

EVALUIERUNG EINES VON UNBEMANNTEN LUFTFAHRTSYSTEMEN MITGEFÜHRTEN 80 GHZ-RADARSENSORS ZUR DETEKTION ANDERER LUFTRAUMTEILNEHMER IM GEMEINSAM GENUTZTEN LUFTRAUM

C. Ben, T. Islam, D. Moormann
Institut und Lehrstuhl für Flugsystemdynamik, RWTH Aachen University,
Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Deutschland

J.-K. Mende, T. Dallmann, R. Herschel
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
Fraunhoferstraße 20, 53343 Wachtberg

Zusammenfassung

Die zukünftige Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen für verschiedene Einsatzbereiche wie z.B. dem Katastrophenschutz oder dem Pakettransport erfordert das Zurücklegen großer Flugstrecken auch außerhalb der Sicht des verantwortlichen Steuerers. Um die, im Zuge solcher Anwendungen erforderliche sichere Integration dieser unbemannten Luftraumteilnehmer in den Luftraum zu gewährleisten, wird im Rahmen dieser Veröffentlichung ein miniaturisierter Dauerstrichradarsensor als Teil eines automatisierten Kollisionsvermeidungssystems vorgestellt und evaluiert.

Dieses Kollisionsvermeidungssystem soll nicht-kooperativ, d.h. ohne Informationsaustausch zwischen den sich annähernden Luftraumteilnehmern funktionieren. Um diese Funktionalität zu ermöglichen, muss ein automatisiertes Detektionssystem als Funktionalebene des Kollisionsvermeidungssystems integriert sein das die Fähigkeit besitzt, sich annähernde Luftraumteilnehmer eindeutig zu erkennen und ihre jeweilige Trajektorie zu präzisieren. Nur so ist das Kollisionsvermeidungssystem in der Lage, bei einem Kollisionsszenario ein Ausweichen des Träger-Luftfahrtsystems gegenüber anderen Luftfahrzeugen wie beispielsweise Rettungshubschraubern durchzuführen.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird nachgewiesen, dass die zuletzt aufgeführte eindeutige Detektion von Luftfahrtsystemen mittels eines miniaturisierten Dauerstrichradarsensors möglich ist und im Flugbetrieb robust und sicher funktioniert. Dieser Nachweis wird mit Messdaten geführt, welche im Rahmen einer gemeinsam durchgeführten Messkampagne aufgenommen und ausgewertet wurden.

NOMENKLATUR

A_e	Amplitude
R	Detektionsentfernung
T_m	Rampenzeit
c	Lichtgeschwindigkeit (299.792.458 m/s)
f_{diff}	Frequenzdifferenz
f_n	Nyquistfrequenz
s_e	Sendesignal
t	Zeit
f_e	Sendefrequenz
Δf_H	Frequenzhub, Bandbreite
ΔR	Entfernungsauflösung
Δt_p	Zeitdifferenz Sende- und Empfangssignal
ADC	Analog Digital Converter
ADS-B	Automated Dependent Surveillance & Broadcast
DRR	Due Regard Radar
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave

MTI	Moving Target Indication
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
(s)UAS	(Small) Unmanned Aerial System
USB	Universal Serial Bus

1. EINLEITUNG

Die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen (engl.: Unmanned Aerial Systems, UAS) für zivile Einsatzbereiche wie bspw. dem Katastrophenschutz oder Pakettransport rückt mit fortschreitender Technologiereife in den Fokus von Endanwendern. Die geforderten Flugmissionsprofile verlangen das Zurücklegen großer Flugstrecken auch außerhalb der Sicht des verantwortlichen Steuerers [1].

Um die während der Flugmission erforderliche sichere Integration dieser unbemannten Luftfahrtsysteme in den mit anderen Luftraumteilnehmern gemeinsam genutzten Luftraum zu gewährleisten, benötigen diese Luftfahrtsysteme ein Kollisionsvermeidungssystem. Ein solches Kollisionsvermeidungssystem muss dabei an Bord des UAS mitgeführt werden und hochautomatisiert sein, um auch bei Kommunikationsstörungen oder -verlust zwischen

verantwortlichem Steuerer und UAS keine Gefahr für andere bemannte als auch unbemannte Luftraumteilnehmer darzustellen.

Neben kooperativen Luftraumteilnehmern, die im Informationsaustausch mit dem eigenen UAS durch unterschiedliche Transpondertechnologien wie bspw. Traffic Collision Avoidance System (TCAS) oder Automated Dependent Surveillance & Broadcast (ADS-B) stehen, muss ein solches Kollisionsvermeidungssystem darüber hinaus die Fähigkeit besitzen auch nicht-kooperative Luftraumteilnehmer zu detektieren.

Nicht-kooperative Luftraumteilnehmer besitzen entweder keine, nicht aktivierte oder für andere nicht lesbare Transpondersysteme. Sie sind somit für andere Luftraumteilnehmer in Ihrer Umgebung nur durch eine Beobachtung des Luftraumes durch optional mitgeführte Sensortechnologie erkennbar [2].

Besondere Herausforderungen bei der Auswahl eines möglichen Sensors für ein solches Kollisionsvermeidungssystem liegen in den hohen Anforderungen. Dazu zählt der zuverlässige Betrieb bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen wie z.B. Schnee, Regen, Nebel und Dunkelheit. Zudem muss die Sensorik ein möglichst geringes Gewicht, ein geringes Bauraumvolumen und eine geringe elektrische Leistungsaufnahme aufweisen, so dass der Sensor auch in unbemannten Luftfahrtssystemen mit einer geringen Abflugmasse integrierbar ist.

Eine weitere Anforderung gilt der Signalverarbeitung des verwendeten Sensors. Diese muss das empfangene Rohsignal derart auswerten, dass eine Erkennung und Positionsbestimmung der Luftraumteilnehmer ermöglicht wird. Hierfür muss für eine kurze Rechenzeit die Signalverarbeitung effizient auf der entsprechenden Hardware ausgeführt werden.

Derzeit konzentriert sich die Entwicklung zertifizierbarer hochautomatisierter Kollisionsvermeidungssysteme auf UAS-Plattformen, die eine Abflugmasse größer als 150 kg aufweisen [3]. Aktuelle Hochrechnungen zeigen jedoch, dass die Klasse kleiner unbemannter Luftfahrtssysteme bis 25 kg (engl.: Small Unmanned Aerial Systems, sUAS) durch ihren geringen Preis eine kontinuierlich steigende Verbreitung bei Privatpersonen, kommerziellen Anbietern und bei öffentlichen Institutionen erfahren [4]. Dadurch wird in Zukunft deren Zahl verkaufter Einheiten die der größeren UAS-Plattformen in Deutschland deutlich übersteigen.

Diese Veröffentlichung präsentiert einen möglichen Lösungsansatz für eine mitführbare Sensorik in Form eines miniaturisierten Dauerstrichradars als Bestandteil eines hochautomatisierten, allwetterfähigen Kollisionsvermeidungssystems. Der Fokus liegt hierbei auf einer Verwendung in kleinen unbemannten Luftfahrtssystemen bis zu einer Abflugmasse von 25 kg.

2. BISHER UNTERSUCHTE SENSORTECHNOLOGIEN

Bedingt durch die geringe Abflugmasse der sUAS von maximal 25 kg können nur Sensoren mitgeführt werden, die leicht und kompakt sind und einen geringen Leistungsverbrauch aufweisen. Das wiederum impliziert verschiedene Rahmenbedingungen für die maximale Rechenleistung und Komplexität der Signalverarbeitung an Bord von

sUAS. Diese Einschränkungen beschleunigen die Entwicklung eingebetteter, miniaturisierter Systeme zur Kollisionsvermeidung. Eine Vielzahl bisheriger und aktueller Forschungsvorhaben mit dem Schwerpunkt der Sensorentwicklung für Kollisionsvermeidungsszenarien lässt sich in die nachfolgenden Gruppen unterteilen [5]:

2.1. Maschinelles Sehen

Bedingt durch die fortschreitende Miniaturisierung elektronischer Komponenten konnten elektro-optische Systeme verkleinert werden [6]. Charakteristisch für diese Sensorik ist die Nutzung eines mono- respektive binokularen Kamerasystemaufbaus, dessen Daten an einen entsprechend leistungsfähigen Computer zur Bildbearbeitung gesendet werden [5]. Die Vorteile des maschinellen Sehens können nach [5], [6] und [7] folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Leichtes Gewicht der Kamerasysteme in Kombination mit geringer elektrischer Leistungsaufnahme und geringen Einbaudimensionen.
- Großes Sichtfeld gepaart mit einer hohen Auflösung des Sichtfeldes.
- Präzise Bestimmung des lateralen und vertikalen Annäherungswinkels eines anderen Luftraumteilnehmers.
- Identifizierung des Luftraumteilnehmers anhand der visuellen Merkmale.

Demgegenüber sind die Nachteile dieser Sensortechnologie nach [5], [6] und [7]:

- Die benötigte hohe Rechenleistung der Bildverarbeitung für echtzeitnahe Auswertungen [8], die eine aufwendige Rechnerarchitektur voraussetzt.
- Die fehlende Eindeutigkeit in der Entfernungsbestimmung zwischen eigenem UAS und detektiertem Luftraumteilnehmer.
- Die Abnahme des Auflösungsvermögens über die Detektionsentfernung.
- Die Störanfälligkeit der Kamerasysteme insbesondere gegenüber widrigen Witterungsbedingungen (Regen, Nebel, Dämmerung, Tageszeit, Hintergrund, etc.) mit einer verbundenen Minderung der maximalen Detektionsreichweite bis zum kompletten Ausfall der Detektionsmöglichkeit.

Aus der Auflistung der wichtigsten Vor- und Nachteile wird deutlich, dass maschinelles Sehen auf Basis von elektro-optischen Systemen in dynamischen Missionsumgebungen nur eingeschränkt sinnvoll ist. Besonders bei wechselnden Witterungsverhältnissen können die Vorteile einer nur auf maschinellem Sehen basierenden Sensortechnologie zur Erkennung nicht-kooperativer Luftraumteilnehmer die vorhandenen Nachteile nicht aufwiegen.

2.2. Akustische Sensoren

Neben dem Sensorikbereich des maschinellen Sehens konnten ebenfalls innerhalb der technischen Akustik Miniaturisierungsfortschritte erzielt werden. Kennzeichnend für die Detektion anderer Luftraumteilnehmer mittels akustischer Sensoren ist die Nutzung eines räumlichen Sensorarrays, bspw. bestehend aus Mikrofonen oder Hitzedraht-

sensoren [9], [10]. Mittels der gemessenen Schall- respektive Strömungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit dem Wissen über die aktuelle Blickrichtung des Sensors kann der Ursprung der Schallquelle lokalisiert werden.

Als Vorteile können nach Analyse von [9] und [10] folgende Punkte genannt werden:

- Die geringe Systemmasse in Kombination mit einem geringen Einbauvolumen.
- Die Messungen werden durch Staub unbeeinträchtigt.
- Eine nahezu materialunabhängige Reflexion der Schallwellen.
- Die Detektionsreichweite für „laute“ Objekte, die bis zu 5 km angegeben wird [10].

Gleichwohl sind folgende Nachteile bei einer Mitführung auf einem Träger-UAS nach Analyse von [9] und [10] zu nennen:

- Die Problematik der Detektion baugleicher Luftfahrtsysteme durch Überlagerung identischer Schallsignale.
- Die Detektionsreichweite ist abhängig von der abgegebenen Schalleistung und der Reflexion der zu detektierenden Objekte.
- Analog zum maschinellen Sehen die Störanfälligkeit bei widrigen Witterungsbedingungen.

Folglich eignet sich die Sensortechnologie zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur bedingt für eine Detektion anderer Luftraumteilnehmer unter wechselnden Umweltbedingungen.

2.3. Radarsensorik

Radarsensoren basieren auf der Nutzung elektromagnetischer Wellen und deren Reflexion an Oberflächen, um Informationen über angestrahlte Objekte zu erhalten [18]. Je nach Bauform und eingesetzter Technik sind Radarsensoren in der Lage, die Entfernung, Relativgeschwindigkeit und Winkelposition anderer Luftraumteilnehmer zeitgleich zu messen [11].

Die für solche elektromagnetischen Systeme nutzbaren Frequenzen und Bandbreiten sind durch rechtliche Reglementierungen und technische Grenzen beschränkt. Während die technischen Herausforderungen in der Miniaturisierung, der Effizienz sowie der Frequenz- und Phasenstabilität liegen, ist die rechtliche Fragestellung bezüglich der nutzbaren Frequenzbänder für die Verwendung von Radarsensoren zur Kollisionsvermeidung an Bord von UAS zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht geklärt [15]. In diesem Zusammenhang ist die Verordnung der deutschen Bundesnetzagentur zur Nutzung von radargestützten Fahrassistenzsystemen in Kraftfahrzeugen zu nennen. Hier wurden die erlaubten Frequenzbänder von ursprünglich 21,65-26,65 GHz stark limitiert, um andere Funkanwendungen wie bspw. Radioastronomie zu schützen [16]. Zugleich wurde ein neuer Frequenzbereich von 77-81 GHz explizit für radargestützte Fahrassistenzsysteme in Kraftfahrzeugen zugeteilt [17].

Bisherige Schritte in Richtung mitführbarer Radarsensorik an Bord von unbemannten Luftfahrtsystemen konzentrieren sich primär auf UAS mit einer Abflugmasse über 150 kg. Beispielhaft hierfür ist das Forschungsprojekt „Due Regard Radar“ (DRR) des Unternehmens General Atomics in Zusammenarbeit mit der National Aeronautics and Space Administration [3], dargestellt in Bild 1.

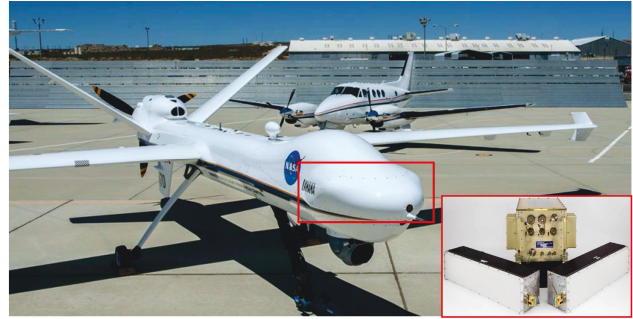


BILD 1. Das entwickelte Impulsradarsystem (rot umrahmt) an Bord des UAS-Versuchsträgers Ikhanah [Bildquelle: General Atomics].

Das Ziel des DRR-Forschungsprojektes die Konzeption eines automatisierten allwetterfähigen Kollisionsvermeidungssystems für ein in den Luftraumklassen D, E und G operierendes UAS. Zur Detektion anderer nicht-kooperativer Luftraumteilnehmer in der Umgebung nutzt der Erprobungsträger ein Phased-Array Impulsradarsystem mit elektronischer Strahlschwenkung, welches über einen Sichtbereich von 220° im Azimut und 30° in der Elevation verfügt sowie eine Detektionsreichweite von bis zu 20 Meilen aufweist [12].

Ungeachtet der Leistungsfähigkeit dieses Radarsystemtyps ist eine Miniaturisierung der Systemarchitektur aufgrund der Leistungsanforderungen nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich [5], [11], [13].

Die Verwendung von Radarsensorik zur Umweltwahrnehmung bietet nach [11] und [18] die folgenden Vorteile:

- Detektion von Objekten auch bei schlechten Licht- und Witterungsverhältnissen.
- Tag- und Nachtbedingungen sind irrelevant für den Betrieb des Radarsensors.
- Das Auflösungsvermögen des Radarsensors ist entfernungsunabhängig.
- Die Charakteristik des Reflexionssignals wird durch die Polarisation des Sendesignals sowie der Rückstreufläche beeinflusst.
- Die Möglichkeit der Relativgeschwindigkeitsmessung (Doppler) des detektierten Luftraumteilnehmers.
- Auswertung von Mikro-Doppler (z.B. durch Erkennung von Rotorgeschwindigkeiten) zur Klassifikation von bemannten und unbemannten Luftraumteilnehmern.

Diesen Vorteilen der Radartechnik stehen die im Folgenden aufgelisteten Nachteile gegenüber:

- Das Auflösungsvermögen hängt von der gewählten Bandbreite und dem Frequenzbereich ab.
- Technisch aufwändig zu implementieren.

Seit 2014 werden erste Forschungsvorhaben mit dem Ziel

durchgeführt, miniaturisierte Dauerstrichradarsysteme als mitführbare Kollisionsdetektionssensoren für sUAS zu konzipieren [14]. Die zuvor genannten Vorteile dieser Sensortechnologie, insbesondere bezüglich der geringen Störanfälligkeit gegenüber wechselnden Umweltbedingungen, bergen einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Entwicklung eines automatisierten Kollisionsvermeidungssystems für sUAS.

3. VERWENDETER RADARSENSOR

Der im Rahmen dieser Veröffentlichung untersuchte Radarsensor gehört zur Kategorie der sogenannten frequenzmodulierten Dauerstrichradare (engl.: Frequency Modulated Continuous Wave Radar, FMCW-Radar). Im Folgenden werden Aufbau sowie Funktionsweise des FMCW-Radarsensors beschrieben. Im Anschluss werden verschiedene sensorspezifische technische Details diskutiert.

3.1. Aufbau des Radarsensors

Der verwendete Sensor ist eine Eigenentwicklung des Fraunhofer FHR und in Bild 2 dargestellt.

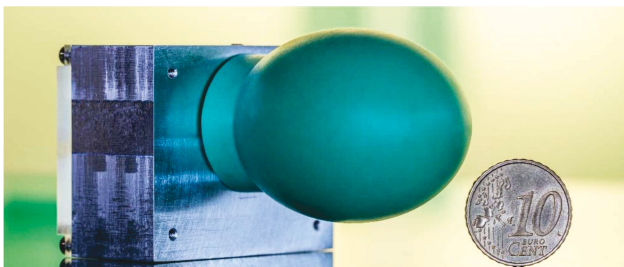


BILD 2. Der untersuchte Radarsensor [Foto: A. Shoykhetbrod].

Der originäre Anwendungsbereich des Radarsensors umfasst die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle in Fertigungsprozessen. Der Radarsensor lässt sich in die folgenden technischen Funktionsblöcke unterteilen:

- Antennenfrontend
- Speisernetzwerk
- Backend

Das Antennenfrontend kann aus einer oder mehreren Antennenelementen und ggf. Linsen oder Reflektoren bestehen. Das hier verwendete Frontend besteht aus einem Rundhohlleiter und einer Linse, durch die Signale als elektromagnetische Welle abgestrahlt und empfangen werden. Das Speisernetzwerk ermöglicht Wellenanpassung zwischen Backend und Antenne und ist in Hohlleitertechnik ausgeführt. Das Backend realisiert die Signalzeugung, Signalauswertung und die Kommunikation mit der Steuereinheit.

3.2. Funktionsweise eines FMCW-Radars

Das Funktionsprinzip eines FMCW-Radars basiert auf der Nutzung eines frequenzmodulierten Sendesignals. Hierfür werden lineare Rampensignale erzeugt, wie sie beispielhaft in Bild 3 dargestellt sind.

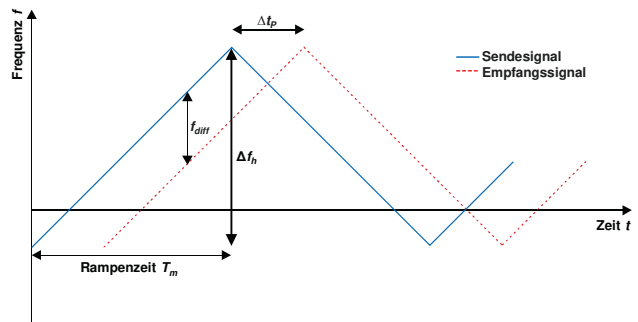


BILD 3. Beispielsignale für ein FMCW-Radar für ein statisches Ziel und statisches Radar.

Die Zeit Δt_p steht hierbei für die Zeitdifferenz, die zwischen dem Aussenden und Empfangen des Signals vergeht. Die Variable T_m , auch als Rampenzeit bezeichnet, charakterisiert die zeitliche Dauer zwischen einer steigenden und einer fallenden Signalfanke. Die Frequenzdifferenz f_{diff} beschreibt die messbare Frequenzdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal. Der Frequenzhub während einer steigenden oder fallenden Signalfanke ist mit Δf_H beschrieben und entspricht der Bandbreite des Sensors.

Aus diesen bekannten Informationen lässt sich die Detektionentfernung zum reflektierten Objekt mit

$$(1) R = \frac{T_m \cdot f_{diff} \cdot c}{\Delta f_H \cdot 2}$$

berechnen. Die Konstante c beschreibt hierbei die Lichtgeschwindigkeit.

Der Sender generiert ein periodisch moduliertes Sendesignal s_e mit konstanter Amplitude A_e und zeitveränderlicher Frequenz $f_e(t)$:

$$(2) s_e = A_e \cdot \cos(2\pi f_e(t) \cdot t).$$

Dieses wird über eine angeschlossene Sendeantenne ausgesendet. Trifft dieses Signal ein Objekt, wird abhängig von der Reflektivität des Objektes ein entsprechender Anteil des Sendesignals reflektiert und kann an der Empfängerantenne detektiert werden. Der Empfänger des Radarsensors kann aus der Laufzeit zwischen Sendesignal und Empfangssignal, der Verschiebung der Phasenfronten sowie der zeitlichen Änderung der Phase Entfernung und Geschwindigkeit des detektierten Objektes bestimmen. Radarsensoren ermöglichen es somit, relativ zum Standort des Sensors Informationen über die Umgebung zu ermitteln. [11]

Für die Detektionsreichweite eines Dauerstrichradars sind die gewählte Rampenzeit und der Frequenzhub die primären Stellgrößen [18]. Die maximale Detektionentfernung lässt sich nach [18] wie folgt bestimmen:

$$(3) R_{max} = f_n \cdot T_m \cdot \frac{c}{2 \Delta f_H}.$$

Hierbei stellt f_n die Nyquistfrequenz in Abhängigkeit von der Abtastrate T_m der Rampenzeit und des Frequenzhubs dar. Diese charakteristische Gleichung zeigt sehr deutlich, dass die beiden Einstellparameter Rampenzeit und Frequenzhub direkte Auswirkungen auf die Reichweite des Radarsensors haben. Bei einer kürzeren Rampenzeit in

Kombination mit einem höheren Frequenzhub (schnellere Frequenzänderung pro Zeiteinheit) muss die Nyquistfrequenz steigen, um die gleiche Detektionsentfernung zu ermöglichen. Da jedoch der Frequenzhub eines Dauerstrich-Radarsystems physikalisch begrenzt ist, sinkt mit ansteigendem Frequenzhub die maximale Detektionsentfernung.

Diametral verbunden mit der maximalen Detektionsentfernung ist die Entfernungsauflösung ΔR des FMCW-Radars. Diese charakterisiert den minimalen Abstand zweier mit gleicher Reflexionssignalstärke detektierter Luftraumteilnehmer, um diese voneinander zu unterscheiden. Diese kann mit

$$(4) \Delta R = \frac{c}{2 \cdot \Delta f_H}$$

berechnet werden [18]. Durch die Wahl eines hohen Frequenzhubs ist folglich eine gesteigerte Entfernungsauflösung der beobachteten Umgebung erreichbar. Allerdings führt diese Frequenzhuberhöhung zu einer verminderten maximalen Detektionsentfernung des FMCW-Radars.

3.3. Technische Details des FMCW-Radars

Aufgrund seiner ursprünglichen Anwendung in Qualitätskontrollprozessen besitzt der Sensor sowohl eine kompakte Bauform als auch ein geringes Einbaugewicht von 200 g. In Kombination mit der niedrigen Leistungsaufnahme ist dieser Radarsensor auch in sUAS mit einer Gesamtflugmasse bis zu 25 kg zur Kollisionsvermeidung nutzbar. In Tabelle 1 sind die wichtigsten technischen Spezifikationen des FMCW-Radarsensors zusammengefasst.

Für den genutzten Frequenzbereich des Sensors ist eine Betrachtung der atmosphärischen Dämpfung geboten. Die Dämpfungskurve über die Frequenz ist in Bild 4 dargestellt. Für den Messbereich von 72-82 GHz liegt die Wellenlänge im Bereich von 3,2-4 mm, welcher in Bild 4 rot umrandet ist. Innerhalb dieses Messbereiches weist die atmosphärische Dämpfung ein lokales Minimum auf. Durch diese geringe Umweltabhängigkeit ist der Radarsensor bspw. gegenüber optischen Sensoren hinsichtlich Detektionsfähigkeit und Reichweite überlegen.

TAB 1. Technische Spezifikationen des Radarsensors.

Eigenschaft	Wert
Abmessungen (L x B x H)	50 x 40 x 20 mm ³
Elektrische Leistungsaufnahme	3,5 W
Einbaugewicht	200 g
Nutzbarer Frequenzbereich	68 – 93 GHz
Wellenlängenbereich	0,0044 – 0,0032 m
Antennenöffnungswinkel	5°
Bandbreite (einstellbar)	≤ 25 GHz
Rampenzeit (einstellbar)	1 – 16 ms
ADC Auflösung	16 Bit
ADC Spannung	5 V

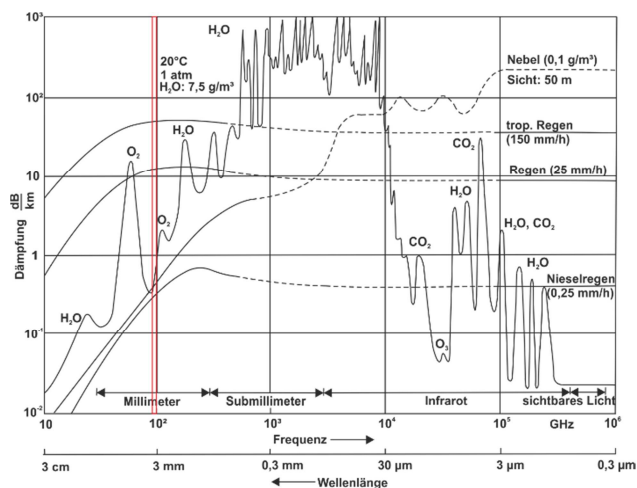


BILD 4. Dämpfung elektromagnetischer Wellen durch die Erdatmosphäre, in Anlehnung an [11].

4. FLUGVERSUCHSPLANUNG

Zur Evaluierung des Radarsensors wurde eine mehrstufige Flugversuchsreihe konzipiert. Die Durchführung der Flugversuche erfolgte auf einem Modellflugplatz nahe Aachen. Die horizontalen Abmessungen des zur Verfügung stehenden Luftraumes sind in Bild 5 dargestellt. Sämtliche Flugversuche wurden an einem Flugtag in einer Flughöhe von ca. 35 m über Grund durchgeführt.



BILD 5. Horizontale Abmessungen des für die Flugkampagne verfügbaren Luftraumes am Modellflugplatz [Quelle: Google Earth].

4.1. Aufbau des Erprobungsträgers und der Radarsensor-Nutzlast

Der Radarsensor wurde mitsamt seiner Stromversorgung und der Auswerteeinheit als autarke Nutzlast an ein ferngesteuertes Multirotorsystem angebunden. Bild 6 zeigt die an das Multirotorsystem angebundene Nutzlast.

Als autarke Stromversorgung diente ein Akkumulator. Die Auswerteeinheit bestand aus einem Raspberry Pi 3, mit dem die Sensoransteuerung über USB und die Datenauswertung ausgeführt wurden. Die Gesamtmasse der mitgeführten Nutzlast zur Versuchsdurchführung betrug ca. 600 g.



BILD 6. Anbindung des Radarsensors am Multirotor-system (rot umrahmt).

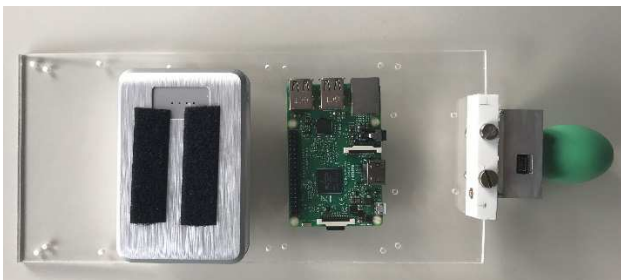


BILD 7. Nutzlastaufbau: Stromversorgung, Raspberry Pi 3 und Radarsensor (v. l.).

4.2. Genutztes Radarziel

Als Radarziel wurde ein ferngesteuertes Luftfahrtsystem genutzt. Der Zentralkörper des Luftfahrtsystems besteht aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung, während die Motorausleger aus kohlefaserverstärkten Kunststoff bestehen. Die Abmessungen des Luftfahrtsystems in Länge, Breite und Höhe sind gegeben zu: 438 x 451 x 301 mm³. Eine Darstellung des genutzten Radarziels ist in Bild 8 zu finden.



BILD 8. Das als Radarziel genutzte ferngesteuerte Luftfahrtsystem.

4.3. Beschaffenheit der Flugtrajektorie und Wahl der Radarparameter

Während der Flugversuche wurde das Radarziel entlang einer „M“-förmigen Trajektorie lateral zum Radarsensor bewegt. Hierbei wurde für eine erste Machbarkeitsstudie der Entfernungsbereich von 0-30 m gewählt.

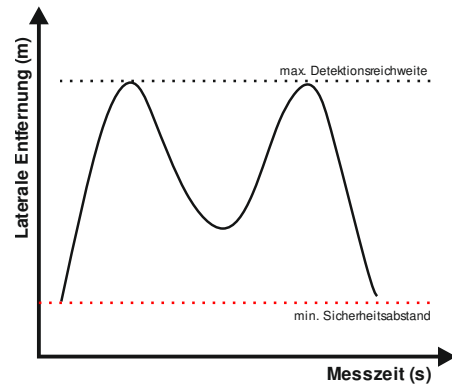


BILD 9. Geplante Flugtrajektorie des Radarziels.

Um die Radarmessung vergleichbar zu gestalten, wurde versucht das ferngesteuerte Luftfahrtsystem auf gleicher Flughöhe stets frontal in Richtung des Sensors auszurichten, um einen gleichbleibenden Radarquerschnitt zu gewährleisten.

In einer ersten Versuchsstufe wird die Auswirkung der Rampenzeitenvariation von 3 ms, 5 ms und 7 ms bei einer festen Bandbreite von 10 GHz und einer Trägerfrequenz von 77 GHz auf die Detektionsfähigkeit des Radarsensors untersucht.

Während der zweiten Versuchsstufe werden zwei unterschiedliche Bandbreiten (10 GHz und 7,5 GHz) bei einer festen Rampenzeit von 5 ms mit einer Trägerfrequenz von 77 GHz ausgewählt und ihre Auswirkung auf die Detektionsfähigkeit untersucht. Eine Übersicht der genutzten Radarsensordatenparameter ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

TAB 2. Gewählte Versuchsparameter des Radarsensors

Eigenschaft	Wert
Varierte Rampenzeiten	3 ms, 5 ms, 7 ms
Trägerfrequenz	77 GHz
Max. Frequenzbereich	72 – 82 GHz
Varierte Bandbreiten	5; 7,5 und 10 GHz
Messpunkte pro Rampe	1.000.000

5. VERSUCHSERGEBNISSE

5.1. Rauschverhalten des Radarsensors

Zu Beginn der Messkampagne wurden für die zuvor festgelegten Bandbreiten Leerraummessungen ohne ein Radarziel durchgeführt, um das Rauschverhalten des Radarsensors zu charakterisieren. In Bild 10 sind beispielhaft die Rohdaten einer Leerraummessung für den definierten Entfernungsbereich mit einer eingestellten Bandbreite von 10 GHz sowie einer Rampenzeit von 5 ms dargestellt.

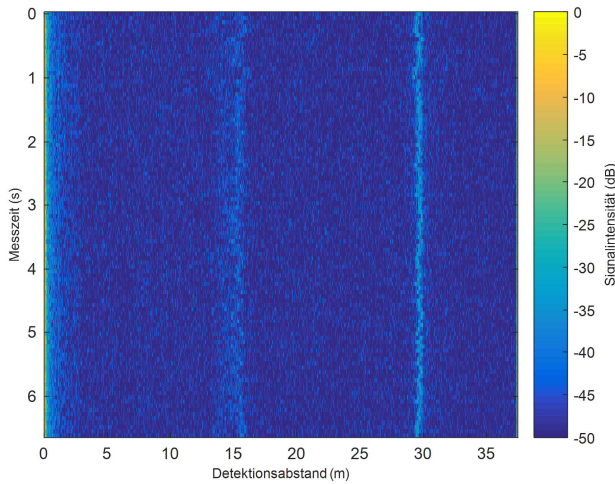


BILD 10. Luftraummessung zur Rauschcharakterisierung des Radarsensors.

Auffällig sind in der Luftraummessung drei über den gesamten Messzeitraum auftretende, räumlich klar abgegrenzte und scheinbar entfernungskonstante Signale gleicher Intensität: Im Messbereich von 0-1 m ist deutlich zu erkennen, dass starke Reflexionen gemessen werden, obwohl sich dort während der Messung kein Objekt befand. Dies liegt an Reflexionen innerhalb der genutzten Linse, die ein scheinbares statisches Objekt in geringer Entfernung zum Radarsensor repräsentieren. Die beiden in den Messbereichen 14–16 m sowie 29-30 m auftretenden Signale sind auf die verbaute Leistungselektronik des Radarsensors zurückzuführen.

Diese drei Störbänder wurden ebenfalls in den Messungen mit einer Bandbreite von 7,5 GHz sowie 5 GHz mit jeweils gleicher proportionaler Entfernungsverteilung gemessen. Um diese Störungen zu minimieren, wurde in den darauffolgenden Messungen der globale Mittelwert zu jeder Entfernungszelle über den gesamten Messzeitraum berechnet und von dieser im jeweiligen Messschritt subtrahiert. Dadurch konnten sowohl das Messrauschen gedämpft als auch die drei Störbänder aus der Messung entfernt werden, ohne die Reflexionssignale des zu detektierenden UAS stark zu dämpfen.

5.2. Untersuchung der Rampenzeitvariation

In der ersten Versuchsstufe wurde der Einfluss einer Rampenzeitvariation auf die Detektion des UAS untersucht. Nachfolgend sind die unterschiedlichen Detektionsergebnisse für die jeweilige gewählte Rampenzeit dargestellt. Das Detektionsabstandsintervall wurde aus Übersichtlichkeitsgründen in zwei Messungen auf 25 m sowie in einer Messung auf 30 m festgelegt.

Für die Detektionsfähigkeit des Radarsensors bezüglich des ferngesteuerten Luftfahrtsystems lässt sich feststellen, dass der Radarsensor in allen drei Messungen das UAS detektieren konnte. Allerdings lassen sich je nach gewählter Rampenzeit deutliche Unterschiede feststellen:

Bei einer Rampenzeit von 3 ms ist die detektierte Flugtrajektorie in Bild 11 vollständig abgebildet, zudem hebt sich diese deutlich ab. Außerdem zeigt die Messung be-

züglich der empfangenen Reflexionssignalintensität die beste Messgüte.

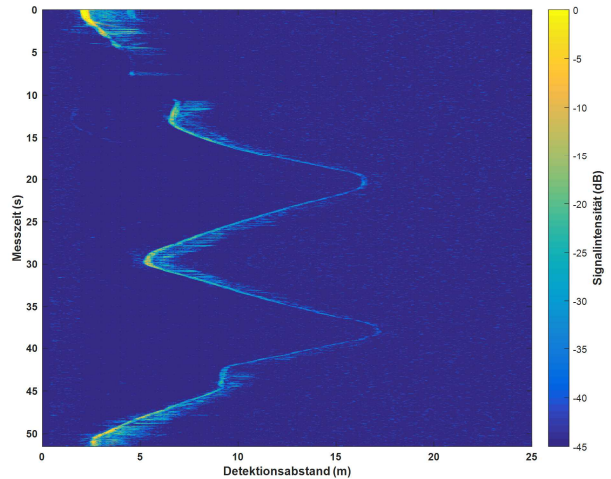


BILD 11. Detektion des UAS mit 10 GHz und 3 ms.

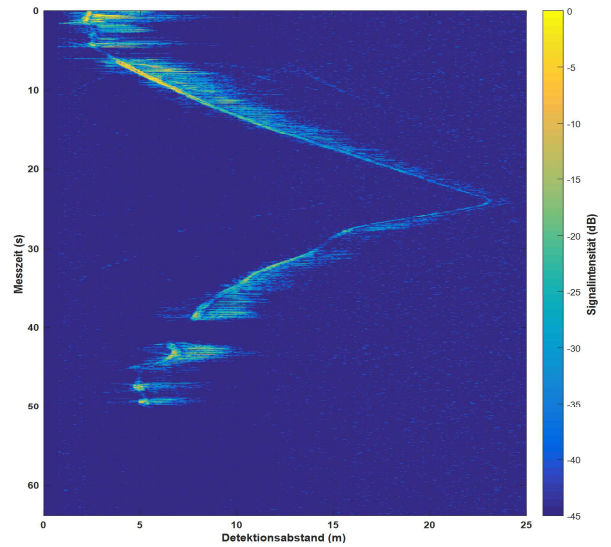


BILD 12. Detektion des UAS mit 10 GHz und 5 ms.

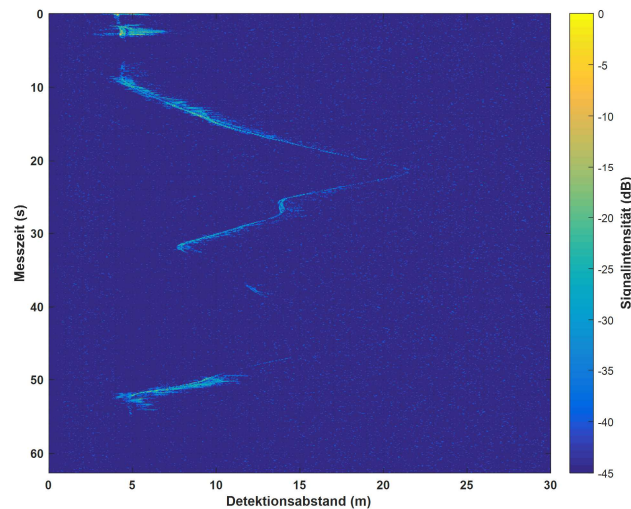


BILD 13. Detektion des UAS mit 10 GHz und 7 ms.

Sämtliche zur Flugtrajektorie gemessenen Signalintensitäten bewegen sich in einem Messintervall zwischen -10 dB und -38 dB.

Der Detektionsverlust des UAS im Messzeitraum von 5 s bis 11 s ist bedingt durch einen Einfluss von Windböen auf beide UAS. Durch diese Störung wurde das zu detektierende UAS kurzzeitig aus dem Sichtbereich des Sensors getragen.

Die Analyse der Messung mit einer Rampenzeit von 5 ms in Bild 12 zeigt eine ebenfalls nahezu vollständig detektierte Trajektorie. Im Unterschied zu der Messung mit 3 ms Rampenzeit erscheint gerade zu Beginn und Ende der Flugtrajektorie diese verschmiert.

Ebenfalls ist, im Gegensatz zur vorhergehenden 3 ms Messung mit 3 ms Rampenzeit ein sichtbarer Abfall der Signalintensität ab einem Detektionsabstand von 8 m erkennbar. So variieren die Messwerte zwischen -5 dB und -43 dB.

Analog zu der 3 ms Messung gab es während der 5 ms Messung einen Störeinfluss durch Windböen. Durch Einwirkung dieser wurde das zu detektierende UAS während des Messzeitraumes von 38 s bis 42 s wiederum aus dem Sichtbereich des Radarsensors bewegt.

Die Untersuchung der Messung mit 7 ms Rampenzeit in Bild 13 weist eine deutlich schwächere gemessene Signalintensität gegenüber den beiden zuvor diskutierten Messungen auf. Trotz der Aufbereitung der Messung konnte die Flugtrajektorie nicht über den gesamten Verlauf kontinuierlich detektiert werden, was jedoch nur bedingt durch Windböen induzierte Einflüsse im Messzeitraum erklärt werden kann (Messzeiträume 32 s bis 36 s, sowie 39 s bis 47 s). Es wird vermutet, dass die frontale Ausrichtung des UAS zum Sensor während des zweiten Bogenmanövers von 32 s bis 47 s durch die Böen nicht gänzlich eingehalten werden konnte, wodurch sich der reflektierende Radarquerschnitt verändert hat.

Als Fazit dieser ersten Messreihe lässt sich das Ergebnis festhalten, dass die Detektion des Radaziels mit dem untersuchten Radarsensor bei einer Rampenzeit von 3 ms und einer festen Bandbreite von 10 GHz das UAS am erfolgreichsten war.

5.3. Einfluss der gewählten Bandbreite auf die Detektionsfähigkeit

Wie zuvor in Kapitel 4 diskutiert, ist gemäß der Gleichung 4 die Entfernungsauflösung des Radarsystems primär abhängig von der gewählten Bandbreite. Um diesen Einfluss zu messen, wurde in einer zweiten Versuchsreihe dieser Einfluss der Bandbreite auf die Detektierbarkeit des UAS untersucht. Nachstehend sind in Bild 14, 15 und 16 die unterschiedlichen Messungen für 10 GHz, 7,5 GHz und 5 GHz bei einer einheitlichen Rampenzeit von 5 ms dargestellt. Das Detektionsabstandsintervall wurde aus Übersichtlichkeitsgründen in zwei Fällen auf 25 m sowie in einer Messung auf 30 m festgelegt.

Wie einleitend in der Gleichung 3 beschrieben, erhöht sich zwar bei einer Verringerung der Bandbreite die maximale Detektionsreichweite des Radarsystems von 75 m auf 150 m. Allerdings sinkt im Gegenzug die Entfernungsauflösung von 0,0145 m auf 0,0299 m.

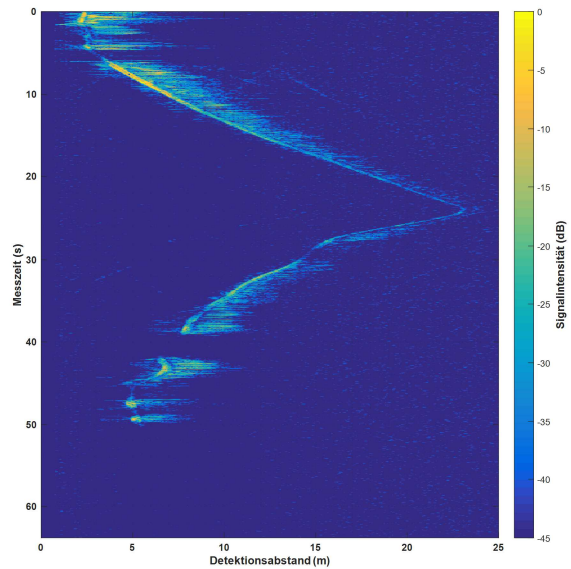


BILD 14. Radarmessung mit 10 GHz Bandbreite.

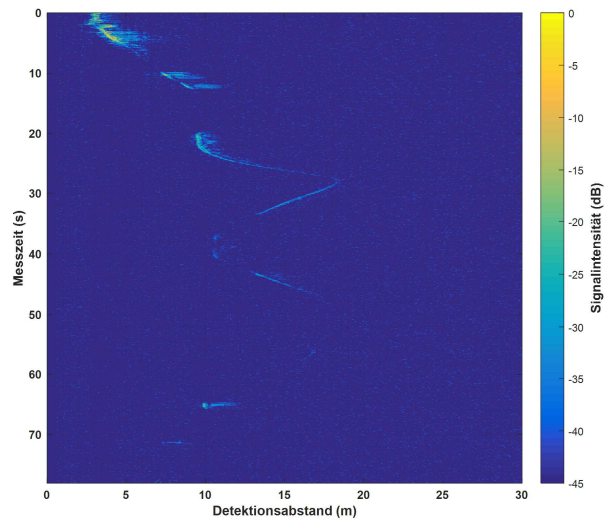


BILD 15. Radarmessung mit 7,5 GHz Bandbreite.

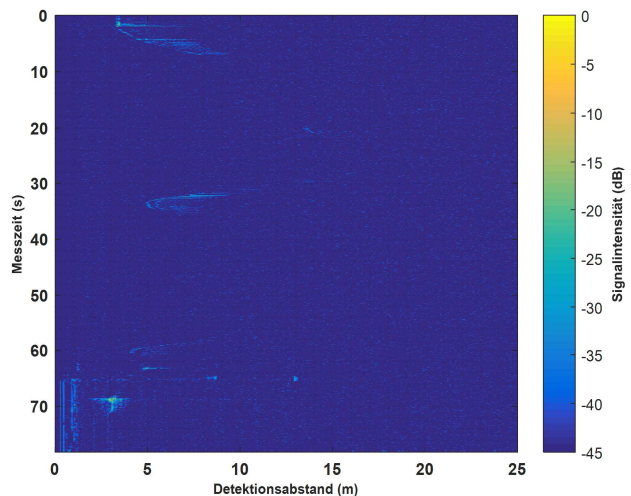


BILD 16. Radarmessung mit 5 GHz Bandbreite

Wie Bild 14 und Bild 15 entnommen werden kann, vermindert sich mit der Abnahme der Bandbreite auch die Sichtbarkeit der detektierten Flugtrajektorie des UAS. Die Messung in Bild 15 wirkt bspw. trotz Messaufbereitung kontrastärmer als die Messung in Bild 14. Die Messungen mit 5 GHz und 7,5 GHz Bandbreite hingegen können das UAS bereits nach 10 m Detektionsabstand nicht mehr kontinuierlich detektieren.

Als Fazit der zweiten Messreihe kann festgehalten werden dass bei ansteigender Bandbreite mehr Details des UAS detektiert werden können und somit das UAS insgesamt besser wahrnehmbar wird. Zur Detektion dieses UAS eigneten sich bei den Flugversuchen somit eine Rampenzeit von 5 ms und eine Bandbreite von 10 GHz am besten.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Veröffentlichung wurde ein möglicher Lösungsansatz für eine mitführbare Sensorplattform in Form eines miniaturisierten FMCW-Dauerstrichradars als Bestandteil eines hochautomatisierten, allwetterfähigen Kollisionsvermeidungssystems präsentiert. Hierbei wurde besonderer Fokus auf unbemannte Luftfahrtsysteme bis zu einer Abflugmasse von 25 kg gelegt. Es konnte durch Feldversuche gezeigt werden, dass mit einem solchen kompakten Radarsensor andere unbemannte kleine Luftfahrtsysteme detektiert werden können. Die Wahl der entsprechenden Parameter Bandbreite als auch Rampenzeit ist jedoch stets ein Kompromiss zwischen der maximalen Detektionsreichweite und der möglichen Detektionsauflösung des Sensors.

Für die Verwendung in einem Kollisionsvermeidungssystem müssen die gemessenen Daten direkt auf dem Träger-UAS ausgewertet und verarbeitet werden. Ein wichtiger Punkt hierbei ist eine echtzeitnahe Verarbeitungsgeschwindigkeit. Für die in dieser Publikation durchgeführten Versuche wurden die Daten im Nachgang der Messungen ausgewertet. Prinzipiell ist es jedoch möglich, mit der genutzten Messhardware die Berechnungen an Bord des Träger-UAS durchzuführen. Ferner muss der Radarsensor modifiziert werden, um eine höhere Detektionsreichweite zu ermöglichen. Zudem muss eine nächste Entwicklungsstufe des Radarsensors für Kollisionsvermeidungssysteme die Fähigkeit besitzen, Objekte dreidimensional anstelle entlang der Entfernung zu orten.

In weiteren Versuchen soll evaluiert werden, ob und mit welchem Aufwand eine Datenverarbeitung auf dem Träger-UAS realisierbar ist und wie die maximale Detektionsentfernung durch Hardwaremodifikationen verbessert werden kann.

LITERATUR

- [1] Y. Dobrev et al.: Paketkopter 3.0 – Entwurf und Validierung eines Präzisionslandesystems für unbemannte Tiltwing-Fluggeräte. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Braunschweig. 2016
- [2] R. K. Barnhart et al.: Introduction to Unmanned Aircraft Systems, CRC Press. 2012
- [3] T. Kotegawa et al.: Proof-of-Concept Airborne Sense and Avoid System with ACAS-X_U Flight Test. IEEE A&E Systems Magazine. 2016
- [4] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft: Zivile Drohnen – Chance oder Grund zur Sorge? Luftfahrt aktuell 03/ 2016.
- [5] H. Pham et al: A Survey on Unmanned Aerial Vehicle Collision Avoidance Systems. Cornell University. 2015
- [6] H. Winner et al.: Handbuch Fahrassistenzsysteme, 2. Aufl., Vieweg + Teubner Verlag. 2012
- [7] B. M. Albaker et al.: A Survey of Collision Avoidance Approaches for Unmanned Aerial Vehicles. International Conference for Technical Postgraduates Kuala Lumpur. 2009
- [8] C. Minwalla et al.: Experimental Evaluation of PICAS: An Electro-Optical Array for Non-Cooperative Collision Sensing on Unmanned Aircraft Systems. AIAA SciTech Grapevine. 2017
- [9] B. Minas und G. H. Goldman: Acoustic Detection and Tracking of a Class 1 UAS with a small tetrahedral Microphone Array. Technical Report ARL-TR-7086 U.S Army Research Laboratory. 2014
- [10] L. Stano et al.: Acoustic Scoring and Locating System for Rockets, Artillery & Mortars. Wireless World Workshop (W3) Enschede. 2011
- [11] J. Detlefsen: Radartechnik – Grundlagen, Bauelemente, Verfahren, Anwendungen, 1. Aufl., Springer-Verlag. 1989
- [12] M. Marston: Integrated Test and Evaluation – Flight Test 3 Flight Test Plan, Revision E. NASA Technical Report. 2015
- [13] G. Warwick: Unmanned Standards – Validation tests will determine if civil UAS can be certified to new standards at reasonable costs. Aviation Week 26.10.2015. 2015
- [14] C. Ben et al.: Radar-Assisted Three-Dimensional Operating Detect and Avoid System for Small Unmanned Aerial Systems. AIAA SciTech Grapevine. 2017
- [15] Bundesnetzagentur: Frequenzplan, aktuelle Fassung April 2016. 2017
- [16] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Kraftfahrzeug-Kurzstreckenradare im Frequenzbereich 21,65-26,65 GHz. Verfügung 41/2012. 2012
- [17] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Kraftfahrzeug-Kurzstreckenradare im Frequenzbereich 77-81 GHz. Verfügung 66/2014. 2014

[18] Jürgen Göbel: Radartechnik – Grundlagen und Anwendungen, 2. Aufl., VDE Verlag, 2011