licht ausgegeben. Dieses wird von Objekten in seinem Einflussbereich reflektiert. Um Störungen oder Falschmessungen durch anderen IR-Quellen zu vermeiden, wird die LED in einem vorgegebenen Takt gepulst. Der Sensor reagiert nur auf IR-Signale in dieser Taktung, wodurch er Störungen teilweise ausschließen kann. Auch hier kann die Entfernung über die Lichtlaufzeit ermittelt werden. Da dieser Sensor wie die vorangegangenen aber ebenfalls ein aktiver Sensor ist, kann er im Rotorblatt nicht eingesetzt werden.

Um einen autarken Betrieb zu gewährleisten, ist keiner dieser Sensoren geeignet, da alle aus einer externen Stromversorgung gespeist werden müssen. Zudem passen der Bauraum und das Gewicht teils nicht zum gewünschten Konzept. Aus diesem Grund wurde bereits die Idee eines induktiven Sensors entwickelt, welcher sich, mit Hilfe der induzierten Spannung in einer Spule, selbst mit Energie versorgt. Für diese Idee ist bereits ein Patent angemeldet. Der dazugehörige Sensor soll nun entwickelt werden.

2.2 Patentschrift

Das Patent „DE 10 2019 102 419 B4“ **[1]**, welches am 07.01.2021 erteilt wurde, beinhaltet neben dem Stand der Technik auch die Aufgabendefinition des Sensors und deren Lösung und Umsetzung. Ziel des Sensors soll eine Warn-, bzw. Überwachungsmöglichkeit des Blattspitzenabstands für den Piloten sein. Durch bereits bekannte Techniken kann der Abstand der Blattspitzen bei einem coaxialen Rotorsystem gemessen werden.

Dies kann optisch mit Hilfe einer Stereokameraanordnung erfolgen. Diese wird neben dem Rotor positioniert und kann im laufenden Betrieb den Blattspitzenabstand erfassen. Allerdings kann diese Messung nicht im Flug angewandt werden, da hier die Positionierung der Kameras nicht möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit der Abstandsbestimmung ist die Messung mit Dehnmessstreifen. Dabei handelt es sich um Widerstände, welche ihren Widerstandswert je nach Streckung und Stauchung ihrer selbst ändern. Durch Aufbringen von Dehnmessstreifen auf dem Blatt kann die Biegung am Ort des Sensors bestimmt und bei der Anwendung mehrerer Sensorsysteme in beiden Rotorebenen auch der Blattspitzenabstand errechnet werden.

Dies ist für experimentelle Zwecke zwar brauchbar, allerdings nicht für einen serienmäßigen Einsatz geeignet, da auch hier wieder Kabel aus dem stehenden Teil des Hubschraubers (Cockpit) in dem drehenden Teil (Rotorsystem) verlegt werden müssen.

Zuletzt kann auch die Steuereingabe über eine Software beschränkt werden, um so jegliche kritischen Zustände zu vermeiden. Allerdings würden dadurch die Beweglichkeit und die Leistungsfähigkeit des Hubschraubers eingeschränkt. Da die Beweglichkeit und Agilität eines Hubschraubers gegenüber anderen Luftfahrzeugen herausragend ist, sollte dieser Vorteil nicht durch eine solche Reglementierung eingeschränkt werden.

Im Weiteren geht das Patent auf den prinzipiellen Aufbau, bzw. die Funktion eines solchen neuartigen Sensors in diesem Aufgabenbereich ein. Hierbei wird die Grundidee des Magneten und des Leiters in den unterschiedlichen Rotorebenen erläutert. Zudem wird auf den autarken Betrieb des Sensorsystems eingegangen und erklärt, dass die Energie für die Auswertung und die Sendeeinheit aus der induzierten Spannung genutzt werden soll. Die Sendeeinheit dient dazu, die Messdaten des Sensors kabellos ins Cockpit zu übertragen. Anhand einer nachgeschalteten Anzeige erhält der Pilot Informationen über einen evtl. kritischen Blattspitzenabstand und kann die Fluglage entsprechend anpassen.

Das vollständige Patent ist dieser Arbeit angehängt (**Anhang 4**).

Die Arbeit am Versuchsaufbau bildet bei der Entwicklung des Sensors zusammen mit der Simulation den Arbeitsschwerpunkt. Mit Hilfe der Simulation soll das physikalische Prinzip greifbar und in Zahlen und Diagrammen visualisiert werden. Um diese Ergebnisse zu verifizieren, muss ein Prüfstand aufgebaut werden. Da es hierbei aber nicht möglich ist, die spätere Relativgeschwindigkeit zwischen Magnet und Spule, welche aus der Rotordrehzahl und dem Rotorradius hervorgeht, zu realisieren, wird ein Prüfstand im kleineren Maßstab gebaut. Somit muss nicht nur der Einfluss der Parameter auf die Spannung untersucht werden, sondern die Parameter müssen auch skalierbar sein. Das Spannungsverhalten muss also für variable Parameterwerte errechnet werden können. Neben der bereits erwähnten Relativgeschwindigkeit müssen außerdem noch weitere sechs Parameter beachtet und untersucht werden. Weitere Details sind in Kapitel 3.3 beschrieben.

3. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Der Prüfstand bildet die mechanische Seite des Versuchs ab. An ihm werden die kinematischen Untersuchungen mit den unterschiedlichen Parametern durchgeführt und das Verhalten verschiedene Spulen getestet. Zudem werden hier die Messungen gemacht.

Im Bereich der Elektronik findet die Auswertung der Messungen aus dem Prüfstand statt. Dabei soll eine Messung der Entfernung zwischen dem Magnet und der Spule hier durch die Ausgabe eines Signals erfolgen.

3.1 Prüfstand

Zu Beginn der Untersuchungen ist bereits ein vereinfachter Aufbau vorhanden. Dieser besteht aus dem DC-Motor **HC Motor Co. Ltd, MY1016**, welcher auf einer Arbeitsplatte montiert ist (**Abbildung 4**). Daran verschraubt ist ein Stab aus Aluminium mit rechteckigem Querschnitt, welcher den Magnet aufnimmt. Dazu befindet sich am äußersten Ende des Stabs eine Bohrung, welches den Magnet und einen Stopper aufnimmt. Dieser Stopper ist 3D-gedruckt und schränkt die Beweglichkeit des Magnets im Betrieb ein, um sicherzustellen, dass der Magnet sich nicht aus der Halterung löst. Die Aufnahmebohrung des Magneten wird zur Sicherheit zusätzlich mit Aluminium-Klebeband verschlossen. Die andere Seite des Stabs ist gekürzt und mit einer M10-Gewindestange versehen. Über einen Messing-Zylinder, welcher als Gewicht auf der Gewindestange radial verschiebbar ist und von zwei Schraubenmuttern gehalten wird, kann der Rotor ausgewuchtet werden, da sonst bei hohen Drehzahlen das gesamte System Schaden nehmen könnte.

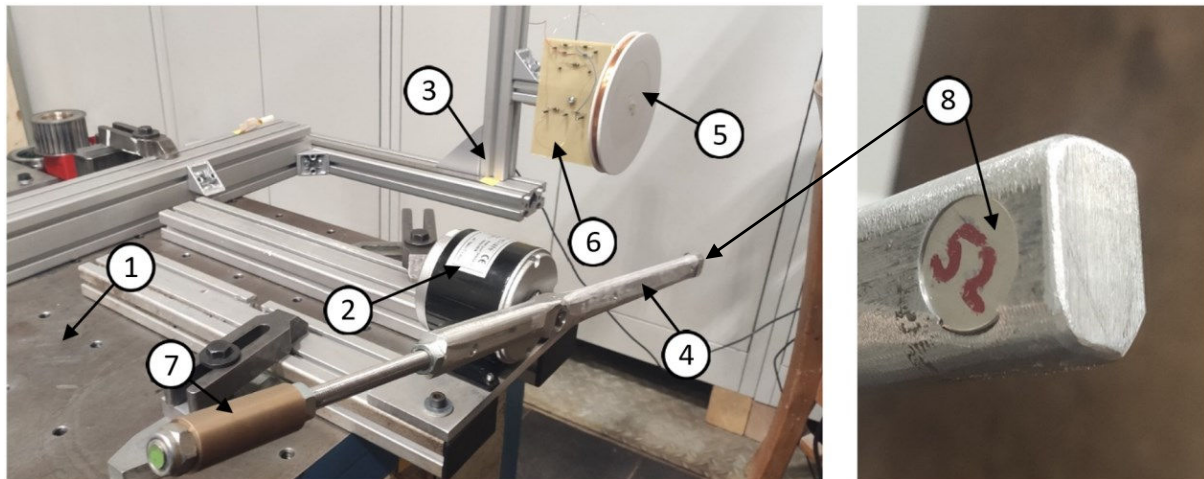


Abbildung 4: Aufbau des Prüfstands

- | | | | |
|-------------------|-------------|----------------------|------------|
| (1) Arbeitsplatte | (2) Motor | (3) Aluminium-Träger | (4) Rotor |
| (5) Spule | (6) Platine | (7) Wuchtgewicht | (8) Magnet |

Zur Stromversorgung des Motors dient das Netzteil **PSI 9200-25 2U** der Firma **AE Elektro-Automatik GmbH & Co. KG**. Über ein zweiadriges Kabel wird der Gleichstrommotor mit der Leistung versorgt. Das Netzteil ist dazu in der Lage, entweder Strom-, Spannungs- oder Leistungsgeregelt den Motor zu betreiben. Die für die gewünschten Drehzahlen benötigten Leistungswerte werden in Kapitel 4.2 näher beschrieben. Der aktuelle Stand des Prüfstands ist in **Abbildung 4** zu sehen.

Ebenfalls Teil des Prüfstandes ist das Oszilloskop **RTB2004** der Marke **ROHDE&SCHWARZ**. Dieses ist dazu in der Lage, die Messdaten im TXT.- oder CSV.-Format auf einem USB-Speichermedium abzuspeichern. In der TXT.-Datei werden nur die Werte der Messpunkte verzeichnet. Das hat zur Folge, dass bei der Auswertung die Zeitlinie über die Abtastrate errechnet werden muss. Diese muss separat während der Messung abgelesen werden. Der Vorteil der CSV-Datei liegt darin, dass neben den Werten der Messpunkte auch die Zeit mitgeschrieben wird. Das erleichtert später die Auswertung der Messdaten in MATLAB. Für alle Messungen werden die Messdaten in CSV-Format mitgeschrieben. Das Oszilloskop wird mit einem Tastkopf an die beiden Enden des Spulenleitern angeschlossen. Bei späteren Ausbauten wird es mit der Auswerteschaltung verbunden. Dafür sind extra Stiftkontakte als Anschlussmöglichkeit auf der Auswerteschaltung verlötet.

Als Magnete kommen Neodym Magnete der Güte N35 und N52 in den Dicken 3 mm, 5 mm und 10 mm und dem Durchmesser 10 mm, 15 mm und 20 mm zur Anwendung. Im weiteren Verlauf werden Anpassungen an dem Prüfstand vorgenommen. Zur Vermeidung eines Einflusses der Stahl-Arbeitsplatte wird der Motor an den Rand des Tisches verschoben, sodass die Spule frei in der Luft hängt. Diese wird zudem an einem horizontalen Aluminium-Träger befestigt, um mögliche Einflüsse des Materials zu verhindern. Seitlich am Träger wird die Platine mit der Brückengleichschaltung und einem Lastwiderstand montiert. Zur Vermeidung ferromagnetischer Metalle im Einflussbereich der Spule wird diese mit einer Kunststoffschraube im Träger verschraubt.

Da Relativgeschwindigkeit zwischen dem Magnet und der Spule, welche im realen Anwendungsfall vorhanden wäre, an diesem Aufbau nicht erreicht werden kann, wird eine maximale Drehzahl von 800 rpm (revolutions per minute) festgelegt. Dies entspricht einer Bahngeschwindigkeit des Magneten von 38,2 m/s bei einem Hebelarm von $r = 0,456\text{ m}$. Bei der Inbetriebnahme wird festgestellt, dass die Leistung des Motors nicht ausreicht, um diese Drehzahl zu erreichen. Es müssen also Anpassungen an der Aerodynamik gemacht werden (**Abbildung 5**). Ziel ist es, den Aufbau so zu modifizieren, dass die Soll-Drehzahl erreicht wird. Dazu wird der Aluminium-Stab demontiert und mit Hilfe eines Winkelschleifers und einer Schleifscheibe in Form eines Flügel-Profiles geschliffen. Durch die Änderung der Form wird aus der zuvor größtenteils turbulenten eine laminare Strömung. Der cw-Wert des Rotors wird also verbessert, bzw. die aerodynamische Widerstandskraft zu verringern. Dadurch wird weniger Leistung für dieselbe Drehzahl benötigt.



Abbildung 5: Rotor vor (links) und nach der aerodynamischen Optimierung (rechts)

Die maximale Leistung, die der Motor erzielen kann, liegt bei 300 Watt. Bei einer Drehzahl von 412 *rpm* kann durch die aerodynamische Optimierung des Rotors bei gleicher Leistung die Drehzahl um 48,5 % auf 614 *rpm* gesteigert werden. Zudem kann jetzt die geplante Drehzahl von 800 *rpm* erreicht werden.

3.2 Elektronik

Die Elektronik wird aus zwei Gründen benötigt. Zum einen soll das Spannungssignal ausgelesen werden. Das ist notwendig, um den Abstand der beiden Blattspitzen zu bestimmen. Zum anderen soll die Schaltung Energie sammeln, um die auswertende Elektronik mit Strom versorgen zu können. Die Elektronik besteht aus mehreren Komponenten, darunter dem Gleichrichter, der Auswertung des Signales und die Sendeeinheit. Der Aufbau der Schaltung folgt dabei **Abbildung 6**.

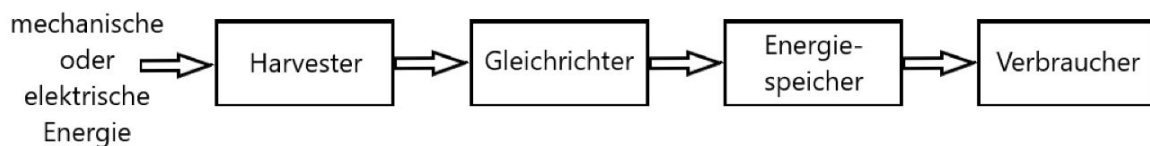


Abbildung 6: Energiegewinnung aus mech. oder elektr. Energie

Die elektrische Energie wird aus der Induktionsspule gewonnen. Diese besteht aus einem Spulenkörper und den Wicklungen aus Kupferdraht. Als Körper dient zu Beginn der Arbeit eine einfache Holzplatte, auf der mit Hilfe von vier, in den Ecken platzierten Schrauben, eine Spule gewickelt wird. Die Kantenlänge wird zunächst auf 150 *mm* festgelegt, da die Blattiefe *c* des Rotorblatts 0,22 *m* beträgt [4].



Abbildung 7: Holz- und Kunststoffspulen

Einige Spulen werden auch mit einer Kantenlänge von 110 mm gebaut, um den Einfluss des Abstand zwischen den Leitern bestimmen zu können. Um das Verhalten von bsp. Wicklungszahlen oder variierender Drahtdurchmesser eruieren zu können, werden mehrere Spulen angefertigt (siehe **Abbildung 7** und **Tabelle 1**).

Spule	Wicklungszahl	Drahtdurchmesser [mm]	Durchmesser [mm]
1	10	0,315	110 / 150
2	10	1,3	110 / 150
3	200	0,315	110 / 150
4	10	0,63	110 / 150
5	200	0,315	150
6	10	0,63	150
7	50	0,315	150
8	100	0,315	150
9	1000	0,25	150
10	10	0,1	110 / 150

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Spulen

Diese werden teilweise auf Spulenkörpern aus Holz gewickelt. Bei höheren Windungszahlen und um den möglichen Einfluss der Stahlschrauben auf die Messungen zu vermeiden, kommt zudem ein zweiteiliger Spulenkörper aus dem 3D-Druck zum Einsatz. Dieser besteht aus einem Ring und dem Hauptkörper. In **Abbildung 7** (rechts) ist zu erkennen, wie die beiden Teile verklebt den Spulenkörper bilden. Durch seine Geometrie ist er in der Lage, wesentlich mehr Wicklungen aufzunehmen.

Während die ersten Spulen mit niedrigen Wicklungszahlen (< 100) noch von Hand gewickelt werden, kommt bei den Spulen mit hohen Wicklungszahlen eine Wickelmaschine zum Einsatz, die zuvor aber extra für diesen Einsatz angepasst werden muss.

Die eigentliche Aufgabe der Wickelmaschine ist das Wickeln von längeren Spulenkörpern. Da die Kunststoffspulen aber nur 14 mm lang ist, muss eine extra Aufnahme dafür gefertigt werden (siehe **Anhang 2**). Diese besteht aus einem Aufnahmestift für die Wickelmaschine, einem Teller mit zwei Bohrungen und einem Stift für die Aufnahme der Spule. Der Teller garantiert, dass die Spule während ihrer Drehung plan läuft.

In die beiden Bohrungen werden M4 Gewinde geschnitten, um das Verdrehen der Spule während des Wickelvorgangs zu verhindern. Diese hat zwei Durchgangsbohrungen auf dem selben Kreistradius. Durch sie wird die Spule mit der Aufnahme verschraubt.

Die Spule fungiert im Sensorsystem als Harvester (*eng.:* „*Sammler*“, siehe Kapitel 3.2.1) und gibt eine Wechselspannung aus. Diese wird im Gleichrichter in eine pulsierende Gleichspannung umgewandelt und schließlich in einem Energiespeicher zwischengespeichert. Der Verbraucher kann dann mit einer konstanten Spannung aus dem Zwischenspeicher gespeist werden.

Bei der Auswertung kommt ein Board der Marke **ARDUINO** und des Typs **UNO** zum Einsatz. Dieses eignet sich besonders gut, da die Benutzeroberfläche zur Programmierung sehr übersichtlich gestaltet ist. Da dieses Gerät allerdings einen relativ hohen Leistungsbedarf hat (238 mW), eignet es sich nur zur vorläufigen Auswertung mit externer Energieversorgung. Für einen späteren Prototypen des Sensors kommen anderen Elektronik-Komponenten zum Einsatz.

3.2.1 Harvester

Ein Harvester (oft auch Energy-Harvester genannt) ist ein elektro-mechanisches Bauteil, welches mechanische, thermische oder optische Leistung in elektrischen Strom wandelt. Harvester kommen immer dann zum Einsatz, wenn eine zentrale Energieversorgung nicht sichergestellt werden kann. Das kann z.B. bei Fensterkontakten oder Thermometern der Fall sein. In diesem Fall dient eine Spule als Harvester.

Sie erzeugt mithilfe eines bewegten Magneten eine Spannung, welche für weitere Aufgaben verwendet werden kann. Dabei werden Parameter wie die Wicklungszahl oder der Spulendurchmesser variiert und untersucht.

3.2.2 Gleichrichter

Die Schaltung für die Auswertung wird im Allgemeinen im Voraus mit einzelnen Komponenten auf einem Steckbrett aufgebaut und geprüft. Sobald hier die Funktionsfähigkeit der Schaltung nachgewiesen ist, wird diese auf einer Lochplatine verlötet und kommt zur Erprobung an den Prüfstand. Sobald sie auch hier wie erwartet arbeitet, kann sie für alle folgenden Messungen eingesetzt werden. Zum Einsatz kommen Schottky-Dioden ($D1 - D4$). Diese werden zu einem Brückengleichrichter verschalten. Bei den Schottky-Dioden handelt es sich um Germanium-Dioden, da diese eine sehr geringe Abfallspannung haben (ca. $0,3\text{ V}$).

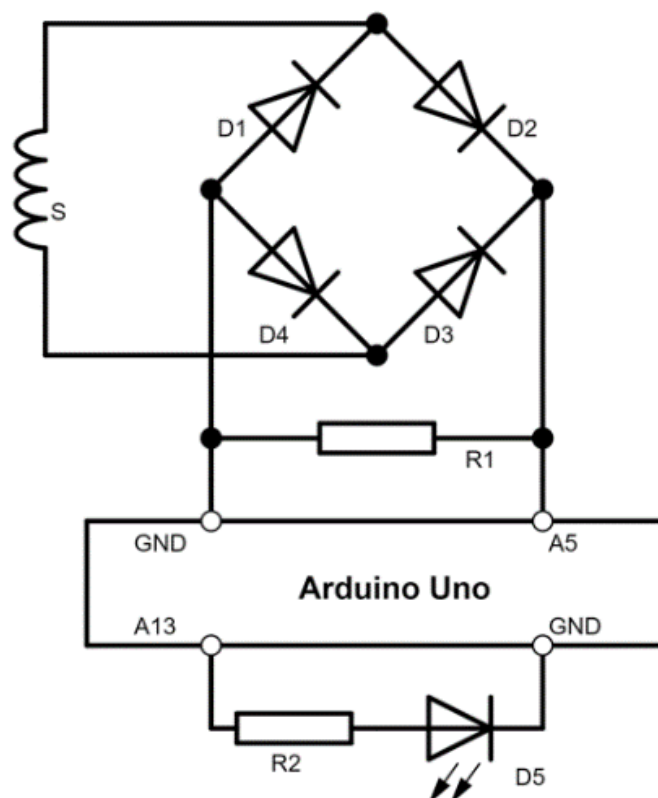


Abbildung 8: Schaltung für die Auswertung des Spannungssignals

3.2.3 Energiespeicher

Für den Energiespeicher kommt ein Elektrolytkondensator (ELKO) mit zum Einsatz. Dessen Dimensionierung ist von drei Faktoren abhängig (Formel: **[7]**).

$$C_E = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} \quad (5)$$

Daraus ergibt sich für eine Spannung von $3,77 \text{ V}$ und einem Strom von $8,68 \text{ mA}$ in einer Zeitdauer von $\Delta t = 2,5 \text{ ms}$ eine Kapazität von $C_E = 5,76 \text{ }\mu\text{F}$. Diese Werte entstammen der Messung 17 (Parameter siehe **Anhang 3**). Der ELKO speichert die zugeführte Energie und gibt diese bei Bedarf an den Verbraucher ab. Bei der Dimensionierung des ELKOs ist drauf zu achten, dass die maximal zu erwartende Spannung an der Spule nicht die maximal zulässige Spannung des Kondensators übersteigt. In diesem Fall könnte ein Durchschlag die Folge sein, was zu einer Zerstörung des Kondensators führen und die Schaltung unbrauchbar machen würde. Da im weiteren Verlauf allerdings eine Sende- und Auswerteeinheit zum Einsatz kommt, welche bereits einen entsprechend dimensionierten Kondensator enthält, muss dieser nicht mehr als separates Bauteil ausgelegt und verbaut werden.

3.2.4 Verbraucher

Der Widerstand $R1$ ($50 \text{ }\Omega$) bildet den Lastwiderstand der Schaltung (**Abbildung 8**), der ausschließlich dazu dient, die Leistung bestimmen zu können. Das ist wichtig, da die Verbraucher neben ihrer Funktion auch nach ihrer Leistungsaufnahme ausgewählt werden. $R2$ ($100 \text{ }\Omega$) dient als Vorwiderstand für die LED ($D5$). Das ist notwendig, um den Strom zu begrenzen und ein Zerstören der LED zu vermeiden.

Die gleichgerichtete Spannung wird über den analogen Pin A5 eingelesen. Das ARDUINO-Skript schaltet den Pin A13 HIGH, sobald eine vorgegebene Spannung an A5 anliegt. Die LED dient als Signal, dass der Mindestabstand, bzw. die Spannung erreicht wurde.

3.3 Bauteile und Parameter

Der Versuch soll dazu dienen, das Verhalten der Spule, bzw. der induzierten Spannung bei verschiedenen Parametern kennen zu lernen. In einem späteren Schritt kann dann mit Hilfe der hier erlangten Erkenntnisse das Modell auf den realen Anwendungsfall hochgerechnet werden. Dabei spielen unterschiedliche Faktoren eine Rolle.

- Güteklasse des Magneten
- Dicke und Durchmesser des Magneten
- Anzahl der Wicklungen
- Drahtdurchmesser
- Kantenlänge / Durchmesser der Spule
- Abstand Magnet / Spule
- Drehzahl des Rotors

Der Magnet ist eine zentrale Komponente, die je nach Dimensionierung unterschiedliche Spannungen in der Spule induziert. Zum Einsatz kommen Neodym-Zylindermagnete mit den Güteklassen N35 und N52. Je höher die Güteklasse, desto „stärker“ ist der Magnet, bzw. desto höher ist seine Remanenz. Diese wird in Tesla (T) oder Gauss (G) angegeben, wobei sich diese beide Einheiten ausschließlich durch den Faktor 10^4 unterscheiden. Zudem haben die Neodym-Magnete eine maximale Temperatur, welche nicht überschritten werden sollte, da sich sonst seine magnetischen Eigenschaften verschlechtern (**Tabelle 2**).

Die hierfür angegebene Temperatur liegt allerdings über der zu erwartenden Temperatur, weshalb dieser Parameter nicht weiter untersucht wird. Neben der Güteklasse der Magnete wird auch der Einfluss deren Dicke und Durchmesser untersucht.

Güteklasse	Remanenz		Maximaltemperatur
	Gauss	Tesla	
N35	11700-12100	1.17-1.21	≥80°C
N52	14200-14700	1.42-1.47	≥80°C

Tabelle 2: Eigenschaften Neodym-Magnete [8]

Neben dem Magnet werden außerdem der Draht-Durchmesser und die Wicklungszahl der Spule untersucht. Zudem werden Messreihen gemacht, welche das Verhalten eines vergrößerten Abstands zwischen Spule und Magnet darstellen sollen. Dieser Parameter gehört zu den wichtigsten, denn er spiegelt den späteren Abstand zwischen den Rotorblattspitzen wider. Da dieser Abstand detektiert werden soll, muss bei den Messungen zu diesem Parameter mit besonderer Sorgfalt und Präzision vorgegangen werden.

Auch die Drehzahl, bzw. die relative Geschwindigkeit zwischen dem Magnet und der Spule ist zu berücksichtigen. Hierzu werden Messungen bei verschiedenen Drehzahlen gemacht, welche eine spätere Hochrechnung auf die Werte, die im realen Anwendungsfall zu erwarten sind, ermöglichen.

Da auch der Planet Erde ein eigenes Magnetfeld besitzt, soll dessen möglicher Einfluss auf die induzierte Spannung ebenfalls berücksichtigt werden.

Zuletzt wird der Einfluss der Kantenlänge, bzw. des Durchmessers der Spule untersucht. Die Kantenlänge ist relevant, da zu Beginn der Messungen mit Rechteckigen Spulen gearbeitet wird, welche später durch runde ersetzt werden.

4. Versuchsdurchführung und Auswertung

Um die Messgrößen in unterschiedlichen Skalierungen des Aufbaus vorhersagen zu können wird eine Simulation benötigt. Diese soll anhand der bekannten physikalischen Größen wie der magnetischen Flussdichte des Magneten, dessen Entfernung zur Spule, der Windungszahl der Spule, der Rotordrehzahl und des Spulendurchmessers den in der Spule induzierten Spannungsverlauf simulieren.

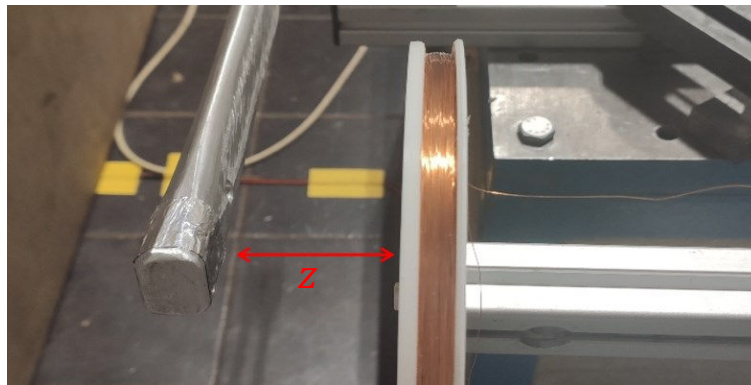


Abbildung 9: Abstand zwischen Magnet und Spule

Dazu wird im ersten Schritt ein Vektor mit den zu untersuchenden Abständen (**Abbildung 9**) erzeugt. Um die induzierte Spannung berechnen zu können wird zunächst die Flussdichte benötigt, welche an der Spule vorhanden ist (Formel: **[8]**).

$$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{H + z}{\sqrt{R^2 + (H + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (1)$$

Die Flussdichte ist abhängig von dem Magnetspezifischen Remanenzfeld des Magneten B_r . Dieses ist geometrieunabhängig und ist ein Indikator für die „Stärke“ des Magnets. In Kombination mit der Magnethöhe H , seinem Radius R und des Abstands zwischen Magnet und Spule z kann die Flussdichte berechnet werden. Da sich der Magnet parallel zur Spule bewegt, kann z einfach mit Hilfe des vertikalen Abstands z_v , des horizontalen Abstands z_h und des Satzes des Pythagoras' ermittelt werden.

Während z_h bei der Simulation einen festen Wert hat, variiert z_v während jeder Umdrehung (**Abbildung 10**).

$$z = \sqrt{z_h^2 + z_v^2} \quad (2)$$

Da sich der Magnet bei einer Spule über zwei Leiter bewegt, wird der Abstand z_1 und z_2 für den oberen, bzw. den unteren Leiter eingeführt. Dieser verhält sich außer im leiternahen Bereich annähernd linear. Zudem sind z_1 und z_2 , bedingt durch den Spulendurchmesser, versetzt. Die Versetzung entspricht dem Spulendurchmesser D_s , bzw. dem Abstand der beiden Leiter, welcher in den ersten Schritten 150 mm beträgt. Dieser Durchmesser wurde gewählt, da die Spule später im Rotorblatt verbaut wird. Dieses hat eine Blatattiefe (auch Chord genannt) von $c = 0,22 \text{ m}$. Durch das begrenzte Platzangebot im Blatt muss die Spule entsprechend klein dimensioniert werden. Die volle Blatattiefe kann nicht verwendet werden, da sich das Blattprofil nach vorne und hinten verjüngt und sich somit der effektive Bauraum verringert.

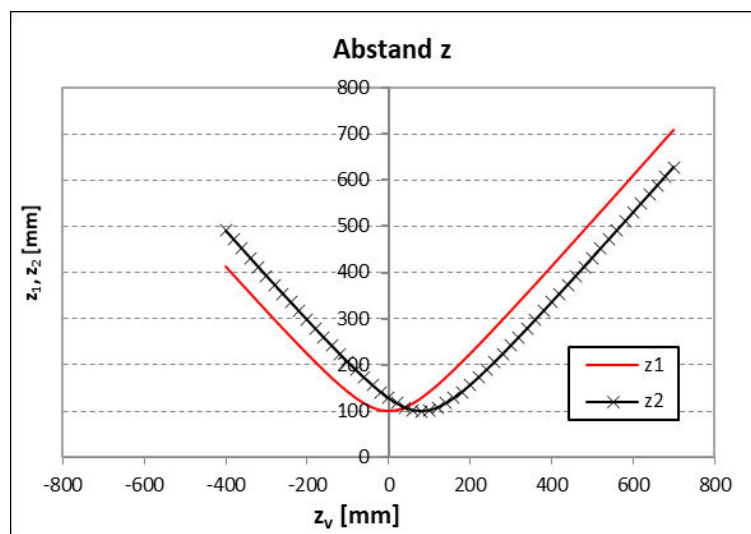


Abbildung 10: Abstand z über z_v mit $z_h = 100 \text{ mm}$

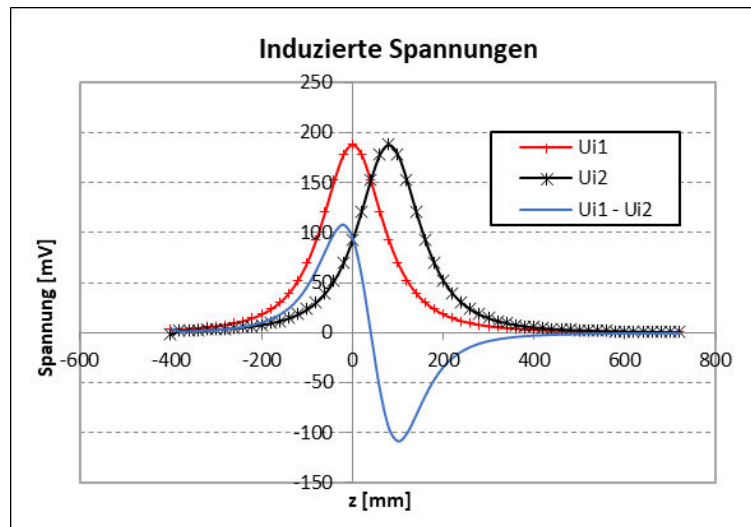


Abbildung 11: Induzierte Spannungen im einzelnen Leiter der Spule

Die induzierten Spannungen U_{i1} , bzw. U_{i2} sind sowohl von der Flussdichte B , als auch von der Geschwindigkeit des Magneten relativ zur Spule v_{rot} linear abhängig. Zudem gehen die Wicklungszahl n_s und die Leiterlänge l_s linear in die Spannungsberechnung ein (Formel: **[10]**).

$$U_{i1,2} = n_s \cdot B \cdot l_s \cdot v_{rot} \quad (3)$$

Da die Leiter oben und unten spulenbedingt zusammenhängen, induzieren sie Spannungen mit gegensätzlichen Vorzeichen. Im Folgenden wird die Spannung U_{i1} als positiv angenommen. In **Abbildung 11** werden die einzelnen Spannungen zunächst als positiv betrachtet. Durch das Subtrahieren der Spannungen wird der Vorzeichenunterschied berücksichtigt. Das Ergebnis entspricht der idealen induzierten Spannung U_i . Zu sehen ist, dass sich die U_{i1} und U_{i2} bei kleineren Spulendurchmessern D_s gegenseitig immer mehr aufheben würden, weshalb D_s möglichst groß gewählt wird.

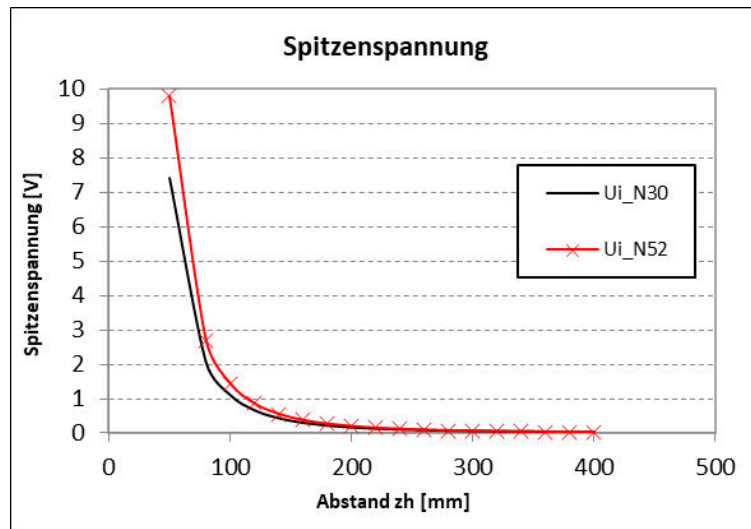


Abbildung 12: Spitzenspannungen bei variablem Abstand

Als Referenzwert für die Auswertungen wird der positive Spannungsppeak von U_i herangezogen. Dieser über den Abstand aufgetragen ergibt eine grafische Darstellung, wie sich U_i bei variierendem z_h verhält (**Abbildung 12**). Auch wenn dieser einer e-Funktion ähnelt, so folgt er doch keiner festen Funktion. Hier kommen die bereits erwähnten Magnete der Güteklasse N52 und N30, jeweils mit der Höhe von 5 mm und 10 mm, zum Einsatz. Diese unterscheiden sich durch die Stärke ihres Remanenzfelds. Da der genaue Wert des Magneten nicht ermittelt werden kann, wird der Mittelwert der jeweiligen Literaturangaben zu den Berechnungen herangezogen.

4.1 MATLAB Simulation

MATLAB ist ein von der Industrie und den Hochschulen gerne genutztes Programm, um beispielsweise Simulationen zu erstellen, Messdaten auszuwerten oder Berechnungen durchzuführen. Da diese Eigenschaften für die Bearbeitung dieser Aufgabenstellung benötigt werden, werden alle Auswertungen und Simulationen über MATLAB erfolgen. Zudem werden einige Diagramme in Microsoft Excel erstellt.

Größe	Variable	Wert	Einheit
Windungszahl	n	100	-
Remanenz N35	Br 35	1,195	T
Remanenz N52	Br 52	1,455	T
Durchmesser Spule	D _s	150	mm
Durchmesser Draht	d ₁	0,135	mm
Höhe Magnet	H	10	mm
Radius Magnet	R	10	mm
Drehzahl	rpm	800	1/min
Abstand vertikal	z _v	10 ... 300	mm
Abstand horizontal	z _h	-400 : 0,1 : 750	mm

Tabelle 3: Parameter der MATLAB Simulation

Die Simulation in MATLAB verwendet wie auch die Simulation in Excel die Gleichungen (1), (2) und (3). Auch hier werden alle relevanten physikalischen Größen eingepflegt. Die Zuweisung der Namen und Variablen ist der **Tabelle 3** zu entnehmen.

In einer Schleife wird nun jeder Wert des realen Abstands berechnet und in einem entsprechenden Vektor abgelegt. Zudem wird auch das Magnetfeld, welches an der Spule vorhanden ist, berechnet. Daraus kann nun die Spannung in jedem Leiter berechnet werden. Aus diesen wird der maximale Wert herausgelesen und nun über z_h geplottet. Das Ergebnis ist in **Abbildung 13** zu sehen.

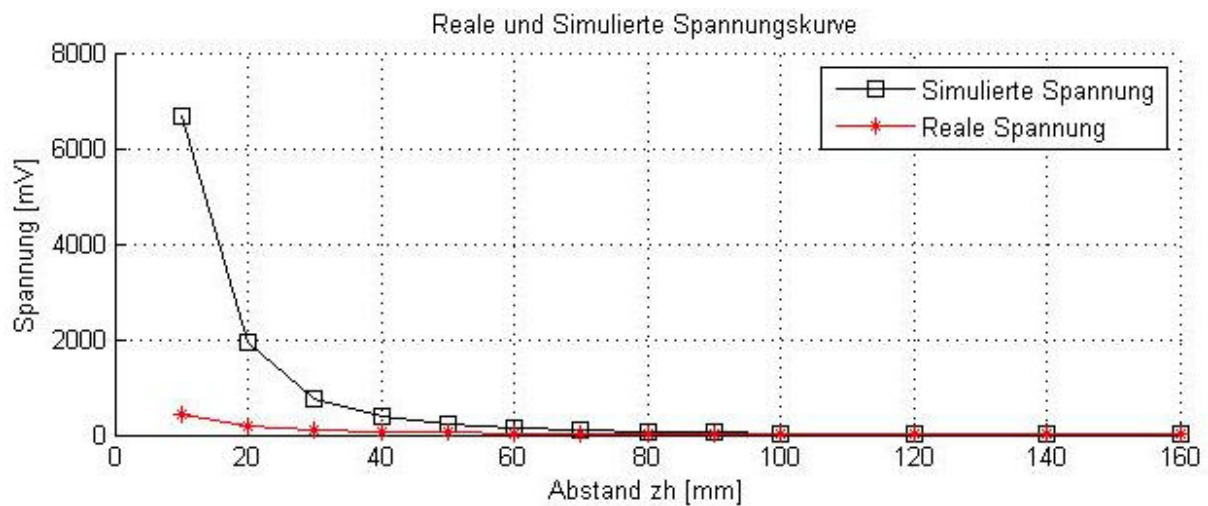


Abbildung 13: Simulation des Spannungsverlaufes über variablem Abstand

4.2 Prüfstand

Der erste Schritt besteht darin, die Sicherheit im Prüfstand herzustellen. Dazu wird eine Holzplatte mit den Maßen $2 \times 2 \text{ m}$ zwischen den Arbeitsplatz und der Arbeitsplatte aufrecht montiert, um den Schutz vor umherfliegenden Bauteilen zu gewährleisten. Im Anschluss wird der Rotor auf seinen festen Sitz am Motor geprüft. Der Magnet muss vollständig in der dafür vorgesehenen Bohrung versenkt sein und der Abstandhalter muss eingesetzt sein. Zudem muss die Öffnung mit Aluminium-Klebeband verschlossen sein. Des Weiteren wird er feste Sitz aller auf dem Tisch montierter Bauteile geprüft und auf etwaiges Spiel untersucht. Sobald diese Sicherheitsüberprüfung stattgefunden hat, kann der Prüfstand in Betrieb genommen werden.

Vor dem Start der Messungen ist eine Einarbeitung notwendig, um die Geräte bedienen zu können. Das beinhaltet die Verschaltung und Bedienung des Netzteils und des Oszilloskops. Der Motor wird zu Beginn mit zwei Leitungen mit dem Netzteil verbunden, um den Motor mit Leistung zu versorgen. Der Tastkopf des Oszilloskops besteht aus einer Krokodilklemme und einer Klemmhaken (**Abbildung 14**). Dieser wird an das positive Signal und die Krokodilklemme an das negative angeschlossen.



Abbildung 14: Tastkopf am Oszilloskop

Da es sich bei diesen Messungen aber um eine Wechselspannung handelt, wird das Oszilloskop so angeschlossen, dass der erste Spannungspunkt positiv ist. Das gewährleistet die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messungen. Nach der Verkabelung wird nun am Oszilloskop die Range (*Reichweite*) eingestellt.

Dazu wird die Zeit/Division und die Spannung/Division eingestellt, also wie groß der Anzeigebereich in X- und Y-Richtung ist. Die X-Achse, welche die Zeit darstellt, wird so eingestellt, dass zehn Perioden auf dem Bildschirm zu sehen sind. Das ist nötig, da ausschließlich der angezeigte Bereich später aufgenommen und abgespeichert wird. Dabei kann von der Drehzahl auf die Periodendauer geschlossen werden. Diese kann dann am Oszilloskop als Division-Breite eingestellt werden.

Die Y-Achse (Spannung) wird so eingestellt, dass die Spannungspeaks möglichst groß sind, ohne dabei außerhalb des Displays zu liegen und so Daten zu verlieren. Zu beachten ist, dass sich die Drehzahl bei $z_h < 30 \text{ mm}$ anders verhält als bei $z_h > 30 \text{ mm}$. Das liegt an der Nähe des Rotors zur Spule. Je kleiner der Abstand ist, desto mehr aerodynamische Interaktionen und Verwirbelungen entstehen. Das führt zu einem erhöhten Leistungsbedarf, um die Drehzahl zu halten (**Tabelle 4**).

Periodendauer [ms]	638	240	120	80	75
Drehzahl [1/min]	94	250	500	750	800
Abstand z_h [mm]	Leistung [W]				
10	1	6	36	125	148
20	1	6	38	123	147
30	1	6	38	120	147
> 30	1	6	38	120	147

Tabelle 4: Leistungsverhalten im Spulennahen Bereich

Die Drehzahl wird entweder mit einem Hand-Drehzahlmesser oder dem Oszilloskop eingestellt. Für den Handdrehzahlmesser muss zuvor achsnah ein Reflektor auf den Rotor geklebt werden. Der Hand-Drehzahlmesser strahlt ein Laser aus, welcher von dem Reflektor zurückgeworfen wird. Anhand der Laufzeit zwischen den zurückgeworfenen Lichtpulse kann die Drehzahl bestimmt werden. Genauer und einfacher ist allerdings das Einstellen mit dem Oszilloskop (**Abbildung 15**). Dazu wird auf der X-Achse die Periodendauer auf den entsprechenden Wert pro Division gesetzt. Jetzt kann die Leistung des Netzteils variiert werden, bis die Peaks der Spannung genau der Breite der Division entspricht. Die Leistung wird für spätere Messungen notiert.

Dabei ist darauf zu achten, dass Schwankungen auftreten können. Somit müssen vor jeder neuen Messreihe die Leistungsdaten stichprobenartig überprüft werden.

Sobald die entsprechende Leistung am Netzteil eingestellt ist, kann der Motor angeschaltet werden. Dazu hat das Netzteil ein On/Off- Button. Dieser schaltet den Ausgang. Sobald der Motor angeschaltet ist, beginnt der Rotor sich zu drehen. Dabei ist auf einen ruhigen Lauf und etwaige Vibrationen zu achten.

Um diesen zu gewährleisten, wird der Rotor zu Beginn der Messungen gewuchtet. Dazu wird das Gegengewicht linear auf dem Gewindestab verschoben und arretiert. Wenn nun der Rotor von Hand leicht angedreht wird, muss er sich im Gleichgewicht halten, es darf also keine Rotorseite immer unten sein. Wenn diese Bedingung gegeben ist, kann der Rotor gedreht werden. Beim ersten Wuchten wurde zudem ein Beschleunigungsmesser am Motor montiert, welcher Unwuchten detektieren kann und diese per Bluetooth an ein Smartphone sendet. Somit kann der Motor noch feiner ausgewuchtet werden. Nach einigen Versuchen stellt sich jedoch heraus, dass das Wuchten ohne Beschleunigungsmesser ausreichend ist. Selbstverständlich muss der Rotor nach jedem Wechsel der Magneten neu gewuchtet werden.

Wenn der Rotor dreht, die Drehzahl und das Oszilloskop eingestellt sind, kann gemessen werden. Dazu wird am Oszilloskop ein Triggerpunkt bei $t = 0$ gesetzt. Der Spannungswert des Triggers hängt vom Abstand zwischen Magnet und Spule, dem verwendeten Magnet und der Drehzahl ab. Es sollte jedoch stets so klein wie möglich gewählt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass er nicht zu klein sein darf, da er sonst manchmal Flanken „überspringt“ und somit der Messbereich verschoben wird.

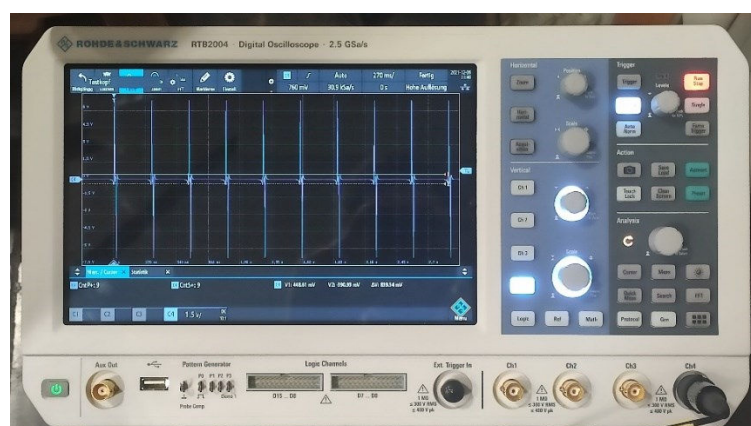


Abbildung 15: Optimaler Messbereich am Oszilloskop

Über die Run/Stop – Taste (rot) oben rechts (**Abbildung 15**) kann der Bildschirm eingefroren werden. Das ist hilfreich, um während des Speicherns ein konstantes Bild zu haben. Über den USB – Anschluss im unteren Bereich können jetzt sowohl ein Screenshot, also auch die Messdaten auf einem USB – Stick gespeichert werden. Sobald die Daten gespeichert sind, kann der Motor abgeschaltet werden und der Rotor läuft aus. Nach dem Stillstand können Veränderungen, wie Abstand verringern oder andere Spule einbauen, vorgenommen werden. Je nach Änderung ist danach eine erneute Sicherheitsüberprüfung des Prüfstands notwendig.

Die Benennung der Messdaten erfolgt nach der Reihenfolge, in der die Messmatrix geschrieben ist. Der Datei – Name **14.2.32** bezieht sich dabei auf die **14.** Messreihe, **2.** Versuch, Wert **32**. Die Messwerte können nun mit MATLAB ausgewertet werden. Der Screenshot dient als Referenz.

4.3 MATLAB Auswertung der Messdaten

Die Messwerte werden in CSV-Format aufgenommen. In diesem Format stehen der gemessene Spannungswert und der Zeitstempel in einer Zeile in Excel. Getrennt werden die beiden Informationen durch ein Komma. Jede Aufzeichnung beinhaltet zehn Perioden des Spannungsverlaufes (**Abbildung 16**).

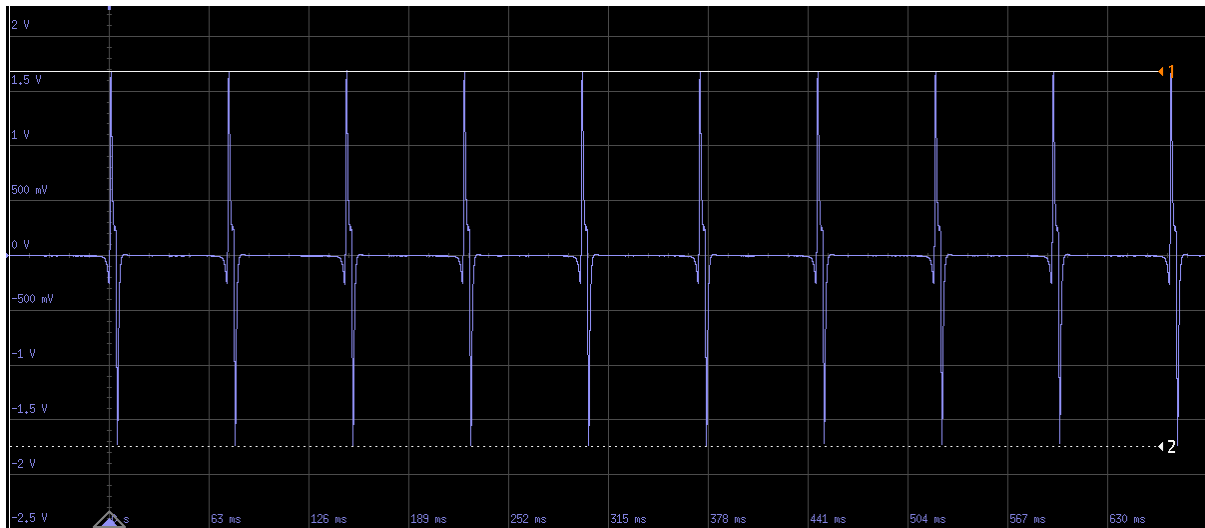


Abbildung 16: Aufgezeichneter Spannungsverlauf mit 10 Perioden

Diese werden zusätzlich zur CSV-Datei als Bild abgespeichert. Somit kann nachher das Ergebnis der Auswertung mit dem originalen Spannungsverlauf verglichen werden. Mit der Funktion `dlmread` kann diese die CSV-Datei in MATLAB eingelesen werden. Dabei werden automatisch die beiden Werte (Spannung und Zeit) aus der entsprechenden Zeile ausgelesen und in eigene Vektoren geschrieben. Diese werden jetzt in ms und mV umgerechnet, da diese Größen im weiteren Code-Verlauf sinnvoller sind und zudem eine bessere Übersicht bieten. Auch können hier bereits das Maximum und das Minimum ausgegeben werden. Diese beiden Werte entsprechen dem höchsten, bzw. dem niedrigsten Peak im Bereich der aufgezeichneten Zyklen.

4.3.1 Glätten

Da die Kurve durch Störungen teilweise verunreinigt ist, muss diese zuerst geglättet werden, um die Werte weiterverarbeiten zu können. Zum Glätten von Kurven bietet MATLAB verschiedene Funktionen. Eine davon ist das lineare Interpolieren von Kurven. Dabei werden die einzelnen Messpunkte mit einer Strecke verbunden. Durch Anpassen der Anzahl der Messpunkte, welche verbunden werden, wird so eine geglättete Gesamtkurve erreicht. Die Kurve kann dann mit der Funktion Spline noch einmal geglättet, bzw. abgerundet werden (**Abbildung 17**).

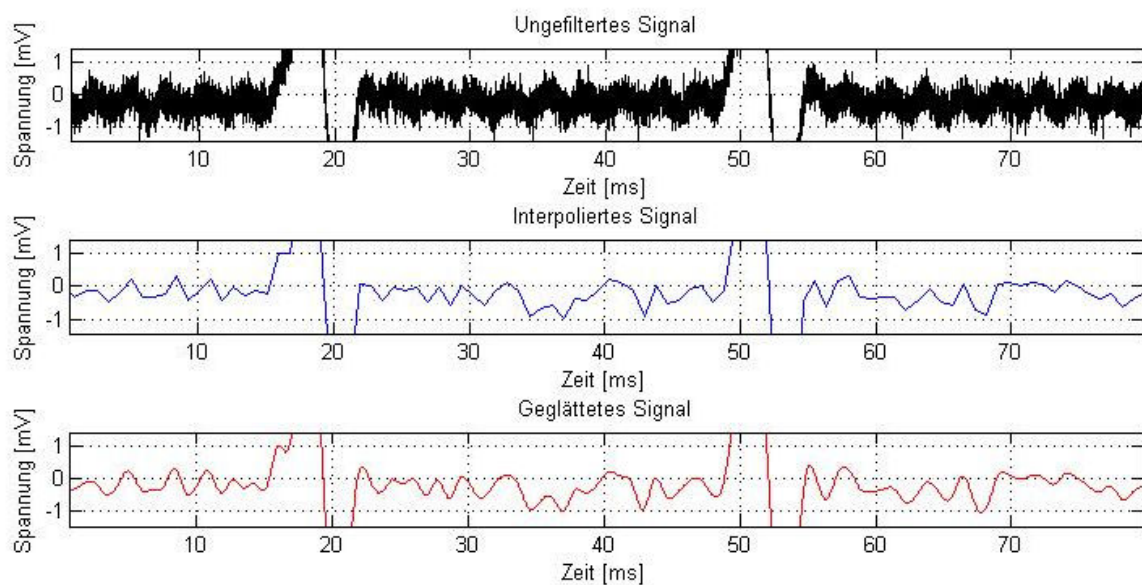


Abbildung 17: Interpolieren und Glätten eines verrauschten Messsignals

Da diese Art der Glättung aber an manchen Stellen zu einer ungewollten Verschiebung führt, wird die Kurve mit einer anderen Methode geglättet.

Durch eine Mittelwertbildung kann die Kurve beliebig stark geglättet werden. Somit kann ein Verlust von Daten durch zu starkes glätten und eine verrauschte Kurve durch zu geringes glätten vermieden werden. Die Mittelwertbildung folgt der Gleichung

$$U_m = \frac{1}{51} \cdot \sum_{k=-25}^{25} y_k = y_{(k)} + y_{(k+1)} + \dots + y_{(25)} \quad \text{für } k \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Wie hier dargestellt werden je 25 Werte vor und 25 Werte nach einem definierten Punkt summiert und anschließend durch 51 geteilt. Diese Werte sind beliebig wählbar, allerdings werden die Höchst- und Tiefstwerte dadurch minimal reduziert. Da diese Abweichung allerdings bei max. 0,5 % liegt, ist sie vernachlässigbar. Anwendung findet letztlich die oben angegebene Formel (4). Am Anfang und am Ende der Messungen werden je 25 Messwerte nicht berücksichtigt. Der Verlust an Daten durch die Löschung ist allerdings so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

4.3.2 Triggerpunkte

Die so geglättete Kurve wird jetzt in mehrere Teile geschnitten. Dazu werden Trigger-Punkte festgelegt (in **Abbildung 18** rotes und blaues Rechteck). Diese bewegen sich meist im Bereich zwischen 5 mV und 50 mV. Sie detektieren die steigenden, bzw. fallenden Flanken der Kurve und können so die einzelnen Spannungs-Peaks vom Rest der Kurve separieren.

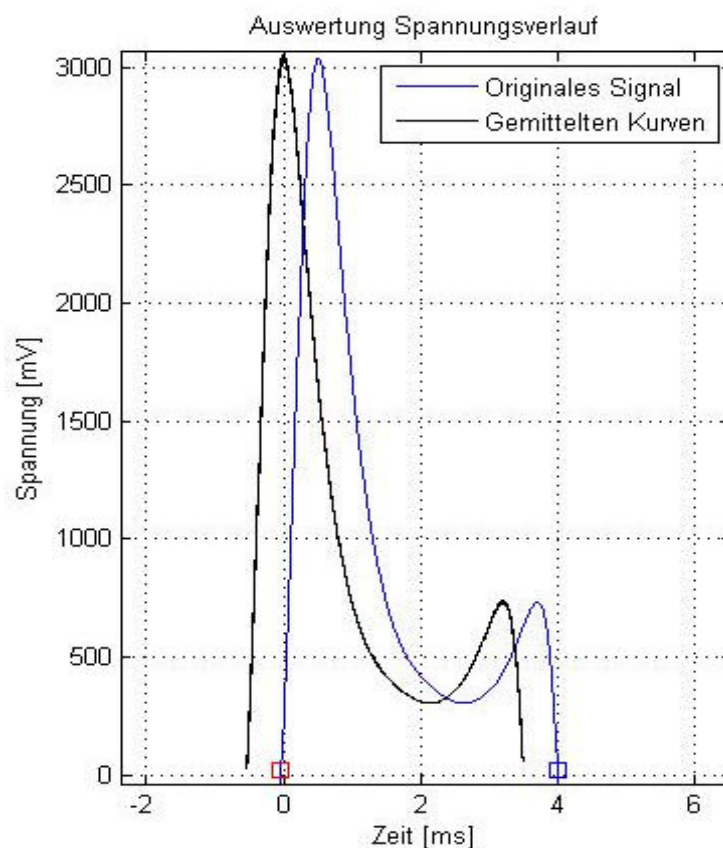


Abbildung 18: Triggerpunkte und gemittelte Verläufe

Dazu wird der Wert des Messpunktes an der zu untersuchenden Stelle mit dem Wert des folgenden Punktes verglichen. Wenn der Wert des ersten Punktes über dem des zweiten liegt, handelt es sich um eine fallende Flanke. Wenn der zweite Wert aber höher als der erste ist, um eine steigende. Die Spannungswerte zwischen der steigenden und fallenden Flanke werden in Vektoren geschrieben.

4.3.3 Kurvenkonstruktion

Mit Hilfe der Vektoren aus 4.3.2 können nun die zehn Kurven gezeichnet werden. Dies wird mit der MATLAB-Funktion *polyfit* realisiert. Durch das Einspeisen der Vektoren für den Spannungswert und die Zeit wird ein Polynom beliebigen Grades an die Punkte angelegt und kann als Funktion ausgegeben werden. In diesem Fall wird ein Polynom 30. Grades an die Kurven angelegt, da das Polynom sich hierbei ideal an die Messkurve anschmiegt, wodurch Fehler reduziert werden. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, werden nun die einzelnen Kurven auf den Nullpunkt geschoben, d.h. sämtliche Hochpunkte der Peaks liegen auf $x = 0$ (**Abbildung 18**). Hier kann man bereits die Schwankung der Spannungen bei den einzelnen Peaks herauslesen. Diese variieren, da die Differenz bei einer Spitzenspannung von 20 mV mehr in das Gewicht fällt als bei 20 V . Da aber die Spannungen $> 3\text{ V}$ für die Messungen relevant ist und hier die Abweichung bei 1% liegt, kann dieser Fehler vernachlässigt werden. Zudem findet im nächsten Schritt eine Mittelung der Kurven statt, was den Fehler nochmals minimiert.

4.3.4 Durchschnittskurve

Im letzten Schritt werden ausgehend vom Nullpunkt die einzelnen Vorfaktoren des Polynoms (C_0, C_1, \dots, C_{30}) und die Verschiebung der Kurve in vertikale Richtung gemittelt. Daraus kann nun ein Polynom, ebenfalls 30. Grades, erzeugt werden. Diese Kurve (**Abbildung 19, rot**) zeigt nun den gemittelten Wert aller zehn Spannungs-Peaks. Hieraus kann auf die mittlere Dauer des Peaks geschlossen werden.

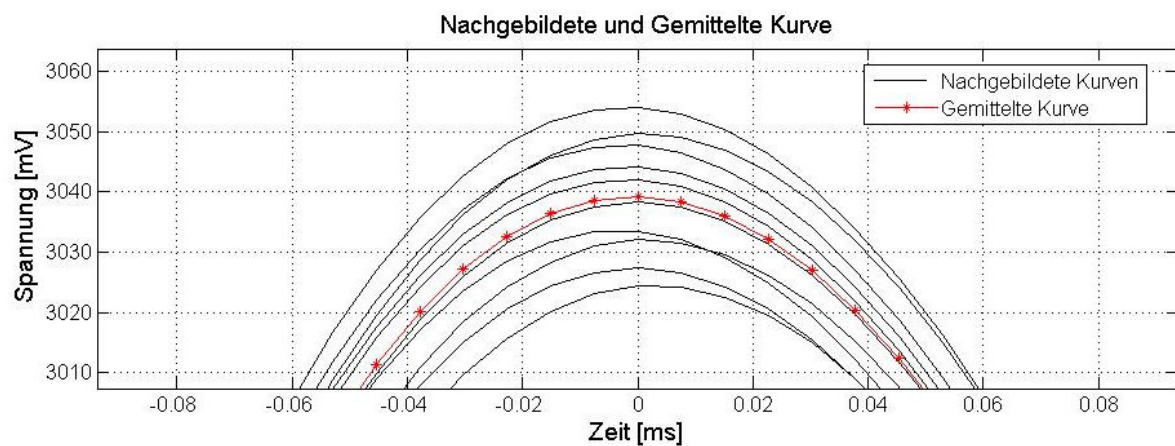


Abbildung 19: Nachgebildete und Gemittelte Kurven

4.3.5 Leistungsermittlung

Da die Gleichung des Polynoms jetzt bekannt ist, kann nun die Fläche unter der Kurve berechnet werden. Das Integral dient dazu, die Leistung bestimmen zu können, welche im Durchschnitt dauerhaft erzeugt werden kann. Da es sich hierbei um die Spannungskennlinie handelt, muss auch der Verlauf des Stromes berücksichtigt werden. Diese ähnelt der Spannungskurve qualitativ, da parallel zur induzierten Spannung der Strom induziert wird. Der Spannungsppeak und der Strompeak liegen also auf demselben Punkt auf der X – Achse. Somit ist hier keine separate Untersuchung notwendig. Die Dauerleistung wird benötigt, um ermitteln zu können, wieviel Energie eine Auswerte- und Sendeeinheit verbrauchen darf. Dazu wird ein Pufferspeicher zwischen die Leiter der Spule geschaltet. Hier wird die Energie solange zwischengespeichert, bis sie durch einen Verbraucher abgerufen wird.

Je nach Hardware kann auch ein einzelner Spannungsppeak ausreichend sein. Dafür wird die Fläche unter der Kurve in einem bestimmten Zeitraum betrachtet. Dieser wird von der Sendeeinheit, bzw. Auswerteschaltung vorgegeben.

4.4 Arduino

Der Arduino Uno wird ausschließlich für die Versuche genutzt und soll zeigen, dass die Detektion des Abstands möglich ist. Das Board wird über die bereits erwähnte Schaltung an den Gleichrichter und den Lastwiderstand angeschlossen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Polung stimmt. Der Analog-PIN des Arduino ist auf eine positive Schwellspannung von 3 V eingestellt. Wichtig ist also, dass der Gleichrichter so angeschlossen wird, dass die gleichgerichtete positive Spannung auch sicher an A5 anliegt. Die zweite Leitung wird auf GND gelegt. Da die Auswerteschaltung und der Arduino modular aufgebaut sind, muss die Schaltung jeweils mit entsprechenden Kabeln verschaltet werden (**Abbildung 20**).

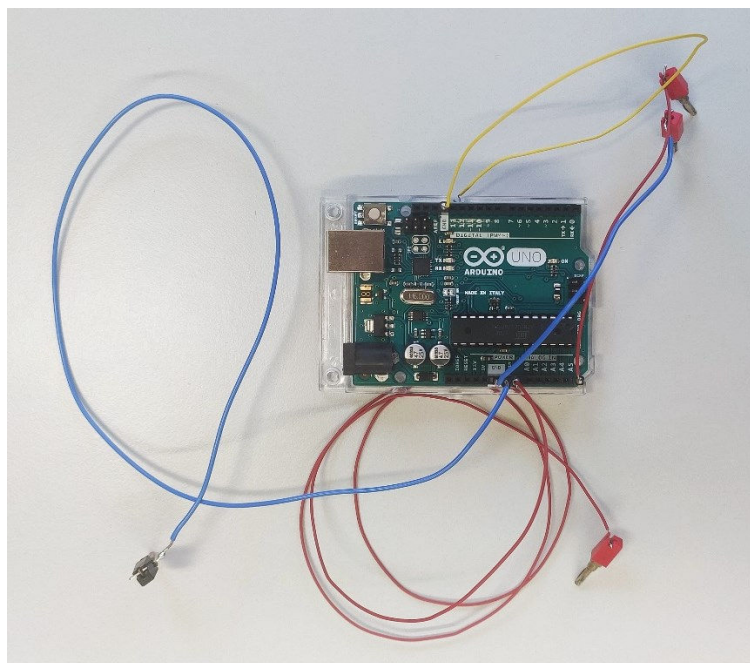


Abbildung 20: Arduino Uno mit Steckkabeln

Dies ist Teil der Versuchsdurchführung. Die LED und der Vorwiderstand dagegen sind fest am Board verbaut. Das Board wird während des Betriebs des Prüfstands auf dem Aluminiumträger hinter der Spule platziert und dort befestigt. Durch die erhöhte Lage kann auch auf einige Entfernung die LED-Anzeige gesehen werden, da während des Betriebs der Aufenthalt hinter der Schutzwand nicht erlaubt ist. Sobald die Induktionsspannung 3,6 V übersteigt, liegen, nach Abfall der 0,6 V am Gleichrichter, 3 V am Arduino an.

Der Pin A5 mit einer Samplerate von 9600 ausgelesen und gewährleistet so, dass die Spitzenspannungen zuverlässig erkannt werden.

Die Samplerate besagt, wie oft pro Sekunde ein Messwert ausgelesen wird. Sobald eine Spannung an A5 erkannt wird, die größer oder gleich der Schwellspannung ist, wird der Ausgang A13 HIGH geschaltet. Die LED leuchtet nun. Durch ein Delay im Arduino-Code bleibt die LED bis zum nächsten Spannungsspeak an. Somit leuchtet sie bei entsprechender Spannung dauerhaft. Sobald die Spannung an A5 unter 3 V fällt, geht die LED aus. Die Funktion der Abstandserkennung ist damit gegeben. Als Erweiterung der Arduinoschaltung wäre es denkbar, mehrere LEDs mit unterschiedlichen Farben einzubringen. Dadurch könnten mehrere Abstände angezeigt werden, indem mehrere Schwellwerte für die Spannung im Arduino hinterlegt werden und dieser je nach gemessener Spannung die entsprechenden LED einschaltet.

5. Ergebnisse

Um eine Aussage über die Machbarkeit des Projekts machen zu können, muss aus den oben definierten Parametern eine Aussage getroffen werden können. Wenn das Verhalten dieser Werte nachvollziehbar ist, kann eine Hochrechnung stattfinden. Damit kann ermittelt werden, welche Spannungs- und Leistungswerte im Bereich des Möglichen liegen und welche potentiellen Elektronikkomponenten dabei Verwendung finden. Dabei wird nach Parametern unterschieden, welche skaliert werden müssen und welche nicht. Um auf die Vorhersagen für die Spannung bei einer hohen V_{rot} machen zu können, muss der Parameter skalierbar sein, während beispielsweise die Magnetstärke derselben entspricht, die später zu Einsatz kommt. Somit ist dieser Wert der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Zudem kann im späteren Verlauf des Projekts entschieden werden, doch Magnete mit anderen Güteklassen zu nutzen.

5.1 Güteklasse

Der Zuwachs der Stärke des Magnetfelds B_{rz} lässt sich aus den beiden gemittelten Werten für das Remanenzfeld der Magneten berechnen.

$$B_{rz} = \left(1 - \frac{B_r 35}{B_r 52}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1,19}{1,455}\right) \cdot 100 \% = 18,21 \% \quad (5)$$

Um Messfehler bei dem Spannungszuwachs auszuschließen, wird jeder Messwert, der mit dem Magneten der Güteklasse N35 aufgenommen wird, mit dem Messwert des Magneten der Güteklasse N52 verglichen. Der dabei errechnete Faktor wird dann gemittelt. Dadurch werden Messfehler, welche bei einzelnen Messungen zu einer großen Abweichung führen würden, relativiert. Der so berechnete Zuwachs der Spannung beträgt im Durchschnitt als Faktor 1,19, bzw. 16 % (**Abbildung 23**). Die Steigerung der Spannung verläuft also annähernd linear mit dem Zuwachs des Magnetfelds. Diese Aussage kann allerdings nicht zweifelsfrei bestätigt werden, da für die Messungen ausschließlich zwei Güteklassen zur Verfügung stehen. Eine weitere Messung mit einer dritten Güteklasse würde das Ergebnis stichhaltiger machen. Dieser Wert kann, soweit bekannt, beliebig skaliert werden, solange die entsprechenden Magnete dazu verfügbar sind. Diese müssen sowohl der gewünschten Güteklasse als auch der Geometrie der vermessenen Magneten entsprechen.

5.2 Dicke und Durchmesser des Magneten

Die Auswirkung der Magnetdicke auf die Spannung wird mit Hilfe zweier Dicken untersucht. $H_1 = 5 \text{ mm}$ und $H_2 = 10 \text{ mm}$. Zur Verfügung stehen ausschließlich Magnete mit $H = 3 \text{ mm}$ und $H = 5 \text{ mm}$. Um die Dicke H_2 zu erreichen, werden zwei Magnete aneinandergeheftet. Der so entstandene Magnet entspricht einem Magnet mit der Dicke H_2 . Mit diesem werden nun Messungen mit variierendem Abstand und einer konstanten Drehzahl von $n_R = 800 \text{ 1/min}$ gemacht. Die Spannungswerte werden dann mit den Werten eines Magneten mit H_1 ins Verhältnis gesetzt.

Abstand [mm]	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
$U_{5\text{mm}}$ [mV]	102,0	60,1	37,5	24,0	16,0	11,1	8,0	5,8	4,2	
$U_{10\text{mm}}$ [mV]	196,0	116,0	71,0	45,8	30,4	20,6	14,2	10,4	8,0	
Faktor	1,92	1,93	1,89	1,91	1,90	1,86	1,78	1,79	1,90	1,88

Tabelle 5: Einfluss des Magnet-Durchmessers auf die Induktionsspannung

Um den Einfluss einzelner Messfehler auf das Gesamtergebnis zu reduzieren, werden die Faktoren von mehreren Abständen gemittelt. Die Faktoren werden bestimmt, indem die Spannung $U_{10\text{mm}}$ durch die Spannung $U_{5\text{mm}}$ geteilt wird. Zu erwarten ist, dass sich der Spannungswert durch die verdoppelte Dicke des Magneten ebenfalls verdoppelt. Allerdings beträgt der gemittelte Faktor nur 1,88 (**Tabelle 5**). Der Fehler zwischen dem erwarteten Faktor von 2 und dem ermittelten beträgt also 6 %.

Auch wenn sich die Spannung nicht linear vergrößert, kann doch eine Abschätzung gemacht werden. Für die Machbarkeit und die Abschätzung der zu erwartenden Werte ist dieses Ergebnis ausreichend. Für spätere Betrachtungen, bzw. genaue Bauteilauslegung und Kalibrierung muss die Untersuchung präzisiert werden.

Der Radius des Magneten R_M variiert zwischen 5mm , $7,5\text{mm}$ und 10mm . Es wird davon ausgegangen, dass sich der Spannungszuwachs linear zur zunehmenden Flussdichte verhält. Diese wird mit der Formel (1) und einem Abstand von $z_h = 20\text{mm}$ berechnet.

Magnetradius [mm]	10	7,5	5			
Flussdichte [T]	314,2	176,7	78,5			
Abstand [mm]	20	50	100	150	200	
U_{5mm} [mV]	934	148	39,6	12	8,5	
U_{7,5mm} [mV]	762	265	76	28	12,3	
U_{10mm} [mV]	1953	679	196	71	30,4	
Faktor 5-10	0,48	0,22	0,20	0,17	0,28	0,27
Faktor 5-7,5	1,23	0,56	0,52	0,43	0,69	0,55

Tabelle 6: Verhalten der Spannungen bei variablem Magnetdurchmesser

Das Verhältnis der Flussdichte B_{5mm} zu B_{10mm} beträgt 30 %, während das Verhältnis der Spannung nur 27 % beträgt (**Tabelle 6**). Diese Abweichung kann auf Schwankungen in der Güteklasse der Magnete oder Messungenauigkeiten zurückgeführt werden.

Dagegen beträgt das Verhältnis von B_{5mm} zu $B_{7,5mm}$ 48,1 %. Die Spannung reduziert sich ebenfalls und beträgt jetzt nur noch 55 %. Hier liegen also 6,9 Prozentpunkte dazwischen. Nach der Berücksichtigung der Güteklassetoleranz ergibt sich eine Differenz von 5,2 %. Dieser Wert kann aber wie zuvor auf Fehler oder Ungenauigkeiten bei der Messung zurückgeführt werden. Somit kann festgestellt werden, dass die Spannung prinzipiell der Stärke des Magnetflusses folgt. Um präzises Aussagen über die Fehler durch die Messung treffen zu können, müssten die Magnete vermessen werden, um deren wahre Parameter zu kennen. Dann können erneut Messungen zu diesem Punkt durchgeführt werden.

5.3 Anzahl der Wicklungen

Die Wicklungszahl gehört neben der Güteklasse des Magneten zu den Parametern, deren Auswirkung auf die Spannung sich am besten vorhersagen lässt. Außerdem kann sie je nach Anwendung beliebig variiert werden. Die Messungen erfolgen mit Spulen mit den Wicklungszahlen $n_s = 10, 20, 50, 100, 200$ und 1000 . Durch den großen Bereich der Wicklungszahlen und die vielen einzeln messbaren Stützwerte dazwischen kann eine stichhaltige Aussage über den Einfluss der Wicklungszahl auf die Spannung getroffen werden (**Abbildung 21**). Zu Beginn wird angenommen, dass die Spannung linear mit steigender, bzw. sinkender Wicklungszahl steigt, bzw. fällt.

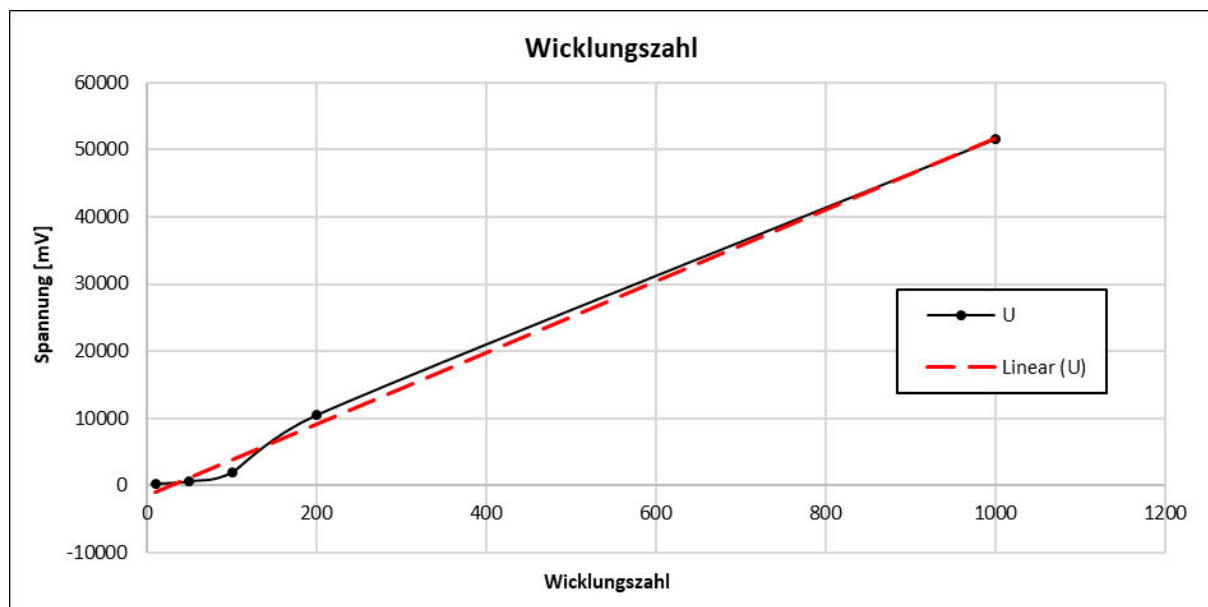


Abbildung 21: Spannungsverlauf bei variabler Wicklungszahl

An den Messungen ist zu erkennen, wie die Spannung der zunehmenden Wicklungszahl folgt. Der Ausreißer bei $n_s = 100$ kann auf einen Messfehler zurückgeführt werden, da sich die Spannung bei den anderen Messpunkten, bzw. Wicklungszahlen sehr linear verhält. Wäre das nicht der Fall, müssten weitere Messungen zwischen $n_s = 200$ und $n_s = 1000$ gemacht werden, bzw. darüber hinaus. Für die geplante Anwendung kann aber das Verhalten der Spannung als linear angesehen werden.

5.4 Drahtdurchmesser

Der Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Spannung ist zu Beginn nur schwer vorherzusagen. Grund dafür ist, dass sich die Fläche und die Menge des Leitermaterials zwar vergrößert, unklar ist aber, inwiefern sich das auf die Spannung auswirkt.

Für die Messungen kommen Leiter mit den Durchmessern $D_D = 0,1 \text{ mm}, 0,315 \text{ mm}, 0,63 \text{ mm}$ und $1,3 \text{ mm}$ zum Einsatz. Für die Untersuchung wird das Verhalten der Spannung mit dem Durchmesser, sowie mit der Querschnittsfläche A_D des Leiters verglichen, um hier mögliche Zusammenhänge zu finden. Wie auch bei den vorhergehenden Messungen wird diese mit einer Drehzahl von $n_R = 800 \text{ 1/min}$ und variierendem Abstand z_h gemacht.

Drahtdurchmesser [mm]	0,1	0,315	0,63	1,3		
Kreisfläche [mm ²]	0,0079	0,0779	0,3117	1,3273		
Abstand [mm]	10	20	50	100	150	200
$D_D = 0,1 \text{ mm}$	-	303	72,4	16,9	5,6	2,5
$D_D = 0,315 \text{ mm}$	904	414	94,5	20,8	6,7	2,9
$D_D = 0,63 \text{ mm}$	1082	423	99,9	24	8,5	3,9
$D_D = 1,3 \text{ mm}$	1239	448,7	99	23,1	8,1	3,6

Tabelle 7: Verhalten der Spannung bei variablem Leiterdurchmesser

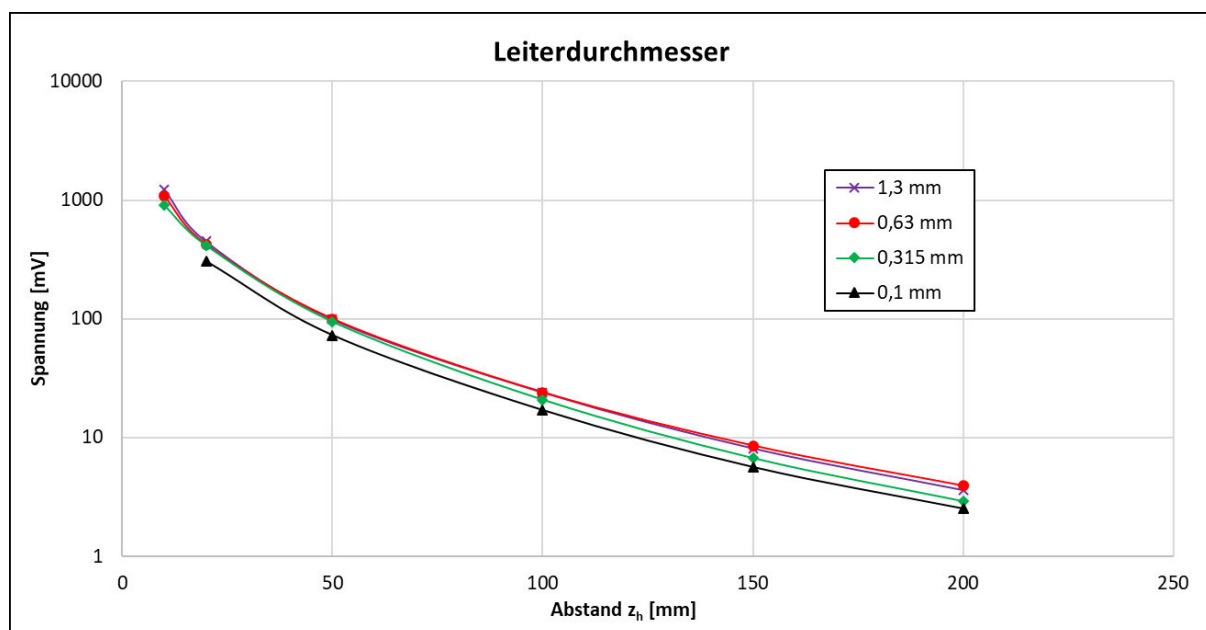


Abbildung 22: Spannungsverlauf bei variablem Leiterdurchmesser

In **Tabelle 7** und **Abbildung 22** ist zu sehen, wie die Spannung bei dickeren Durchmessern zunimmt. Um die Ursache dafür zu finde, werden die Messwerte von $D_D = 0,1\text{ mm}$ und $D_D = 1,3\text{ mm}$ ins Verhältnis gesetzt, um durch die große Differenz den Einfluss etwaiger Messfehler zu reduzieren. Bei $z_h = 20\text{ mm}$ beträgt die Spannung $U_{0,1\text{mm}} = 303\text{ mV}$ und $U_{1,3\text{mm}} = 448,7\text{ mV}$. Das entspricht einem Zuwachs 48,1 %. Die Kreisfläche ist somit nicht die Hauptursache, da sie ihr Zuwachs in einer anderen Größenordnung bewegt (Faktor 168). Der Faktor für den Leiterdurchmesser beträgt 13 und ist somit ebenfalls um ein Vielfaches größer als der Spannungszuwachs. Es kann keine Aussage über den Zuwachs, bzw. dessen Ursache bei zunehmenden Leiterdurchmesser getroffen werden. Der Verlauf der verschiedenen Spannungen ist in **Abbildung 22** zu sehen.

5.5 Kantenlänge und Spulendurchmesser

Diese beiden Parameter werden zusammen aufgeführt, da sie letztlich dasselbe abbilden. Die Kantenlänge zu Beginn der Messungen entspricht der horizontalen Leiterlänge der Spule. Bei den später verwendeten runden Spulen entspricht dieses Maß dem Durchmesser. Dieses Maß ist deshalb als Parameter aufgeführt, da in diesem Leiterteil die Spannung induziert wird. Die Annahme ist, dass je länger der Leiter, also je breiter die Spule gebaut ist, umso mehr kreuzen die Feldlinien des Magnets den Leiter und induzieren somit eine Spannung. Das ist möglich, da sich das Magnetfeld des Magneten nicht nur auf derselben Kreisfläche wie der des Magneten selbst ausdehnt, sondern auch seitlich streut und somit auch eine größere Breite des Leiters kreuzt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Leiterlänge auf die induzierte Spannung wird zuerst eine Spule mit einer Leiterlänge von 110 mm vermessen. Im Anschluss wird ausschließlich die Spule durch eine andere mit 150 mm Leiterlänge ersetzt. Drehzahl, Abstand und Magnet bleibt dabei gleich. Zudem wird eine runde Spule mit dem $D_S = 150\text{ mm}$ vermessen, um einen möglichen Einfluss von der Rundung des Leiters zu finden.

3. Messung, Leiterlänge					
Anzahl Wicklungen	-	10		Leiterlänge [mm]	Spannung [mV]
Draht-Durchmesser	mm	0,315		110	188
Kantenlänge Spule	mm	110/150		150	187,3
Abstand Spule/Magnet	mm	20			
rpm Magnet	1/min	800			
Güteklasse Magnet	-	N52			
Dicke Magnet	mm	10			

Tabelle 8: Spannungsänderung bei variabler Leiterlänge

Bei der Auswertung der Messdaten in **Tabelle 8** fällt auf, dass die Spannung bei dem längeren Leiter um 0,4 % fällt. Allerdings ist auch hier eine mögliche Messungenauigkeit zu berücksichtigen. Es ist davon auszugehen, dass der Einflussbereich des Magnetfelds nicht so sehr streut wie angenommen. Somit wird die Spannung nur auf einem Teil der Leiterlänge induziert. Durch die Vermessung von Spulen mit noch kürzeren Leiterlängen ließe sich der Einflussbereich des Magnetfelds als Funktion über den Abstand z_h darstellen. Da dies aber bei dem hier zu erwartenden Anwendungsfall nicht notwendig ist, wird dieser Umstand nicht weiter untersucht. Die Leiterlänge hat also weder im geraden Leiter (rechteckige Spule) noch im gekrümmten Leiter (runde Spule) eine Auswirkung auf die Spannung.

5.6 Abstand Magnet – Spule

Dieser Parameter gehört zu den wichtigsten, welche in dieser Arbeit untersucht werden. Der Abstand zwischen Magnet und Spule entspricht dem Abstand der beiden Blattspitzen. Diese zu detektieren und anhand der Spannungen präzises berechnen zu können ist ein das Hauptziel.

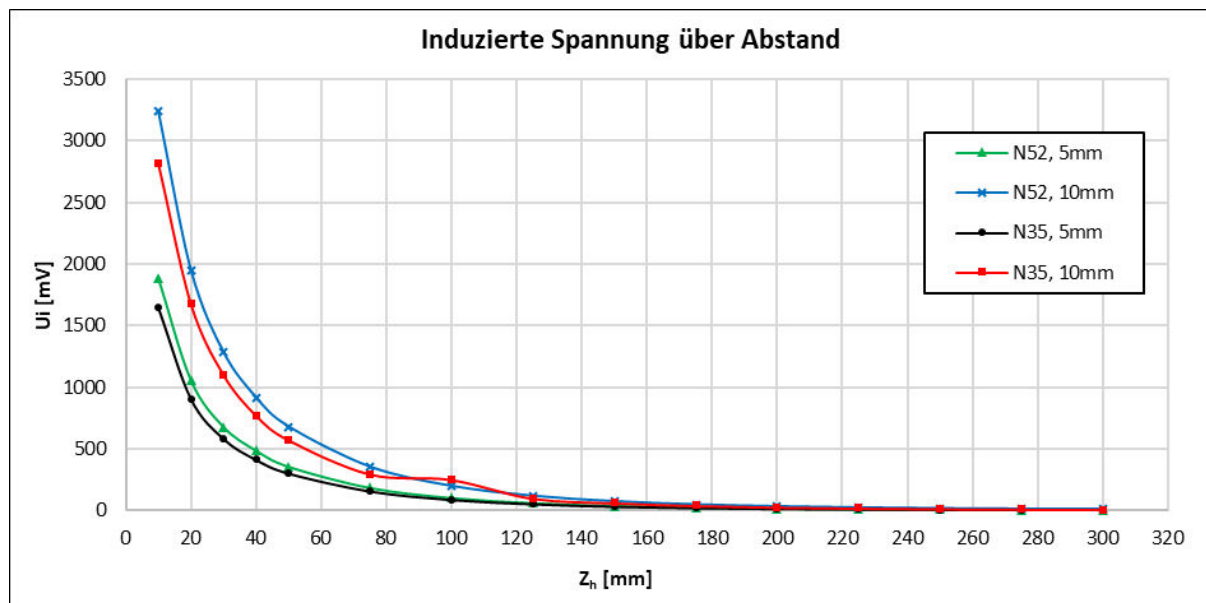


Abbildung 23: Spannungsverlauf bei variablem Abstand

Die in **Abbildung 23** dargestellte Kurve entspricht keiner gängigen Kurvenfunktion, verläuft also weder logarithmisch noch exponentiell. Das macht die Beschreibung des gesamten Verlaufs schwierig. Da in diesem Anwendungsfall allerdings hauptsächlich $z_h > 100\text{mm}$ untersucht werden soll, kann die Kurve auf diese Werte reduziert werden. Dabei kann auch ein Polynom 6. Grades angenähert werden (**Abbildung 24**).

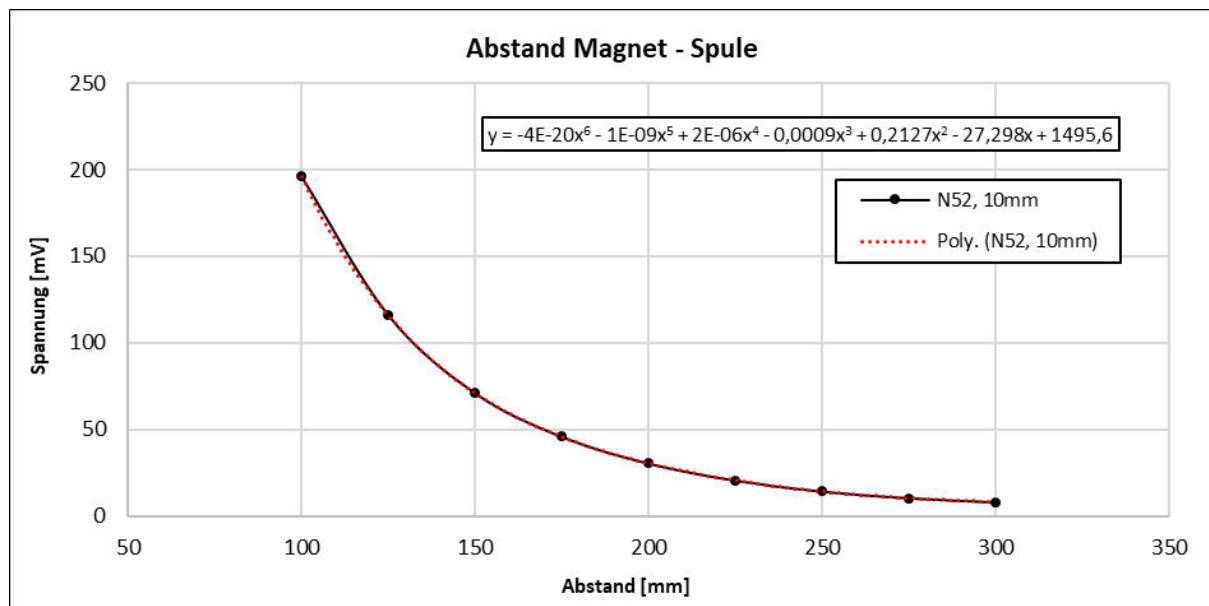


Abbildung 24: Spannungsverlauf bei $z_h > 100\text{mm}$

Diese Kurvengleichung darf dann allerdings ausschließlich für die Berechnung der Werte im bekannten Bereich genutzt werden, da sonst Abweichungen auftreten können. Das Polynom eignet sich also nicht zum hoch-, bzw. runterskalieren, sondern beschreibt lediglich den relevanten Bereich der Kurve. Allerdings deckt sich die Messung nicht mit der MATLAB-Simulation. Es müssen also auch in Zukunft für neue Magnete Messungen gemacht werden, anhand derer sich dann der Spannungsverlauf beschreiben lässt.

5.7 Rotordrehzahl

Die Drehzahl des Rotors gehört zu den Parametern, welche unbedingt skalierbar sein müssen. Grund dafür ist die bereits erwähnte Situation, dass am Prüfstand nicht die Relativgeschwindigkeit zwischen Magnet und Spule wie im realen Anwendungsfall erreicht werden kann.

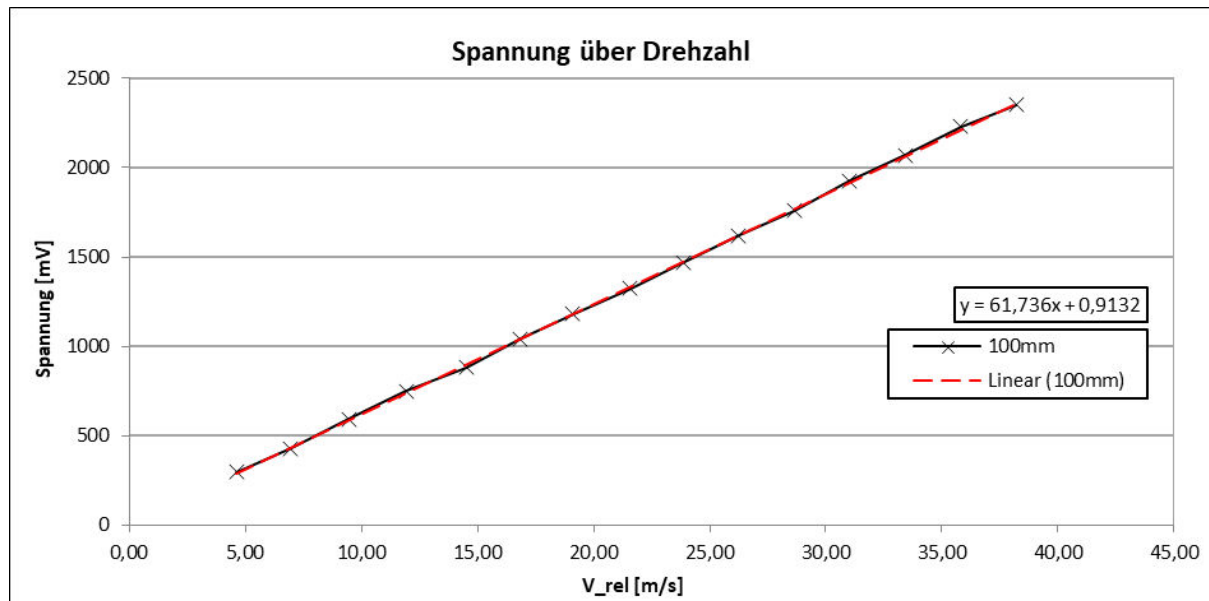


Abbildung 25: Spannungsverlauf bei variabler Drehzahl

Wie in **Abbildung 25** zu sehen, verhält sich die Spannung absolut linear zur Drehzahl und damit auch zur relativen Geschwindigkeit v_{rot} . Da im realen Anwendungsfall die Geschwindigkeit zwischen Magnet und Spule bei $298,8 \text{ m/s}$ [7] liegt, kann die Spannung mit Hilfe der in **Abbildung 25** angegebenen Gleichung entsprechend hochskaliert werden. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die entsprechenden Randbedingungen gegeben sind, d.h. die Spule und der Magnet identisch sind.

Da dieser Parameter über einen großen Bereich skaliert werden muss, lohnt es sich, das Verhalten der Spannung auch über einen anderen Weg zu beschreiben, um etwaige Abweichungen im hohen Drehzahlbereich, bzw. Geschwindigkeitsbereich reduzieren zu können.

Dazu werden lastfreie Messungen bei acht unterschiedlichen Drehzahlen gemacht. Bei jeder Messung wird dabei die Spannung über den Abstand aufgetragen. Diese Kurve verhält sich wie in **Abbildung 23** dargestellt. An jede dieser Kurven wird nun eine Exponentialfunktion angenähert. Diese wird mit den beiden Faktoren a und exp beschrieben.

$$y = a * e^{exp * x} \quad (6)$$

Die beiden Faktoren werden nun in einem Diagramm über die Drehzahl aufgetragen (**Abbildung 26**).

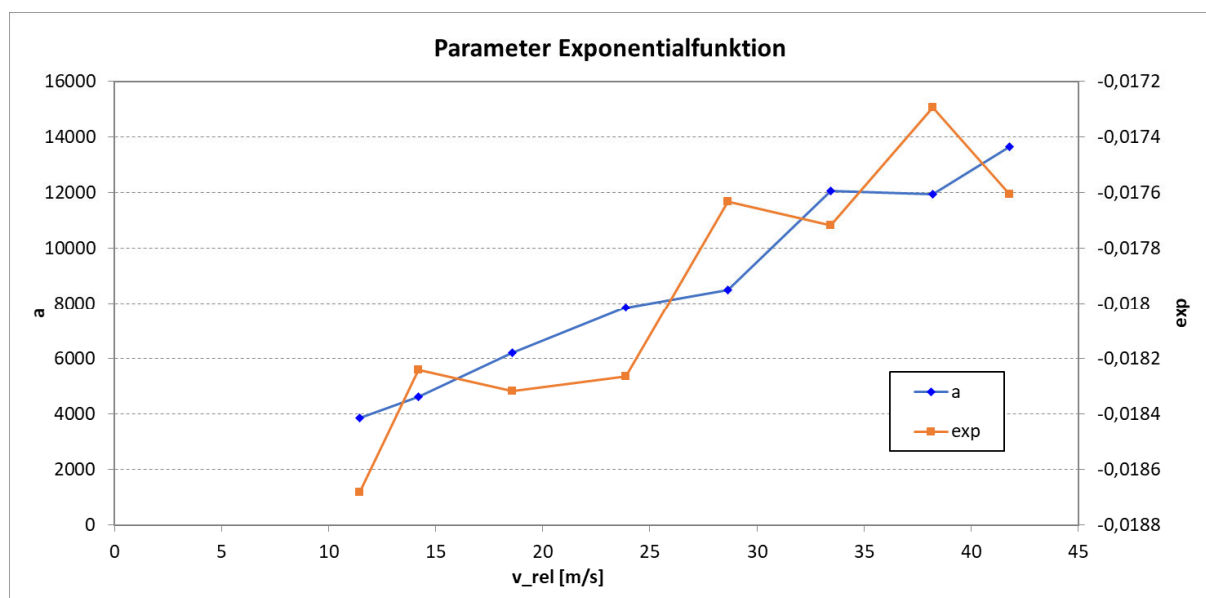


Abbildung 26: Parameter der Exponentialfunktion bei variabler Drehzahl

Einige Störungen, vor allem beim Parameter exp , sind auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich beide Parameter annähernd linear verhalten. Zusätzlich werden Messungen bei den gleichen Geschwindigkeiten und Abständen mit einer Last von 25Ω gemessen. Hier findet die selbe Auswertung der Parameter wie in den lastfreien Messungen statt. Über das Verhältnis der Parameter der lastfreien zur belasteten Schaltung lässt sich ein Zusammenhang herstellen. Ziel ist es, aus lastlosen Messdaten das Verhalten mit Last berechnen zu können. Das Verhältnis der Parameter kann jetzt mit Hilfe eines Trends beliebig hoch und runterskaliert werden. Für die Skalierung im Bereich der bekannten Messungen ergeben sich folgende Ergebnisse (**Tabelle 9**).

Über Exponentialregression				
Verhältnis a		8,4567	15,3021	25,4246
Verhältnis exp		0,8222	0,7476	0,6373
a		1615,4810	3163,1810	3945,4594
exp		-0,0214	-0,0164	-0,0110
				Fullscale
Geschwindigkeit [m/s]	41,8	41,8	150	310
Abstand [mm]				
50	620	554	1391	2272
100	196	190	611	1309
150	64	65	269	754
200	16	22	118	434
250	7	8	52	250
300	4	3	23	144

Tabelle 9: Exponentialregression

Die erste Spalte mit 41,8 m/s bildet die originalen Messergebnisse ab. Die folgende Spalte die Daten, welche über die Regression bei derselben Drehzahl, bzw. Geschwindigkeit errechnet wurden. Die Abweichung ab $z_h > 100\text{mm}$ ist dabei marginal. Mit der Regression kann nun beliebig hochskaliert werden. Für den Endwert, welcher später im Hubschrauber erwartet wird, ergibt sich so eine Spannung von 2272 mV.

6. Fazit

Wie die Ergebnisse in Kapitel 5. zeigen, kann die Machbarkeit eines solchen Sensors als nachgewiesen betrachtet werden. Es ist zu erwarten, dass sowohl die Spannung als auch die Leistung, welche in der Spule induziert wird, ausreichend ist, um eine entsprechende Sendeeinheit zu betreiben. Ob diese in Zukunft aus einer dauerhaft betriebenen Auswerteeinheit oder der vorgestellten EnOcean – Technologie bestehen wird, kann an dieser Stelle nicht abschließend gesagt werden. Das ist davon abhängig, welche Kriterien der Sensor erfüllen soll. Wird nur, wie in dieser Arbeit angenommen, ein Warnsignal bei Unterschreitung eines Mindestabstands ausgegeben, kann mit einer Auswerte- und Sendeeinheit von EnOcean gearbeitet werden. Soll allerdings eine dauerhafte Überwachung gefordert werden, so muss die Auswerteeinheit auch über die ganze Zeit arbeiten. Dann muss eine neue Schaltung für die Auswertung und die Kommunikation mit dem Empfänger im Cockpit entworfen und getestet werden.

Die Parameter sind weitgehend untersucht und größtenteils ohne weiteres skalierbar. Allerdings sollte das Verhalten der Leistung bei unterschiedlicher Drehzahl und variablem Abstand erneut untersucht werden, da hier das Verhalten bei einer Skalierung nicht mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden kann, was u.a. auf die kleinen Messbereiche des Prüfstands zurückzuführen ist.

Die bis hierher erzielten Ergebnisse bilden eine solide Basis, um weitere Messungen zu machen und Prototypen fertigen zu können. Ebenso sind die Machbarkeit und prinzipielle Funktion nachgewiesen.

7. Ausblick

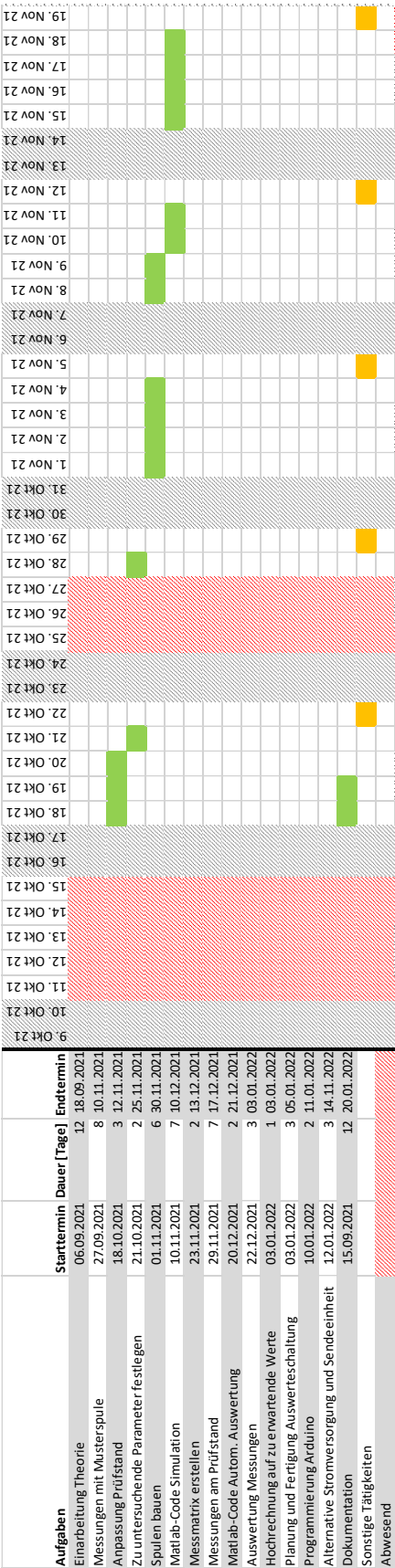
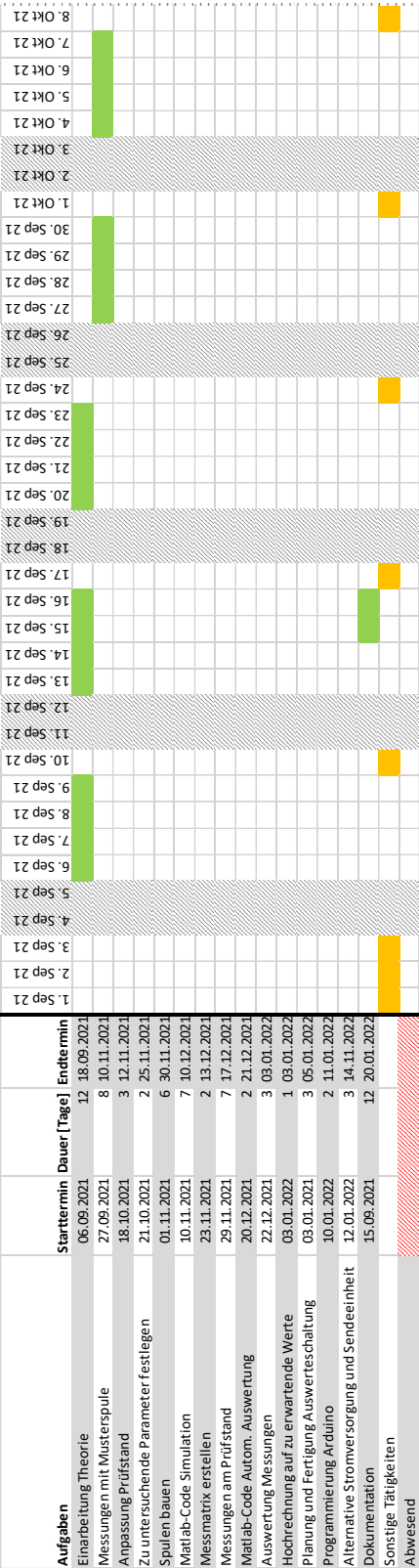
Der nächste Schritt in der Entwicklung dieses Sensors wäre nun, eine funktionstüchtige Sendeeinheit auszulegen, in den vorhandenen Prüfstand zu integrieren und zu testen. Sobald diese wie gewünscht arbeitet, kann der Prototyp am Prüfstand als vollständig und funktionstüchtig angesehen werden. An dieser Stelle sollten dann eine abschließende Untersuchung und Abschätzung zur Einsatzfähigkeit im System Hubschrauber getätigt werden. Anschließend würde dann die Fertigung eines Prototyps im realen Maßstab folgen, also mit sämtlichen skalierten Parametern. Bei diesem kann dann auch über den experimentellen Einsatz im fliegenden System nachgedacht werden. Sobald auch dieser Schritt erfolgreich bestanden wird, steht ein funktionstüchtiger und einsatzbereiter Abstandssensor bei Koaxialhubschraubern zur Verfügung.

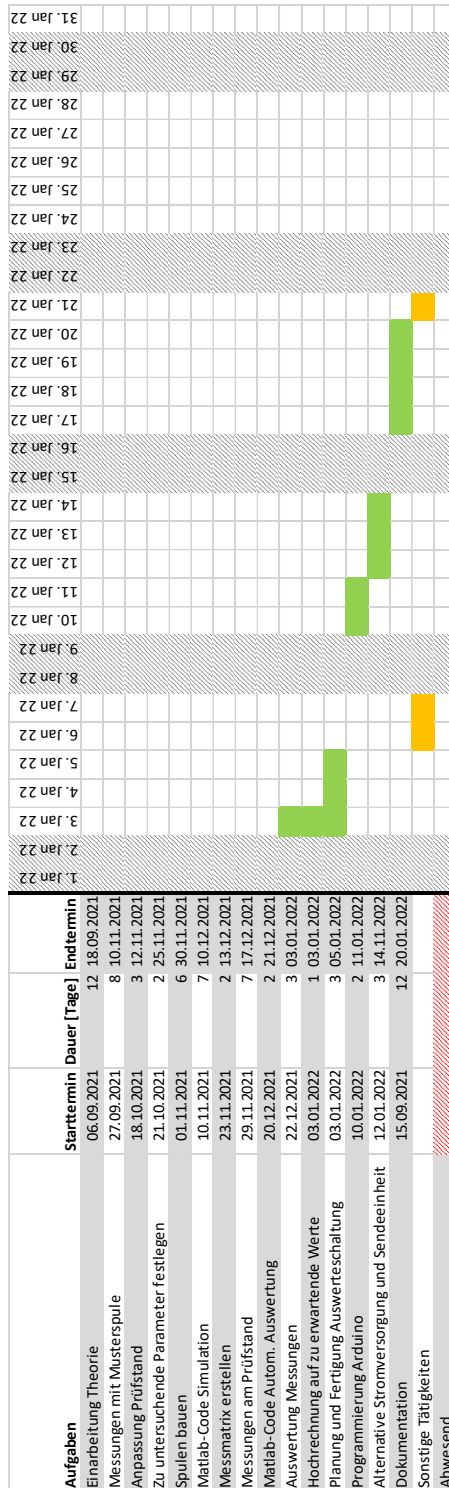
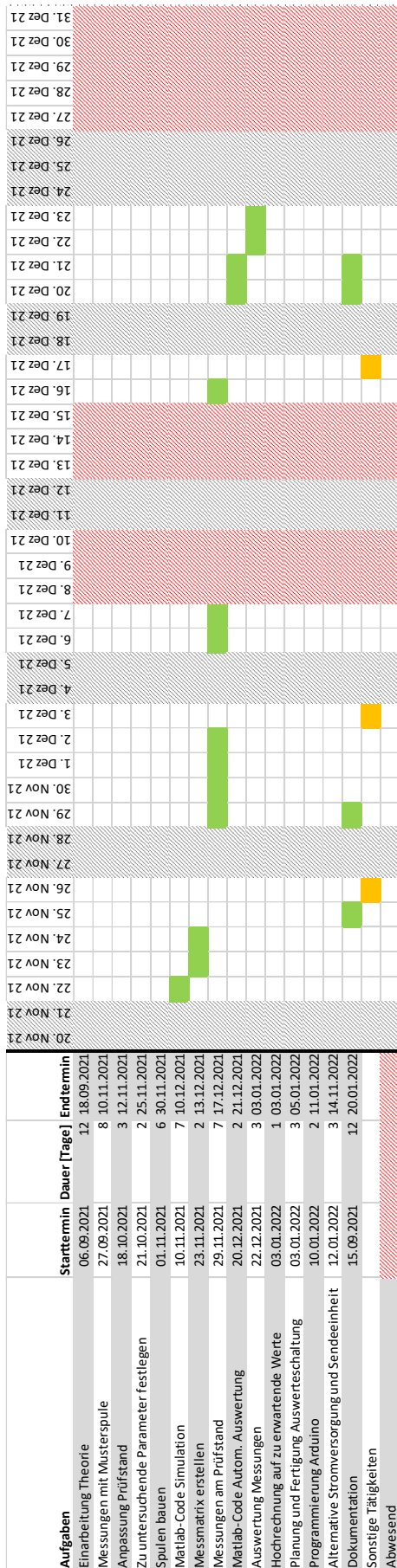
8. Quellen

- [1] Oliver Schneider, Patentschrift DE 10 2019 102 419 B4, "Vorrichtung zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands bei Koaxialrotoren", 07.01.2021, Deutsches Patent- und Markenamt
- [2] <https://edm-aerotec.de/coax2d/>
(Stand: 29.11.2021)
- [3] <https://edm-aerotec.de/erste-deutsche-ulh-musterzulassung/>
(Stand: 30.11.2021, Autor: edm aerotec GmbH)
- [4] Roland Feil, Markus Rinker, Manfred Hajek, 09.05.2017, "Flight Testing of a Coaxial Ultralight Rotorcraft", Online
- [5] www.xpertgate.de/produkte/Lasersensoren.html
(Stand: 29.11.2021)
- [6] <https://www.wileyindustrynews.com/news/konfokal-chromatische-sensoren-liefern-glasklare-messwerte>
(Stand: 07.01.2022)
- [7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Glättungskondensator>
(Stand: 22.01.2021)
- [8] <https://www.magnet-shop.net/wissenswertes/kenndaten>
(Stand: 08.11.2021)
- [9] <https://www.supermagnete.de/faq/Wie-berechnet-man-die-magnetische-Flussdichte>
(Stand: 01.12.2021)
- [10] Hans Fricke, Franz Moeller, Paul Vaske, (1967) "Grundlagen der Elektrotechnik", 13. Auflage, Stuttgart

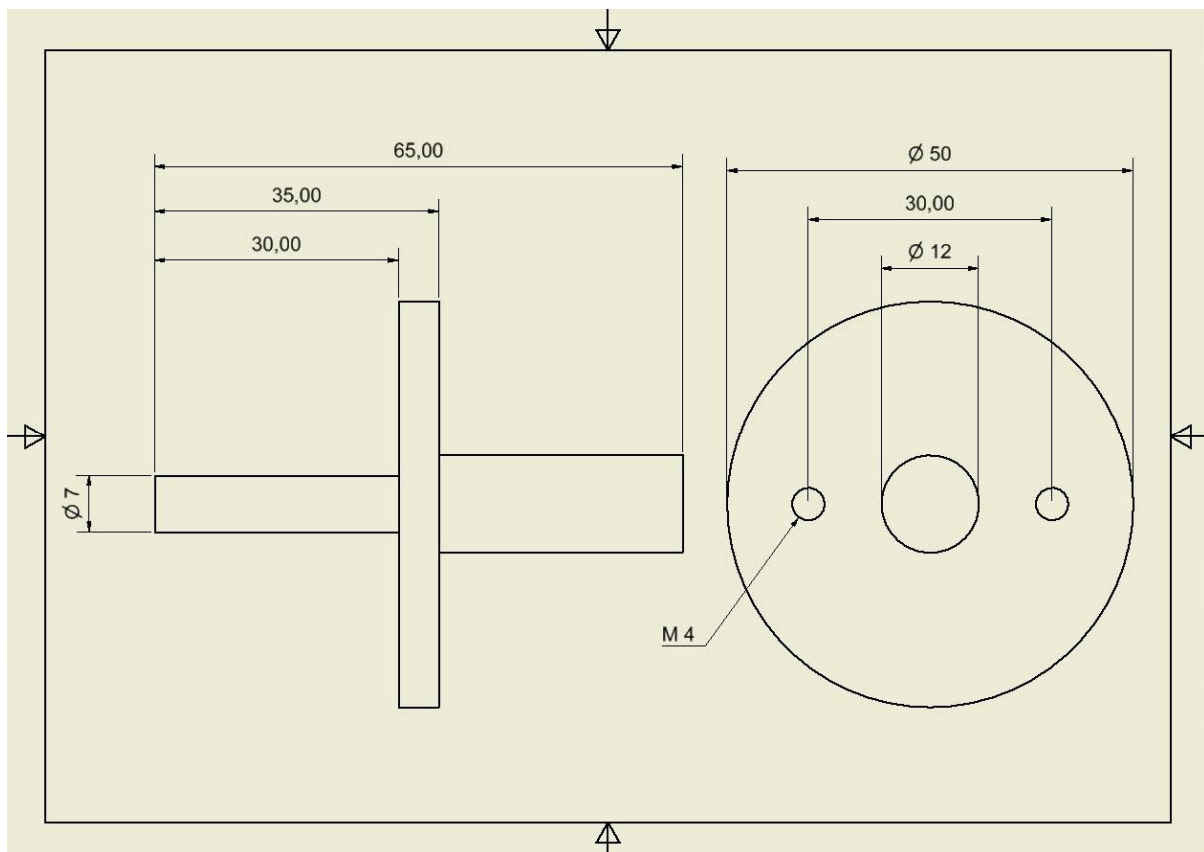
Anhang

1. Zeitplan





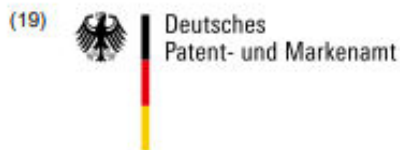
2. Zeichnung Aufnahme Wicklungsmaschine



3. Messung 17

17. Messung												
Anzahl Windungen	-	1000										
Draht-Durchmesser	mm	0,25										
Kantenlänge/Durchmesser Spule	mm	150										
Abstand Spule/Magnet	mm	-										
rpm Magnet	1/min	-										
Güteklasse Magnet	-	N52										
Dicke Magnet	mm	10										
Widerstand	Ohm	50										
V _{rel}		4,63	6,97	9,45	11,94	14,52	16,86	19,10	21,58	23,88	26,26	28,65
Drehzahl		97	146	198	250	304	353	400	452	500	550	600
Spannung [mV] bei												
Abstand: 20 mm (ohne Last)		7260	9940	13320	16890	20070	23540	26810	30270	33720	36820	40820
Abstand: 100 mm (ohne Last)		296	427	592	748	880	1040	1180	1325	1470	1620	1760
Abstand: 100 mm (mit Last)		64	106,7	139	168	199	227	258	285	307	331	351
Strom [mA]		1,28	2,134	2,78	3,36	3,98	4,54	5,16	5,7	6,14	6,62	7,02
Leistung [mW]		0,082	0,228	0,386	0,564	0,792	1,031	1,331	1,625	1,885	2,191	2,464

4. Patentschrift



(10) **DE 10 2019 102 419 B4** 2021.01.07

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2019 102 419.6**

(22) Anmeldetag: **31.01.2019**

(43) Offenlegungstag: **06.08.2020**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **07.01.2021**

(51) Int Cl.: **B64C 27/10 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
51147 Köln, DE**

(74) Vertreter:

**REHBERG HÜPPE + PARTNER Patentanwälte
PartG mbB, 37073 Göttingen, DE**

(72) Erfinder:

**Schneider, Oliver, Dipl.-Ing., 38106 Braunschweig,
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2005 / 0 236 518	A1
US	2015 / 0 198 436	A1
US	2017 / 0 217 581	A1
US	2018 / 0 050 795	A1

**Hall Sensor Wikipedia, aufgerufen am 07.11.19,
veröffentlicht 22.09.18**

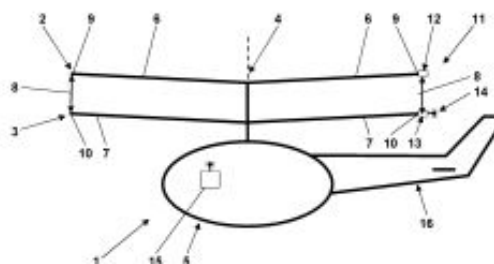
(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands bei Koaxialrotoren**

(57) Hauptanspruch: Vorrichtung (11) zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands (8) zwischen Blattspitzen (9, 10) von zwei um eine gemeinsame Drehachse (4) in einander entgegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren (2, 3), dadurch gekennzeichnet,

- dass an mindestens einer Blattspitze (9) des einen der beiden Koaxialrotoren (2) ein Permanentmagnet (12) angeordnet ist, der in der Umgebung der mindestens einen Blattspitze (9) des einen der beiden Koaxialrotoren (2) ein Magnetfeld (17) hervorruft,

- dass an mindestens einer Blattspitze (10) des anderen der beiden Koaxialrotoren (3) eine Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung angeordnet ist, die mindestens eine Leiterschleife (21, 24) aufweist, wobei die Leiterschleife einen Magnetfeldsensor (13) für das Magnetfeld (17) ausbildet und wobei die oder eine weitere Leiterschleife eine Spannungsquelle für die Versorgung der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung mit elektrischer Leistung ausbildet, und

- dass die Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung einen Sender (14) aufweist, der dazu ausgebildet ist, ein Funksignal auszusenden, das einen Magnetfeldmesswert des Magnetfeldsensors (13) anzeigt.



DE 10 2019 102 419 B4 2021.01.07

Beschreibung**TECHNISCHES GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zum Bestimmen eines Blattspitzenabstands zwischen Blattspitzen von zwei um eine gemeinsame Drehachse in einander entgegen gesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren.

[0002] Bei den Koaxialrotoren handelt es sich insbesondere um solche eines Koaxialhubschraubers. Dabei können die Koaxialrotoren neben dem Erzeugen von Auftrieb für den Koaxialhubschrauber auch für das Erzeugen von Vortrieb für den Koaxialhubschrauber ausgebildet sein.

STAND DER TECHNIK

[0003] Anders als der Hauptrotor eines herkömmlichen Hubschraubers übertragen die beiden in einander entgegen gesetzten Richtungen um ihre gemeinsame Drehachse umlaufenden Koaxialrotoren eines Koaxialhubschraubers kein Drehmoment auf den Hubschrauberrumpf, das durch einen Heckrotor ausgeglichen werden müsste. Auf die Rotorblätter der beiden Koaxialrotoren eines Koaxialhubschraubers können sehr unterschiedlich große Kräfte parallel zu der gemeinsamen Drehachse einwirken, so dass ihre Blattspitzen in dieser Richtung sehr unterschiedlich weit ausgelenkt werden, weil die Rotorblätter elastisch verformbar sind und zudem z. B. über ein zentrales Schlaggelenk gelenkig am Rotorkopf gelagert sein können. Damit besteht die Gefahr, dass sich die Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren berühren, was mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Beschädigung oder gar Zerstörung der Koaxialrotoren und damit einen Absturz des Koaxialhubschraubers zur Folge hätte. Um Berührungen der Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren zu vermeiden, werden die Koaxialrotoren bei einem herkömmlichen Koaxialhubschrauber in Richtung ihrer gemeinsamen Drehachse so weit voneinander beabstandet, dass sich ihre Blattspitzen auch unter ungünstigsten Bedingungen nicht berühren können. Ein großer axialer Abstand der beiden Koaxialrotoren ist aber mit Nachteilen in Bezug auf die Lagerung der Koaxialrotoren und die Flugeigenschaften des Koaxialhubschraubers verbunden.

[0004] Grundsätzlich sind Eingriffe in die Flugsteuerung eines Koaxialhubschraubers möglich, die einer weiteren Annäherung und damit einer Kollision der Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren entgegenwirken. Wenn diese Eingriffe jedoch präventiv durchgeführt werden, werden die möglichen Flugzustände eines Koaxialhubschraubers sehr stark eingeschränkt, ohne dass dies zur Vermeidung von Kollisionen zwischen den Blattspitzen seiner Koaxialrotoren tatsächlich notwendig wäre.

[0005] Es ist bekannt, Auslenkungen von Rotorblättern eines Hubschraubers mit einer optischen Einrichtung, konkret einer Stereokameraanordnung zu erfassen. Diese Stereokameraanordnung wird neben dem Hubschrauber positioniert und ist daher für eine laufende Bestimmung des Blattspitzenabstands zwischen Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren eines Koaxialhubschraubers nicht geeignet.

[0006] Aus der US 2018 / 0 050 795 A1 ist ein Verfahren zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands zwischen Blattspitzen von zwei gegenläufigen Koaxialrotoren bekannt, bei dem eine Durchbiegung eines Rotorblatts zum Beispiel mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen gemessen, eine harmonische Funktion des Rotorblatts aus der gemessenen Durchbiegung erzeugt und eine Blattspitzenverlagerung des Rotorblatts unter Verwendung der erzeugten harmonischen Funktion vorhergesagt wird. Als Ausgangspunkt für dieses Verfahren ist in der US 2018 / 0 050 795 A1 angegeben, dass der Blattspitzenabstand typischerweise unter Anwendung direkter Erfassungsverfahren, wie Näherungssensoren überwacht wird.

[0007] Hall-Sensoren werden bekanntermaßen zur Lageerfassung bewegter Permanentmagnete sowie in Verbindung mit Dauermagneten als Lageerkennungssensoren und kontaktlose Taster verwendet.

[0008] Aus der US 2005 / 0 236 518 A1 ist ein Hubschrauber mit zwei um eine gemeinsame Drehachse in einander gegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren bekannt.

[0009] Dabei sind Sensoren an den Blattspitzen vorgesehen, die die Relativpositionen der Rotorblätter der beiden Koaxialrotoren messen. Aus diesen Messungen bestimmt ein Steuersystem den Rotorblattabstand.

[0010] Aus der US 2017 / 0 217 581 A1 ist ein weiterer Hubschrauber mit zwei um eine gemeinsame Drehachse in einander entgegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren bekannt. Dabei wird eine drahtlose Technik zur Messung des Blattspitzenabstands angewandt. Mindestens ein oberes Rotorblatt und mindestens ein unteres Rotorblatt sind mit Antennen für ein magnetisches Feld ausgestattet. Die Antennen wechselwirken durch einen Nahfeldeffekt. Ein Oszillator sendet ein Anregungssignal an eine erste Antenne. Wenn sich die Rotorblätter kreuzen, empfängt eine zweite Antenne ein von der ersten Antenne emittiertes Signal. Ein Ausgangsniveaumonitor misst die Größe des Anregungssignals. Ein Blattspitzennäherungsmonitor ist in dem rotierenden System montiert, z. B. in einer Rotornabe, und empfängt ein Ausgabesignal von der zweiten Antenne und die Größe des Anregungssignals von dem Ausgangsniveaumonitor sowie ein Drehzahl-

gnal von der Hauptrotoranordnung. Basierend auf der Größe des Anregungssignals an die erste Antenne und der Größe des Ausgabesignals der zweiten Antenne detektiert der Blattspitzenabstandsmonitor den Abstand zwischen der ersten Antenne und der zweiten Antenne. Dieser Abstand zeigt den Abstand zwischen den Rotorblättern an.

[0011] Ein weiterer Hubschrauber mit zwei um eine gemeinsame Drehachse in einander entgegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren ist aus der US 2015 / 0 198 436 A1 bekannt. Dabei sind erste und zweite Sender an einem Rotorblatt des einen Koaxialrotors und ein Detektor an einem Rotorblatt des anderen Koaxialrotors angeordnet. Die beiden Sender senden Strahlungen an den Detektor, und der Detektor detektiert die Strahlungen von dem ersten und dem zweiten Sender. Hieraus berechnet ein Flugcomputer den Blattspitzenabstand zwischen den Koaxialrotoren. Die Sender umfassen jeweils eine Laserdiode, während der Detektor eine Fotodiode aufweist. Der Detektor und der Flugcomputer kommunizieren drahtlos.

AUFGABE DER ERFINDUNG

[0012] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands zwischen Blattspitzen von zwei gegenläufigen Koaxialrotoren aufzuzeigen, die auch für eine Verwendung im Flug eines die Koaxialrotoren umfassenden Koaxialhubschraubers geeignet ist, um eine Kollision der Blattspitzen auch dann sicher zu vermeiden, wenn diese aufgrund der Anordnung und Ausbildung der Koaxialrotoren nicht ausgeschlossen ist.

LÖSUNG

[0013] Die Aufgabe der Erfindung wird durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst. Die Patentansprüche 2 bis 4 betreffen bevorzugte Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Patentanspruch 5 ist auf einen Koaxialhubschrauber mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung gerichtet, und Patentanspruch 6 betrifft eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Koaxialhubschraubers.

BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0014] Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands zwischen Blattspitzen von zwei um eine gemeinsame Drehachse in einander entgegen gesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren ist an mindestens einer Blattspitze des einen der beiden Koaxialrotoren ein Permanentmagnet angeordnet, der in der Umgebung der mindestens einen Blattspitze des einen der beiden Koaxialrotoren ein Magnetfeld hervorruft, und an mindestens einer Blattspitze des anderen der beiden

Koaxialrotoren ist eine Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung angeordnet, die einen Magnetfeldsensor für das Magnetfeld aufweist.

[0015] Wenn im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung von dem Bestimmen einem oder dem Blattspitzenabstands die Rede ist, so geht es dabei um die Bestimmung des kleinsten Abstands den die Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren einhalten. Typischerweise wird dieser minimale Blattspitzenabstand erreicht, wenn je eine der Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren - aus einander entgegengesetzten Richtungen kommend - dieselbe Winkel-lage um die Drehachse erreichen. Bei den üblichen gleichen Drehzahlen der beiden Koaxialrotoren geschieht dies bei der mindestens einen Blattspitze des einen der beiden Koaxialrotoren und der mindestens einen Blattspitze des anderen der beiden Koaxialrotoren mit einer im Vergleich zu diesen gleichen Drehzahlen doppelten Frequenz und immer bei zwei festen um 180° zueinander versetzten Drehlagen der Blattspitzen um die Drehachse.

[0016] Der Permanentmagnet an der mindestens einen Blattspitze des einen der beiden Koaxialrotoren ruft in seiner Umgebung ein magnetisches Feld hervor. Dabei sind die Feldstärken dieses magnetischen Felds nur in einer begrenzten Umgebung des Permanentmagneten von nutzbarer Größe. Durch geeignete Anordnung des Permanentmagneten und Verhinderung eines magnetischen Kurzschlusses durch ferromagnetisches Material zwischen seinen Polen ist es aber problemlos möglich, ein relevantes Magnetfeld in einer Umgebung um die jeweilige Blattspitze auszubilden, das die interessierenden minimale Blattspitzenabstände ausreichend abdeckt. Bei der Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung wird das von dem Permanentmagneten an der Blattspitze des einen Koaxialrotors hervorgerufene magnetische Feld mit dem Magnetfeldsensor der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung an der Blattspitze des anderen Koaxialrotors abgetastet.

[0017] Dabei kann die Vorrichtung ausnutzen, dass sich der Magnetfeldsensor aufgrund der Relativbewegung der Koaxialrotoren mit relativ hoher Geschwindigkeit gegenüber dem Permanentmagneten bewegt. Der Magnetfeldsensor muss also kein statisches Magnetfeld erfassen, sondern er kann dafür ausgelegt sein, eine zeitliche Änderung der Feldstärke des von dem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfelds zu erfassen. Dabei ist die zeitliche Änderung der Feldstärke von der Relativgeschwindigkeit des Magnetfeldsensors zu dem Permanentmagneten und damit von den Drehzahlen der Koaxialrotoren abhängig, während die die maximale Feldstärke des von dem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfelds am Ort des Magnetfeldsensors von dem kleinsten Abstand zwischen dem Permanentmagneten und dem Magnetfeldsensor abhängt.

[0018] Vorzugsweise tritt bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung das Magnetfeld von dem Permanentmagneten senkrecht aus einer Metall-Luft-Grenzfläche aus, die quer zu einer Richtung des Blattspitzenabstands verläuft. Anders gesagt verläuft die Metall-Luft-Grenzfläche parallel zu einer Ebene, die sich normal zu der Drehachse der Koaxialrotoren erstreckt. Die Magnetisierungsrichtung des Permanentmagneten verläuft vorzugsweise normal zu der Metall-Luft-Grenzfläche und damit parallel zu der Drehachse der Koaxialrotoren.

[0019] Konkret kann die zeitliche Änderung der Feldstärke des von dem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfelds in dem Magnetfeldsensor ein elektrisches Signal induzieren. Schon wenn ein einfacher Leiter durch ein Magnetfeld hindurchbewegt wird, versuchen die in ihm enthaltenen Ladungsträger einen Strom hervorzurufen, der ein zweites Magnetfeld erzeugt, welches eine der Bewegung des Leiters entgegenwirkende Kraft verursacht (Lenz'sche Regel). Dieser Strom kann unmittelbar oder in Form einer resultierenden Spannung zwischen den Enden des Leiters als elektrisches Signal des Magnetfeldsensors verwendet werden, dessen Amplitude die Feldstärke des von dem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfelds am Ort des Magnetfeldsensors anzeigt.

[0020] Die Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung der erfindungsgemäßen Vorrichtung weist eine Leiterschleife auf. Der sich aufgrund der Relativbewegung der Leiterschleife gegenüber dem Magnetfeldsensor ändernde magnetische Fluss des von dem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfelds durch die Leiterschleife, induziert eine Spannung zwischen den Enden der Leiterschleife. Die Leiterschleife kann damit als Spannungsquelle für die Versorgung der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung mit elektrischer Leistung und auch als deren Magnetfeldsensor dienen. Die Leiterschleife kann mehrere Windungen umfassen, um die zwischen ihren Enden induzierte Spannung zu vervielfachen.

[0021] Die Leiterschleife kann quer zu einer Richtung des Blattspitzenabstands oder quer zu den Umlaufrichtungen der beiden Koaxialrotoren um die Drehachse verlaufen. In beiden Fällen variiert beim Vorbeilaufen der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung an dem Permanentmagneten der durch die Leiterschleife hindurchtretende magnetische Fluss und entsprechend die zwischen den Enden der Leiterschleife induzierte und dort abgreifbare elektrische Spannung.

[0022] Die Variationen des Signals des Magnetfeldsensors, wenn sich die beiden Blattspitzen mit dem Permanentmagneten und der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung an die gleiche Winkellage

um die Drehachse annähern und dann wieder von dieser entfernen, bilden das Magnetfeld des Permanentmagneten längs der Linie ab, entlang der sich der Magnetfeldsensor gegenüber dem Permanentmagneten bewegt. Die Variationen des elektrischen Signals sind dadurch von dem Abstand dieser Linie zu dem Permanentmagneten, d. h. dem gesuchten Blattspitzenabstand abhängig. Dabei sind die zeitlichen Variationen weniger aussagekräftig als die Variationen des elektrischen Signals über dem Winkel zwischen den beiden Blattspitzen um die Drehachse. Die zeitlichen Variationen können aber unter Berücksichtigung der Drehzahlen der Koaxialrotoren unmittelbar in die Variationen über dem Winkel zwischen den Blattspitzen umgerechnet werden. Die Drehzahlen der Koaxialrotoren sind oftmals auch deshalb zu berücksichtigen, weil sie bei einem Magnetfeldsensor mit einer Leiterschleife linear in die Amplitude des elektrischen Signals eingehen, da die Drehzahlen die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses durch die Leiterschleife bestimmen.

[0023] Variable Anstellwinkel der Rotorblätter und entsprechend der Blattspitzen können die Orientierung des Magnetfeldsensors gegenüber dem Permanentmagneten und insbesondere dem von dem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfeld verändern. Dieser Effekt bleibt jedoch entweder klein, oder er wirkt sich in einer Asymmetrie des Verlaufs der Variationen des Signals des Magnetfeldsensors gegenüber der übereinstimmenden Winkellage des Permanentmagneten und des Magnetfeldsensors um die Drehachse aus. Diese Asymmetrie kann erfasst werden, und auf ihrer Basis kann die aktuelle Orientierung des Magnetfeldsensors gegenüber dem Permanentmagneten bzw. des von ihm hervorgerufenen Magnetfelds berücksichtigt werden.

[0024] Praktisch kann der auf die Drehzahl der Koaxialrotoren normierte Verlauf des Signals des Magnetfeldsensors verwendet werden, um hieraus mithilfe einer Nachschlagetabelle einen konkreten Wert des Blattspitzenabstands abzuleiten. Dazu kann der normierte Verlauf bzgl. der in der Nachschlagetabelle abgelegten Werte analysiert werden und dann über die am besten passende Wertekombination aus der Tabelle auf den Blattspitzenabstand geschlossen werden.

[0025] Je nach Anzahl der Rotorblätter der Koaxialrotoren und der Winkellagen um die Drehachse, in denen die Blattspitzen den minimalen Blattspitzenabstand aufweisen, können bereits mit einem Permanentmagneten und einer Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung alle diese minimalen Blattspitzenabstände erfasst werden, wie sie zwischen den Blattspitzen der beiden Koaxialrotoren auftreten. Wenn dies nicht der Fall ist, kann an mindestens einer weiteren Blattspitze des einen der beiden Koaxialrotoren ein weiterer Permanentmagnet angeordnet

sein und/oder an mindestens einer weiteren Blattspitze des anderen der beiden Koaxialrotoren eine weitere Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung. Wenn an mehreren oder allen Blattspitzen des einen der beiden Koaxialrotoren Permanentmagnete angeordnet sind, ist es von Vorteil, wenn die Permanentmagnete gleich ausgebildet sind und insbesondere gleiche Stärken aufweisen. Dann werden mit der mindestens einen Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung an dem anderen der beiden Koaxialrotoren alle Blattspitzenabstände in der gleichen Weise erfasst.

[0026] Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist der Magnetfeldsensor an einen Sender der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung angeschlossen, der damit an derselben Blattspitze wie der Magnetfeldsensor angeordnet ist und der dazu ausgebildet ist, ein Funksignal auszusenden, das einen Magnetfeldmesswert des Magnetfeldsensors anzeigt. Auch hinsichtlich des Senders ist die Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung autark ausgebildet, so dass sie nicht auf eine externe Versorgung mit elektrischer Leistung oder auf einen von extern aufzuladenden Energiespeicher angewiesen ist. Vielmehr wird der Sender durch das elektrische Signal des Magnetfeldsensors oder durch eine in einer separaten Leiterschleife induzierte Spannung mit elektrischer Leistung versorgt.

[0027] Das Funksignal des Senders der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist vorzugsweise kodiert, um es einem bestimmten Sender zuordnen zu können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die erfindungsgemäße Vorrichtung mehrere Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtungen und entsprechend mehrere Sender aufweist, die Funksignale aussenden. Mithilfe der Kodierung können diese Funksignale dann den einzelnen Magnetfeldsensoren zugeordnet werden. Damit ist es möglich, die erfassten Blattspitzenabstände bestimmten Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtungen und damit bestimmten Winkellagen um die Drehachse, in denen die Blattspitzenabstände gemessen werden, zuzuordnen.

[0028] Bei einem erfindungsgemäßen Koaxialhubschrauber mit zwei um eine gemeinsame Drehachse in einander entgegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren und einer erfindungsgemäßen Vorrichtung kann der Empfänger für das Funksignal an eine Pilotenanzeige für den Blattspitzenabstand und/oder an eine dem Blattspitzenabstand berücksichtigende Flugsteuerung angeschlossen sein. Der mit der Vorrichtung bestimmte minimale Blattspitzenabstand kann dann von dem Piloten und/oder der Flugsteuerung bei der weiteren Steuerung des Koaxialhubschraubers berücksichtigt werden. Konkret können Flugmanöver vermieden werden, die tendenziell zu einer Verringerung des Blattspitzenabstands führen, oder sogar gezielt Flugmanöver eingeleitet wer-

den, die den Blattspitzenabstand vergrößern. So ist auch dann eine Kollision der Blattspitzen der gegenläufigen Koaxialrotoren vermeidbar, wenn eine solche Kollision rein mechanisch nicht vollständig ausgeschlossen ist. Entsprechend können die Koaxialrotoren eines erfindungsgemäßen Koaxialhubschraubers in Richtung ihrer gemeinsamen Drehachse dichter beieinander liegen als dies aus Sicherheitsgründen bei einem Koaxialhubschrauber ohne eine erfindungsgemäße Vorrichtung erforderlich ist.

[0029] Bei einem erfindungsgemäßen Koaxialhubschrauber kann der Empfänger für das Funksignal eine Auswerteeinrichtung aufweisen, die das durch das Funksignal angezeigte elektrische Signal mit einem von einer Drehzahl der beiden Koaxialrotoren abhängigen Grenzwert vergleicht und die dann ein Warnsignal ausgibt, wenn der Grenzwert überschritten wird. Wegen des mit zunehmender Entfernung von dem Permanentmagneten abklingenden durch den Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfelds wird das elektrische Signal häufig nur dann einen relevanten Wert annehmen, wenn der minimale Blattspitzenabstand bereits relativ klein ist. Dann kann die Auswerteeinrichtung einfach auf jeden relevanten Wert des elektrischen Signals mit dem Warnsignal reagieren, um den Piloten des Koaxialhubschraubers bzw. dessen Flugsteuerung dazu zu bringen, einer weiteren Verringerung des Blattspitzenabstands entgegenzuwirken.

[0030] Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Patentansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen. Die in der Beschreibung genannten Vorteile von Merkmalen und von Kombinationen mehrerer Merkmale sind lediglich beispielhaft und können alternativ oder kumulativ zur Wirkung kommen, ohne dass die Vorteile zwingend von erfindungsgemäßen Ausführungsformen erzielt werden müssen. Ohne dass hierdurch der Gegenstand der beigefügten Patentansprüche verändert wird, gilt hinsichtlich des Offenbarungsinhalts der ursprünglichen Anmeldungsunterlagen und des Patents Folgendes: weitere Merkmale sind den Zeichnungen - insbesondere den dargestellten Geometrien und den relativen Abmessungen mehrerer Bauteile zueinander sowie deren relativer Anordnung und Wirkverbindung - zu entnehmen. Die Kombination von Merkmalen unterschiedlicher Ausführungsformen der Erfindung oder von Merkmalen unterschiedlicher Patentansprüche ist ebenfalls abweichend von den gewählten Rückbeziehungen der Patentansprüche möglich und wird hiermit angeregt. Dies betrifft auch solche Merkmale, die in separaten Zeichnungen dargestellt sind oder bei deren Beschreibung genannt werden. Diese Merkmale können auch mit Merkmalen unterschiedlicher Patentansprüche kombiniert werden. Ebenso können in den Patentansprüchen aufgeführte Merkmale für weitere Ausführungsformen der Erfindung entfallen.

[0031] Die in den Patentansprüchen und der Beschreibung genannten Merkmale sind bezüglich ihrer Anzahl so zu verstehen, dass genau diese Anzahl oder eine größere Anzahl als die genannte Anzahl vorhanden ist, ohne dass es einer expliziten Verwendung des Adverbs „mindestens“ bedarf. Wenn also beispielsweise von einer Leiterschleife die Rede ist, ist dies so zu verstehen, dass genau eine Leiterschleife, zwei Leiterschleifen oder mehr Leiterschleifen vorhanden sind.

[0032] Die in den Patentansprüchen angeführten Merkmale können durch andere Merkmale ergänzt werden oder die einzigen Merkmale sein, die das jeweilige Erzeugnis aufweist.

[0033] Die in den Patentansprüchen enthaltenen Bezugszeichen stellen keine Beschränkung des Umfangs der durch die Patentansprüche geschützten Gegenstände dar. Sie dienen lediglich dem Zweck, die Patentansprüche leichter verständlich zu machen.

Figurenliste

[0034] Im Folgenden wird die Erfindung anhand in den Figuren dargestellter bevorzugter Ausführungsbeispiele weiter erläutert und beschrieben.

Fig. 1 zeigt einen erfindungsgemäßen Koaxialhubschrauber in schematischer Seitenansicht.

Fig. 2 zeigt den erfindungsgemäßen Hubschrauber gemäß **Fig. 1** in einer schematischen Ansicht von oben.

Fig. 3 zeigt das Funktionsprinzip der erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Bestimmen eines Blattspitzenabstands bei dem Koaxialhubschrauber gemäß den **Fig. 1** und **Fig. 2**.

FIGURENBESCHREIBUNG

[0035] Der in **Fig. 1** dargestellte Koaxialhubschrauber **1** weist zwei Koaxialrotoren **2** und **3** auf, die um eine gemeinsame, im Wesentlichen vertikal ausgerichtete Drehachse **4** umlaufen. Dabei sind die Umlaufrichtungen der Koaxialrotoren **2** und **3** um die Drehachse **4** einander entgegengesetzt. Auf einen Hubschrauberrumpf **5** üben die beiden Koaxialrotoren **2** und **3** daher einander entgegengesetzte und sich dadurch aufhebende Drehmomente aus. Entsprechend muss an einem Heckausleger **16** des Koaxialhubschraubers **1** kein Heckrotor zum Drehmomentausgleich vorgesehen sein. In Richtung der Drehachse **4** weisen die Koaxialrotoren **2** und **3** einen Abstand auf, der eine Kollision ihrer Rotorblätter **6** und **7** verhindert. Insbesondere im Vorwärtsflug des Koaxialhubschraubers **1**, in dem die Koaxialrotoren **2** und **3** bzgl. des Anstellwinkels ihrer Rotorblätter **6** und **7** so angesteuert werden, dass sie einen Vortrieb erzeugen, wirken jedoch in unterschiedlichen Drehla-

gen der Rotorblätter **6** und **7** um die Drehachse **4** unterschiedliche Kräfte auf die Rotorblätter **6** und **7**. Hierdurch kann ein minimaler Blattspitzenabstand **8**, der erreicht wird, wenn Blattspitzen **9** und **10** der Rotorblätter **6** und **7** die gleiche Winkellage um die Drehachse **4** einnehmen, aufgrund unterschiedlicher elastischer Biegungen der Rotorblätter **6** und **7** und auch aufgrund unterschiedlicher Auslenkungen der Rotorblätter **6** und **7** in Schlaggelenken deutlich reduziert sein. Um diesen verkleinerten Blattspitzenabstand **8** zu überwachen, um jedenfalls eine Kollision der Blattspitzen **9** und **10** zu verhindern, ist eine Vorrichtung **11** vorgesehen. Die Vorrichtung **11** umfasst einen Permanentmagneten **12** an einer Blattspitze **9** des hier oberen Koaxialrotors **6** und einen Magnetfeldsensor **13** einer Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung an einer Blattspitze **10** des hier unteren Koaxialrotors **7**. Wenn die Blattspitze **10** mit dem Magnetfeldsensor **13** die Blattspitze **9** mit dem Permanentmagneten **12** passiert, erfasst der Magnetfeldsensor **13** das auf ihn einwirkende Magnetfeld des Permanentmagneten **12** und/oder die zeitliche Änderung dieser Einwirkung. Abhängig von der Feldstärke des Magnetfelds gibt der Magnetfeldsensor **13** ein elektrisches Signal aus. Wenn das elektrische Signal durch die sich ändernde Einwirkung des Magnetfelds auf den Magnetfeldsensor in diesem induziert wurde, kann es zur Versorgung eines an den Magnetfeldsensor **13** angeschlossenen Senders **14** mit elektrischer Leistung dienen. Der Sender **14** sendet ein Funksignal aus, das das elektrische Signal anzeigt. Dieses Funksignal wird von einem Empfänger **15** im Hubschrauberrumpf **5** registriert und in Bezug auf den Blattspitzenabstand **8** ausgewertet. Falls der aus dem Funksignal abgeleitete Blattspitzenabstand **8** einen kritischen Wert annimmt, wird dies dem Piloten des Koaxialhubschraubers **1** oder einer Flugsteuerung des Koaxialhubschraubers **1** signalisiert, damit einer weiteren Abnahme des Blattspitzenabstands **8** entgegengewirkt wird. Die Vorrichtung **11** kann auch so ausgelegt sein, dass bei einem großen Blattspitzenabstand **8** das elektrische Signal, das von dem Magnetfeld des Permanentmagneten **12** in dem Magnetfeldsensor **13** induziert wird, nicht ausreicht, um den Sender **14** zu betreiben. Mit abnehmendem Blattspitzenabstand **8** nimmt der Sender **14** jedoch seinen Betrieb auf und signalisiert über sein Funksignal an den Empfänger **15** zunächst einen noch ausreichenden Blattspitzenabstand. Wenn der minimale Blattspitzenabstand einen kritischen Wert annimmt, der nicht weiter unterschritten werden sollte, ist der Sender **14** so bereits in Betrieb und übermittelt ein entsprechendes Funksignal an den Empfänger **15**, das dieser weitergibt.

[0036] **Fig. 2** zeigt den Koaxialhubschrauber **1** in einer Ansicht von oben. Dabei sind die beiden Rotorblätter **6** bzw. **7** jedes der beiden Koaxialrotoren **2** bzw. **3** mit durchgezogenen Linien nach dem Durchlauf ihrer gleichen Winkellagen um die Drehachse **4**

DE 10 2019 102 419 B4 2021.01.07

und mit gepunkteten Linien nach jeweils weiterer Drehung um 90° um die Drehachse 4 gezeigt. Hieraus geht hervor, dass die beiden Rotorblätter vier Winkellagen mit minimalen Blattspitzenabständen aufweisen, wobei diese Winkellagen um 90° um die Drehachse 4 zueinander versetzt sind. Mit jeweils einem Permanentmagneten 12 und einem Magnetfeldsensor 13 sind nur die Blattspitzenabstände in zwei dieser Winkellagen, die sich über die Drehachse 4 hinweg gegenüberliegen, erfassbar. Um auch die Blattspitzenabstände in den beiden anderen Winkellagen zu erfassen, muss zumindest ein weiterer, möglichst gleich starker Permanentmagnet 12 oder Magnetfeldsensor 13 vorgesehen sein.

[0037] Fig. 3 illustriert stark schematisch das Magnetfeld 17 eines stabförmigen Permanentmagneten 12 mithilfe von Feldlinien 18, die vom Nordpol 19 zum Südpol 20 des Permanentmagneten 12 verlaufen. Die Feldlinien 18 zeigen die Verteilung des magnetischen Flusses in der Umgebung des Permanentmagneten 12 an. Wenn sich eine Leiterschleife 21 des Magnetfeldsensors 13 durch das Magnetfeld 17 hindurchbewegt, variiert der durch die Leiterschleife 21 verlaufende magnetische Fluss. Entsprechend wird in der Leiterschleife 21 ein Strom induziert, der in einer Spannung zwischen den Enden der Leiterschleife 21 resultiert. Diese Spannung kann das elektrische Signal sein, das von dem Magnetfeldsensor 13 ausgegeben wird. Während die Leiterschleife 21 normal zu der Umlaufrichtung 22 des Koaxialrotors 2 und der Umlaufrichtung 23 des Koaxialrotors 3 ausgerichtet ist, ist eine in Fig. 3 ebenfalls eingezeichnete Leiterschleife 24 einer alternativen Ausführungsform des Magnetfeldsensors 13 normal zur Richtung des Blattspitzenabstands ausgerichtet. Auch bei dieser Ausrichtung variiert der Fluss durch die Leiterschleife 24, wenn sie den Permanentmagneten 12 aufgrund der einander entgegengesetzten Umlaufrichtungen 22 und 23 der Koaxialrotoren 2 und 3 passiert.

Bezugszeichenliste

1	Koaxialhubschrauber
2	Koaxialrotor
3	Koaxialrotor
4	Drehachse
5	Hubschrauberrumpf
6	Rotorblatt
7	Rotorblatt
8	minimaler Blattspitzenabstand
9	Blattspitze
10	Blattspitze
11	Vorrichtung
12	Permanentmagnet

13	Magnetfeldsensor
14	Sender
15	Empfänger
16	Ausleger
17	Magnetfeld
18	Feldlinie
19	Nordpol
20	Südpol
21	Leiterschleife
22	Umlaufrichtung
23	Umlaufrichtung
24	Leiterschleife

Patentansprüche

1. Vorrichtung (11) zur Bestimmung eines Blattspitzenabstands (8) zwischen Blattspitzen (9, 10) von zwei um eine gemeinsame Drehachse (4) in einander entgegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren (2, 3), **dadurch gekennzeichnet**,

- dass an mindestens einer Blattspitze (9) des einen der beiden Koaxialrotoren (2) ein Permanentmagnet (12) angeordnet ist, der in der Umgebung der mindestens einen Blattspitze (9) des einen der beiden Koaxialrotoren (2) ein Magnetfeld (17) hervorruft,

- dass an mindestens einer Blattspitze (10) des anderen der beiden Koaxialrotoren (3) eine Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung angeordnet ist, die mindestens eine Leiterschleife (21, 24) aufweist, wobei die Leiterschleife einen Magnetfeldsensor (13) für das Magnetfeld (17) ausbildet und wobei die oder eine weitere Leiterschleife eine Spannungsquelle für die Versorgung der Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung mit elektrischer Leistung ausbildet, und

- dass die Magnetfeldmess- und -übermittlungseinrichtung einen Sender (14) aufweist, der dazu ausgebildet ist, ein Funksignal auszusenden, das einen Magnetfeldmesswert des Magnetfeldsensors (13) anzeigt.

2. Vorrichtung (11) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Magnetfeld (17) von dem Permanentmagneten (12) aus einer Metall-Luft-Grenzfläche austritt, die quer zu einer Richtung des Blattspitzenabstands (8) verläuft.

3. Vorrichtung (11) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass an mindestens einer weiteren Blattspitze (9) des einen der beiden Koaxialrotoren (2) ein weiterer Permanentmagnet (12) angeordnet ist und/oder dass an mindestens einer weiteren Blattspitze (10) des anderen der beiden Koaxialrotoren (3) eine weitere Ma-

DE 10 2019 102 419 B4 2021.01.07

gnetafeldmess- und -übermittlungseinrichtung angeordnet ist.

4. Vorrichtung (11) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Funksignal des Senders (14) codiert ist.

5. Koaxialhubschrauber mit zwei um eine gemeinsame Drehachse (4) in einander entgegengesetzten Richtungen umlaufenden Koaxialrotoren (2, 3) und einer Vorrichtung (11) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Empfänger (15) für das Funksignal an eine Pilotenanzeige für den Blattspitzenabstand (8) und/oder eine den Blattspitzenabstand (8) berücksichtigende Flugsteuerung angeschlossen ist.

6. Koaxialhubschrauber nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Empfänger (15) eine Auswerteeinrichtung aufweist, die das durch das Funksignal angezeigte elektrische Signal mit einem von Drehzahlen der beiden Koaxialrotoren (2, 3) abhängigen Grenzwert vergleicht und ein Warnsignal ausgibt, wenn der Grenzwert überschritten wird.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

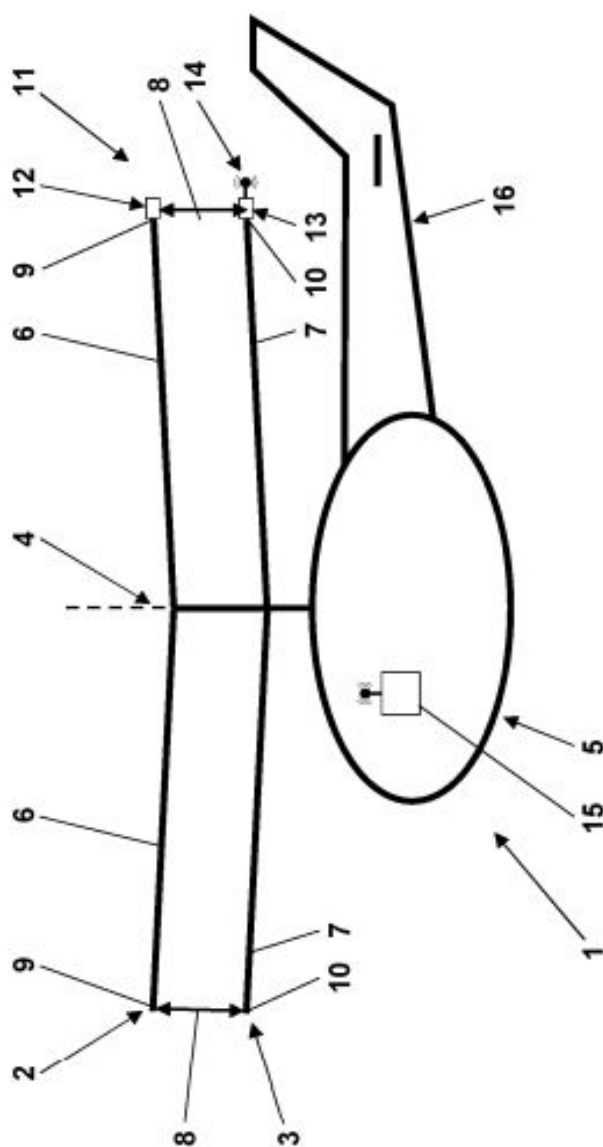


Fig. 1

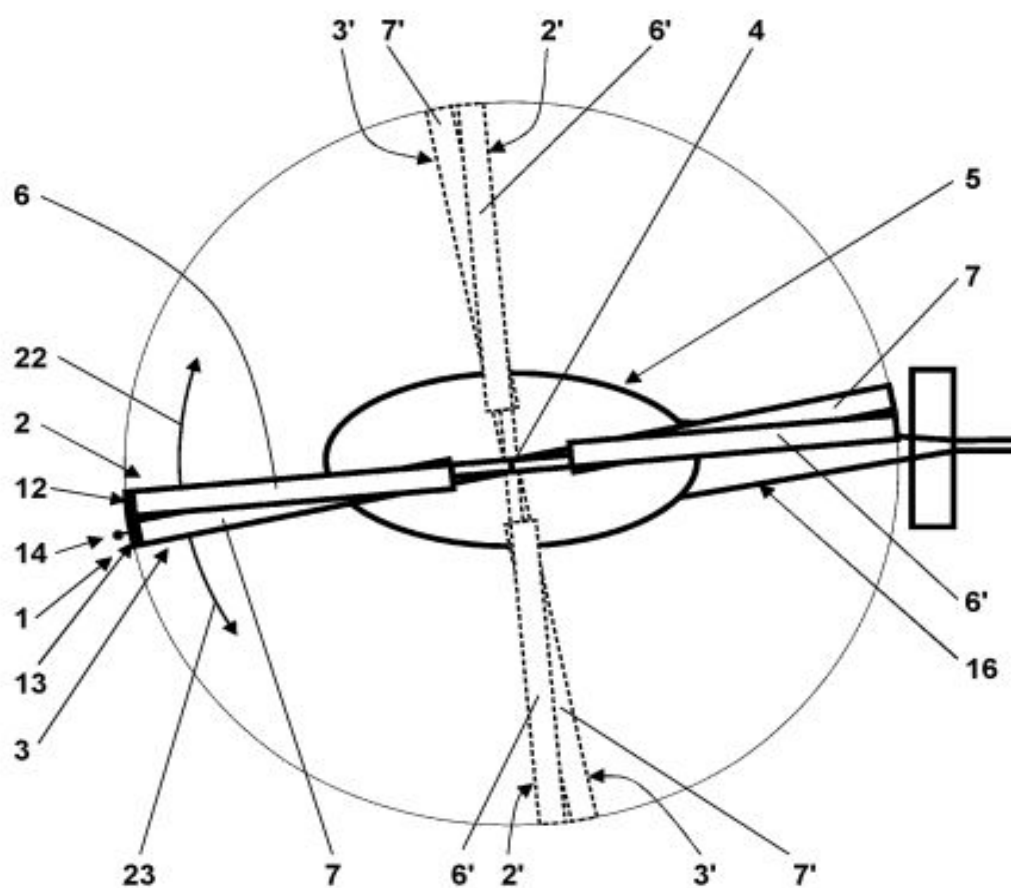


Fig. 2

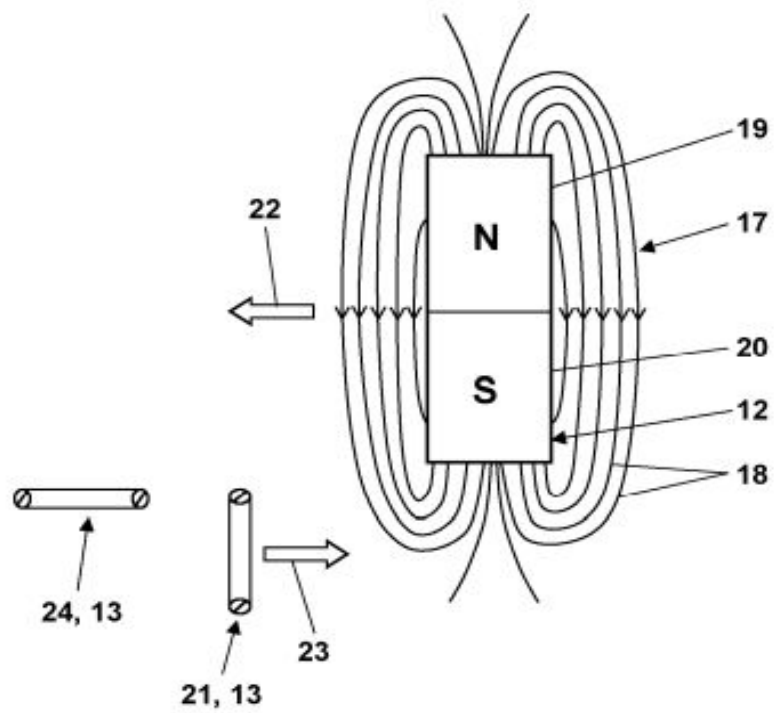


Fig. 3