

Aktuelle Herausforderungen in der Steuerung von einem UAV über einen Ka-Band Satellitenlink in einem Feuerwehreinsatz

M. Prexl, M. Tebbe, A. Höhn und U. Walter
Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15,
85748 Garching, Deutschland

Zusammenfassung

Im Zuge des DLR-Projekts CopKa soll eine neue innovative Kommunikationsstruktur für die Feuerwehr demonstriert werden. Im Gegensatz zu der bestehenden Funkkommunikation über terrestrische Relaisstationen sollen die Informationen bidirektional über einen Ka-Band Satellitenlink vom Einsatzfahrzeug zur Einsatzleitstelle übermittelt werden. Dabei sollen zusätzlich zu den Audiodaten auch Video- und Sensordaten an die Leitzentrale gesendet werden, um dem Mitarbeiter in der Einsatzleitstelle ein besseres Situationsbewusstsein zu geben und die Einsatzkräfte vor Ort zu entlasten.

Dabei steht vor allem ein Unmanned Aerial Vehicle (UAV) im Fokus, welches mit einem Kamerasystem und mit verschiedenen anderen Sensorsystemen ausgerüstet ist. Dieses UAV kann von der Einsatzleitstelle gesteuert werden und selbstständig auf Hindernisse und Gefahrenzonen reagieren. Die Sensordaten (z.B. Wärmebildkamera, Feuchtigkeitssensor, etc.) sollen das Lagebild in der Einsatzleitstelle deutlich verbessern, um die Einsatzkräfte vor Ort zu entlasten und dadurch eine schnellere Versorgung der Notfallopfer zu ermöglichen.

Hauptteil der Forschung an diesem Projekt ist der stabile Kommunikationslink zwischen Einsatzfahrzeug und Einsatzleitstelle sowie eine innovative und intuitive Human-Machine-Interface (HMI) zur Steuerung des UAV, wodurch eine schnelle Erfassung der Situation und Koordination der Einsatzkräfte ermöglicht werden soll.

Eine Herausforderung beim Aufbau des Kommunikationslinks besteht darin, dass sich die Antenne innerhalb weniger Minuten ohne weiteren Einsatz von Mitarbeitern automatisch ausfahren und mit dem Satelliten verbinden soll. Dazu müssen sowohl der Ort, die Lage, der Zeitpunkt, als auch Wetterbedingungen während des Einsatzes berücksichtigt werden. Diese Arbeit zeigt erste Ergebnisse für eine schnelle Ausrichtung der Antenne anhand eines Vergleichs zwischen kostengünstiger Hardware und einem teuren System basierend auf einem dualen GPS-Empfänger und einem genauen Inklinometer, um den Ort und die Lage des Einsatzfahrzeuges festzustellen.

Der zweite Teil befasst sich mit der HMI, welche einfach zu bedienen sein und sich für den Operator latenzfrei anfühlen soll. Teil der Untersuchung ist die Verwendung von kommerziell erhältlichen Head-Mounted-Displays (HMD) für eine einfachere Bedienung und die Verwendung von neuen 3D-Rekonstruktionstechniken aus Livedaten für eine bessere Übersicht über den Einsatzort. In dieser Arbeit wird ein Virtual Reality basiertes Teleoperationskonzept vorgestellt und wichtige Erkenntnisse präsentiert. Bei diesem Ansatz wird der Operator in eine Simulation transferiert, welche das Gefühl vermitteln soll in Echtzeit das UAV zu steuern und die Situation zu überblicken.

1. EINFÜHRUNG UND MOTIVATION

Hauptkomponente für den reibungslosen Einsatz von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) ist die interne und externe Kommunikation der verschiedenen Organisationen. Dabei war bis 1990 das analoge 2m- oder 4m-Band technischer Standard für viele Einsätze und konnte sich über lange Zeit etablieren [1], [2]. Um den Funktionsumfang zu erhöhen und die Störanfälligkeit zu verringern, wird seit 2010 der digitale Funk in den verschiedenen

Organisationen eingeführt [3][4]. Jedoch haben diese Technologien den Nachteil, dass sie auf terrestrische Infrastruktur zurückgreifen und nur Audiodaten übertragen, das heute nicht dem neuesten technischen Standard entspricht [5][6]. Deshalb fördert die Deutsche Luft- und Raumfahrtagentur eine Technologiedemonstration einer satelliten-gestützten Ka-Band-Kommunikationsarchitektur, kurz Projekt Copka, um hochdatenratige Informationen zwischen Einsatzort und Disponenten auszutauschen (siehe *BILD 1*). Ein UAV mit integrierter Videokamera dient dabei als

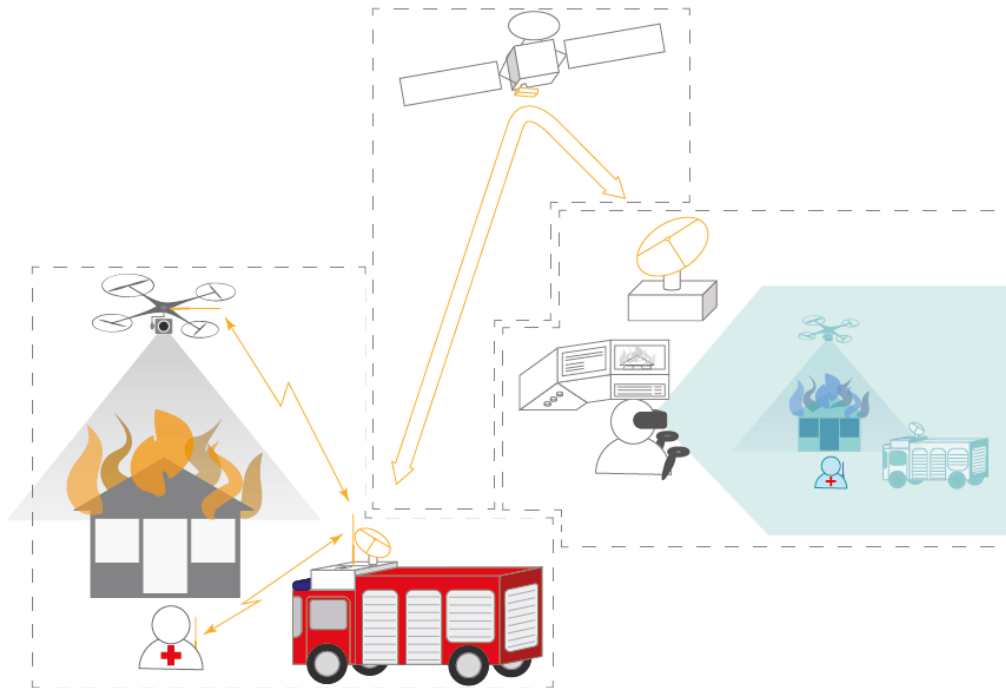


BILD 1: Schematische Zeichnung des CopKa-Projektes. Auf der linken Seite befindet sich der Einsatzort mit dem UAV, Feuerwehrauto mit integriertem Gesamtsystem und den Einsatzkräften. Das Gesamtsystem besteht aus der Kommunikationsanlage zum Satelliten und den verschiedenen Datenquellen (UAV, Sauerstoffwerte der Einsatzkräfte, etc.), als auch Start- und Landeplatz für das UAV. Auf der rechten Seite befindet sich der Disponent in der Leitzentrale mit dem klassischen Userinterface und moderner intuitiver VR-Technologie, um den Einsatz zu betrachten. Die Daten zwischen Einsatzort und Leitstelle wird über einen Ka-Band-Satelliten im GEO übertragen

Hauptdatenquelle, um dem Disponenten eine freie Bewegung und visuelles Feedback am Einsatzort zu ermöglichen. Dabei sollen die Einsatzkräfte vor Ort entlastet werden. Am Einsatzort selbst werden die verschiedenen Kommunikationstechnologien (WLAN, Funk, CAN-Bus, etc.) aus den Datenquellen zusammengefasst, dann nach Ihrer Wichtigkeit für den Disponenten priorisiert und schlussendlich über Satelliten zur Leitstelle übertragen. Dabei ist die zentrale Anforderung der Feuerwehr, dass alle Systeme autark und automatisiert vor Ort funktionieren, um den Einsatzbetrieb nicht zu stören.

2. HERAUSFORDERUNGEN

Während der Entwicklung eines funktionstüchtigen Demonstrators sind wir auf viele Herausforderungen gestoßen, welche wir in diesem Paper adressieren wollen. Dabei wurden vier Hauptherausforderungen identifiziert:

- Kostengünstige und komplementäre Integration des gesamten Systems auf das Dach eines Einsatzfahrzeuges der Feuerwehr. Dabei ist Hauptkostenpunkt von Seiten der Feuerwehr das UAV und die Satellitenkommunikationsanlage (SatCom).
- Identifizierung von geeigneter und kostengünstiger Sensorik für das automatisierte Ausrichten der SatCom auf dem Feuerwehrauto in Richtung des Satelliten. Robustheit und Zuverlässigkeit muss bei jeder

Wetterbedingung der SatCom Ausrichtung gewährleistet sein.

- Entwicklung eines Human-Machine-Interfaces (HMI) zur intuitiven und schnellen Bedienung des UAV für den Disponenten, ohne lange Trainingszeiten für die Steuerung.
- Untersuchung der Anforderungen an das UAV und der Kommunikationsarchitektur für einen reibungslosen Telepräsenzbetrieb.

In Abschnitt 2.1 wird ein experimenteller Aufbau zur Untersuchung von Sensoriken vorgestellt und erste Ergebnisse und Problematiken präsentiert. Danach folgt in Abschnitt 2.2 unsere Vorgehensweise zur Untersuchung der Anforderungen für das UAV und des HMI. Im letzten Abschnitt 2.3 wird ein mögliches Konzept für ein HMI vorgestellt, mit dem eine reibungslose und trainingslose Steuerung des UAVs durch den Disponenten ermöglicht werden soll.

2.1. Kostengünstige, schnelle und robuste Ausrichtung der Antenne

Für die SatCom wurde als erstes eine gewöhnliche mobile SatCom in Betracht gezogen, wie sie auf vielen Campingwagen und Journalistenfahrzeugen montiert sind [7]. Diese werden erfolgreich mit mobilen Kommandozentralen für Katastropheneinsätze verwendet [8], [9]. Jedoch werden viele dieser Antennen manuell ausgerichtet oder das Gerät scannt alle Himmelsrichtungen automatisch ab, bis ein Signal empfangen. Letzteres dauert bis

zu 8 Minuten, was für einen alltäglichen Gebrauch für die Feuerwehr ungeeignet ist. Eine andere Alternative wären SatCom-on-the-Move Antennen [10], [11]. Diese werden einmal auf den Satelliten ausgerichtet und kompensieren die Bewegung des fahrenden Fahrzeuges kontinuierlich durch ständige Nachführung. Dadurch bleibt auch bei der Fahrt zum Einsatzort eine dauerhafte Verbindung bestehen. Diese Anlagen werden erfolgreich im maritimen und militärischen Umfeld eingesetzt, sind aber mit einem technischen und für die Feuerwehr finanziell nicht erschwinglichen Aufwand verbunden. Um zwischen beiden Technologien eine Brücke zu schlagen, müssen ressourcengünstige Alternativen auf Ihre Tauglichkeit und Robustheit erforscht werden, um die SatCom automatisiert, kostengünstig und schnell auf den Satelliten auszurichten. Dazu wurde eine experimentale SatCom auf einem Anhänger installiert, um das System an verschiedenen Orten und Wetterbedingungen zu testen und den Aufbau für das Fahrzeugdach zu simulieren, wie es in *BILD 1* schematisch abgebildet ist.

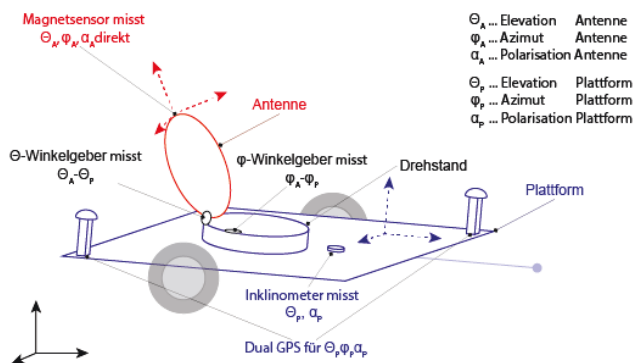


BILD 2: Schematische Darstellung der Experimental-Plattform zur Untersuchung der Sensorik. Dual-GPS und Inklinometer dienen zur Bestimmung der Lage des Anhängers. Die beiden Winkelgeber messen die absoluten Drehstandpositionen der Antenne. Beide Systeme kombiniert dienen als Referenzsystem für die exakte Ausrichtung. Weitere Sensoren werden auf die Oberkante der Antenne montiert und messen die Raumwinkel direkt auf der Antenne.

Festmontierte Sensoren, bestehend aus Inklinometer (NS-15/DMG2-U¹), dual GPS-Kompass (BX982² +LV59) und Winkelgeber (ExN 425³) dienen als genaues und magnetfeldunabhängiges Referenzsystem für die Messung der Sensorik. Die Genauigkeit liegt bei $< 0.1^\circ$ in allen Raumwinkel und $< 1\text{ m}$ für die Positionsbestimmung. Sowohl die Daten des Referenzsystems, als auch die zusätzlichen Daten der zu untersuchenden Sensoren werden in einen mobilen Rechner eingespeist. Der Algorithmus zum Ausrichten der Antenne wird ebenfalls auf dem mobilen Rechner

¹ Measurement Specialties Inc.
² Trimble Navigation Limited
³ Heidenhain

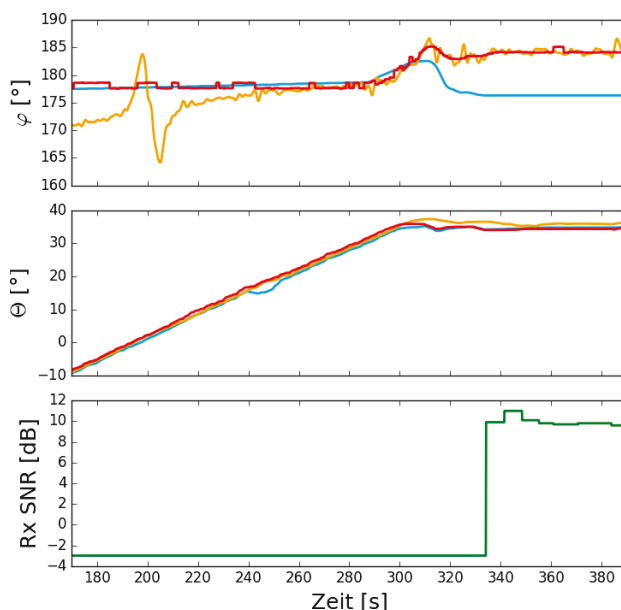


BILD 3: Azimutwinkel und Elevationswinkel für HMC 6434 (gelb), BNO 055 (blau) und Referenzsystem (rot), sowie die Empfangsstärke der Antenne bei der automatischen Ausrichtung auf den Satelliten Eutelsat KA-SAT 9A ($\Theta_{\text{Sol}} = 34.52^\circ$, $\Phi_{\text{Sol}} = 183.58^\circ$) bis Rx SNR $> 6\text{ dB}$. Start des Suchprozesses bei $t = 200\text{ s}$, zuvor Ausfahren der Antenne von liegender Ausgangsposition. Messbedingungen: Windgeschwindigkeit $< 2\text{ m/s}$, wolkenloser Himmel, Luftfeuchte 48% , Temperatur 25.6°C .

ausgeführt und erlaubt einen flexiblen Einsatz von verschiedenen Algorithmen am gleichen Standort. Weitere Sensoren können dynamisch hinzugefügt und mit verschiedenen Algorithmen und in Kombinationen mit anderen Sensoren untersucht werden.

In *BILD 3* sind Messungen mit dem Magnetsensor HMC 6434⁴ und der Inertial Measurement Unit BNO 055⁵ abgebildet, welche unter Idealbedingungen gemessen wurden (Windgeschwindigkeit $< 2\text{ m/s}$, Wolkenloser Himmel, 48% Luftfeuchtigkeit, Temperatur 25.6°C). Beide Sensoren wurden auf die Oberkante der Antenne montiert. Abgebildet sind hier die letzten 200 s der Ausrichtung von der liegenden Ausgangsposition. Bei der Azimutbestimmung des HMC Sensors ist zu erkennen, dass dieser von einem vorbeifahrenden Auto gestört wurde und eine leichte Elevationsabhängigkeit aufweist. Messungen zeigten, dass die Elevationsabhängigkeit linear ist und mithilfe eines zukünftigen Algorithmus kompensiert werden kann. Hat die Elevation eine bestimmte Neigung erreicht eignet sich der HMC zur Bestimmung des Azimutwinkels besser als der BNO 055. Dieser wurde durch das vorbeifahrende Fahrzeug nicht gestört, verfehlte aber den wahren Azimut um einige Grad. Es wird vermutet, dass dieses Verhalten durch den internen Algorithmus zur

⁴ Honeywell
⁵ Bosch Sensortec

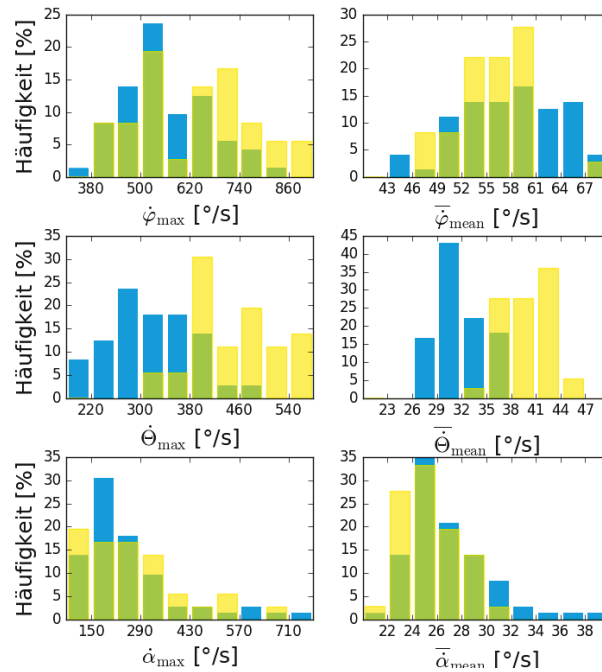


BILD 4: Histogramme der maximalen Winkelgeschwindigkeiten (Gier- φ , Nick- θ und Rollwinkel α) und der gemittelten Winkelgeschwindigkeit pro Proband. Gegenüberegestellt der natürlichen (blau) und aufgefoderten (gelb) Bewegungen zur Bestimmung der Maximalwerte. Die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit liegt zwei Größenordnungen unter den maximal aufgetretenen Geschwindigkeiten

Bestimmung der Orientierung verursacht wird. Dieser misst zusätzlich zur Nordausrichtung, die Rotationsbeschleunigung durch das interne Gyroskop und die Achsenbeschleunigungen durch den internen Beschleunigungssensor. Bei dem Vorbeifahrenden Fahrzeug konnten keine Beschleunigungen gemessen werden, wodurch der Fehler der Nordausrichtung korrigiert wurde. Bei der Drehung der Antenne wurden wahrscheinlich die Beschleunigungen falsch interpretiert, wodurch die Azimutbestimmung den „wahren“ Azimut verfehlt. Diese Fehler wurden oft bei einem Richtungswechsel des Azimuts beobachtet. Bei der Elevationsbestimmung ist beobachtbar, dass sich der BNO 055 besser eignet, als der HMC 6343. Letzterer weist leider einen höheren Offset-Fehler und eine kleine Zeitverzögerung zum Ist-Zustand auf. In TAB 1 sind nochmals alle Offsetfehler und Schwankungen der verschiedenen Sensoren aufgelistet. Somit ist klar erkennbar, dass der HMC 6343 sich für die Azimutmessung und der BNO 055 für die Elevationsmessung eignet. Um ein robuste und zuverlässige Ausrichtung zu gewährleisten, ist es notwendig beide Sensoren zu kombinieren. Bei einer Kombination beider Sensoren kann eine Genauigkeit von $< 1^\circ$ in allen Raumrichtungen erzielt werden. In weiteren Experimenten wird diese Sensoren-kombination intensiver untersucht und eine Verbesserung der Drehgeschwindigkeiten ist geplant. Die Ausrichtungsdauer von 330s ist für den täglichen Gebrauch nicht akzeptabel und wird vor allem durch das Ausfahren der Antenne bestimmt.

Kennwert	HMC 6343	BNO 055
Azimut-Offset	$0.1 \pm 0.8^\circ$	$10.1 \pm 3.8^\circ$
Elevation-Offset	$4.1 \pm 1.1^\circ$	$0.3 \pm 0.8^\circ$

TAB 1: Mittelwerte der experimentellen Abweichung vom Referenzsystem mit statistischer Schwankung.

2.2. Intuitive und schnelle Bedienung

Zusätzlich zu einer funktionierenden Kommunikationsarchitektur ist es unabdingbar, dass der Disponent das UAV während des Einsatzes problemlos steuern kann. Dazu muss der Disponent intuitiv und ohne langes Training, das Fluggerät bedienen und Informationen schnell verarbeiten können. Dabei ist es notwendig das Zusammenspiel zwischen den Fähigkeiten des UAVs, der Latenz des Kommunikationslinks und dem HMI in der Leitstelle zu untersuchen. UAV im Kontext eines Feuerwehreinsatzes wurden in der Vergangenheit zur Aufklärung vor Ort oder zur Überwachung von Feuerbränden erfolgreich eingesetzt [12], [13]. Diese Arbeiten bilden eine gute Grundlage für Operationen, welche in Zukunft implementiert werden können. Jedoch müssen diese Systeme vor Ort gesteuert werden und sind nicht flexibel genug, um im täglichen Arbeitsbetrieb Anwendung zu finden. Um die Anforderungen an das UAV und des HMI für einen alltäglichen Gebrauch zu identifizieren wurde eine rein virtuelle Simulation eines Einsatzes erstellt. Mithilfe dieser Simulation können Studien

mit dem VR-System HTC Vive durchgeführt werden, um geplante technische Umsetzungen und Bedienungskonzepte zu validieren.

Eine erste Studie wurde durchgeführt, um bei idealem Verhalten des Systems (Keine Kommunikationslatenz, alle Informationen vor Ort sind bekannt, 1:1 Übertragung der Bewegung des Menschen) die Nick-, Gier- und Rollbewegungen des Kopfes zu messen. Ziel dieser Untersuchung war es, die Anforderungen an die Kamerasteuerung des UAV zu bestimmen, sodass jede Bewegung des Kopfes vom Kamerasystem übertragen werden kann. Des Weiteren wurde das Verhalten der Probanden untersucht, um weitere Erkenntnisse für das HMI zu sammeln, welches schlußendlich in das in Abschnitt 2.3 vorgestellte Konzept eingeflossen ist. Die Studie wurde von 37 Teilnehmern, bestehend aus 32 Männer, 5 Frauen, mit einem Durchschnittsalter von 30,8 Jahren durchgeführt. Die meisten Probanden kamen aus dem akademischen Umfeld und verwendeten das VR-System HTC Vive zum ersten Mal.

In *BILD 4* sind die maximal aufgetretenen Winkelgeschwindigkeiten jedes Probanden und die durchschnittlichen gemessenen Winkelgeschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen (Gier- $\dot{\varphi}$, Nick- $\dot{\theta}$ und Rollgeschwindigkeit $\dot{\alpha}$) dargestellt. Dabei wurden zwischen natürlichen Bewegungen und aufgeforderte Bewegungen unterschieden. Dabei ist erkennbar, dass höhere Winkelgeschwindigkeiten erreicht wurden, wenn der Proband aufgefordert wurde so schnell wie möglich den Kopf zu drehen. Außerdem ist beobachtbar, dass die durchschnittlichen Bewegungen um 2 Größenordnungen niedriger sind, als der Mensch maximal fähig ist. Bei der Positionierung der Probanden wurde beobachtet, dass sich viele Nutzer natürlicherweise in eine erhöhte Position platzierten, um die Situation von oben zu evaluieren und wenig von der Ausgangsposition abgewichen wurde.

Im *BILD 5* dargestellten Heatmap aller Probanden ist zu sehen, dass sich der Kopf dabei hauptsächlich unter 0° Nickwinkel befindet und nur zur

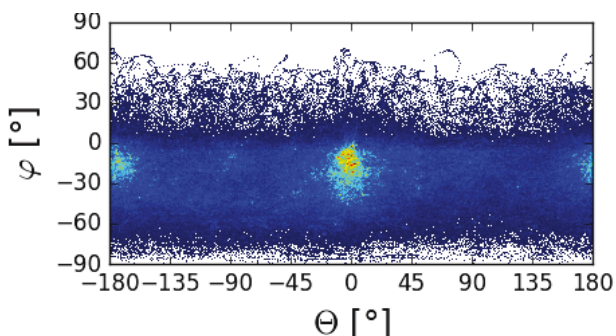


BILD 5: Heatmap aller Gierwinkel φ und Nickwinkel θ zeigt, dass Probanden meist von oben die Situationen beurteilen.

Orientierung nach Oben gesehen wird. Außerdem positionierten sich die meisten Probanden innerhalb des Einsatzes so, dass Sie in ihrer Grundausrichtung oder um eine 180° gedrehte Position bleiben können. Ein Zusammenhang zum Versuchsaufbau kann ausgeschlossen werden, da dieser so konstruiert wurde, dass dieser von allen Seiten betrachtet werden kann.

Aus dieser ersten Studie konnten viele Ergebnisse für das Design eines Human-Machine-Interface für CopKa ermittelt werden, welches in zukünftigen Simulationen erprobt werden. Diese Erkenntnisse sind in einem neuen HMI Konzept eingepflegt worden, um eine intuitive und schnell zu lernende Steuerung zu ermöglichen. Außerdem konnte mit hoher Präzision die Anforderungen für eine zukünftige kardanische Aufhängung ermittelt werden. Die Hauptkennwerte können in *TAB 2* eingesehen werden.

Kennwert	Maximum	95 % - Grenze
Nickgeschwindigkeit	700 °/s	420 °/s
Rollgeschwindigkeit	920 °/s	680 °/s
Giergeschwindigkeit	920 °/s	760 °/s

TAB 2: Experimentell bestimmte Winkelgeschwindigkeiten in drei Freiheitsgraden. Dargestellt ist jeweils die maximal aufgetretene Winkelgeschwindigkeit, so wie diejenige Geschwindigkeitsmarke unterhalb derer 95 % der aufgetretenen Geschwindigkeiten liegen.

2.3. Sicheres und latenzarmes HMI

Für die Steuerung von Teleoperatoren im Allgemeinen, wird zwischen zwei Arten unterschieden. Zum einen gibt es die direkte bilaterale Steuerung, bei der die realen Informationen in beiden Richtungen in Echtzeit umgesetzt werden [13]. Dabei ist die Latenz immer für den Operator spürbar und erfordert ein gewisses Maß an Erfahrung diese zu steuern. Jedoch bekommt der Operator aktuelle Informationen angezeigt und hat die volle Kontrolle über das UAV. Zum anderen gibt es Projective Virtual Reality, welche die Daten abstrahiert und dann in einer rein virtuellen Umgebung darstellt [14], [15]. Vorteil dabei ist, dass der Operator ohne Übertragungslatenz die Umgebung betrachten kann und Befehle anschließend vom autonomen Teleoperator ausgeführt werden. Der Nachteil dabei ist, dass die Umgebung schon bekannt sein muss, um eine gewisse Abstraktion zu ermöglichen. Das ist in Feuerwehreinsätzen generell schwierig, da oft vorher bekannte Strukturen durch den Unfallgeschehen zerstört wurden. Beide Varianten eignen sich also nur bedingt für den Einsatzbetrieb,

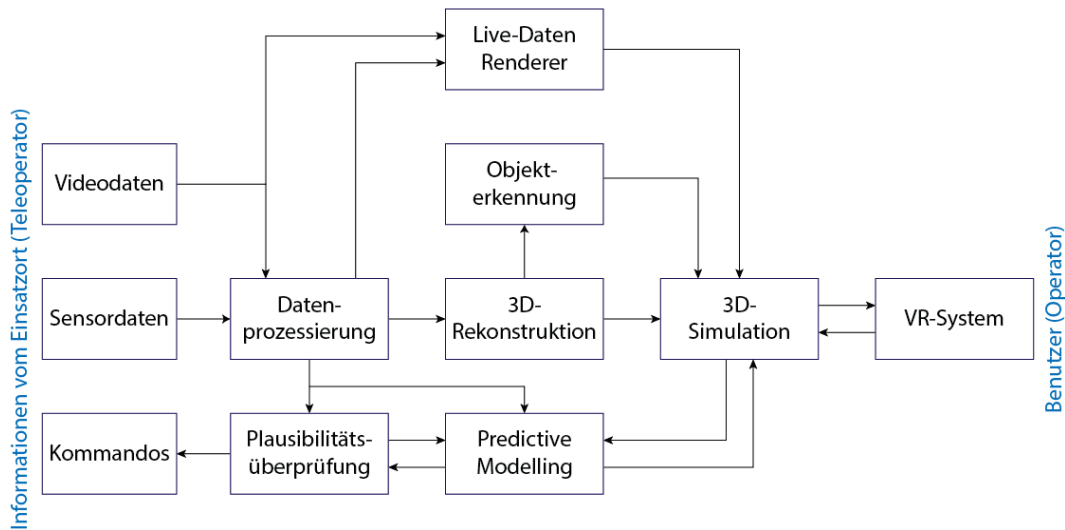


BILD 6: Konzept für ein HMI zur sicheren, intuitiven und trainingsarmer Bedienung eines UAVs. Alle verarbeiteten Daten werden in einer 3D-Simulation dargestellt, in der sich der Benutzer durch das VR-System befindet. Video- und Sensordaten werden in Echtzeit durch den Live-Daten Renderer angezeigt, dass immer der aktuelle Status des UAV und der Umgebung angezeigt wird. Mithilfe von 3D-Rekonstruktion und Objekterkennung soll das Situationsbewusstsein gestärkt werden. Durch Predictive Modeling und Plausibilitätsprüfungen sollen Bewegungen und Kommandos vorher geprüft und vorberechnet werden, um dem User direkt ein Feedback zur aktuellen Situation zu geben.

da einerseits der Disponent nicht immer den Flugkörper direkt steuern kann, andererseits, das oft gar keine Vorkenntnisse von der Umgebung vorliegen. Deshalb wird hier ein HMI vorgestellt, welches Vorteile beider Bedienkonzepte mithilfe 3D-Rekonstruktion und Objekterkennung vereinen soll.

Hauptkomponenten des Steuerkonzeptes, welches in *BILD 6* gezeigt wird, sind die Ein- und Ausgänge zum Teleoperator, eine 3D-Simulation, in der sich die Person während des Einsatzes befindet und dem VR-System HTC Vive als Ausgabegerät für den Operator. Für die Eingänge wird zwischen den Live-Videodaten und den Sensordaten, welche Echtzeit-Telemetrie oder niedriger priorisierte Statusdaten beinhalten, unterschieden. Um dem Benutzer schnellstmöglich die Livebilder darzustellen, werden die Videodaten durch den Live-Daten Renderer direkt dem Benutzer angezeigt. Im Unterschied zu den im Drohnensport verwendeten HMD sollen die Daten nicht direkt auf beide Augen übertragen werden, sondern in der 3D-Simulation auf einen Schirm dargestellt werden, welche das aktuelle Bild anzeigt. Außerdem sollen aktuelle Telemetriedaten, wie Höhe und Richtung direkt eingeblendet werden, da viele Probanden mit absoluten Zahlen eine bessere Kontrolle verbinden. Untersuchungen der Studie zeigten auch, dass die Probanden wiederkehrend an die gleiche Position wechselten, um bereits gesehenes zu kontrollieren oder um sich zu orientieren ohne direkte Details zu betrachten. Da die Drehgeschwindigkeit für einen UAV begrenzt ist, besteht trotz vorhandener Latenz die Notwendigkeit die Umgebung darzustellen. Dies kann durch die Rekonstruktion des Videomaterials bewerkstelligt werden. Dazu müssen Video- und Sensordaten

zuerst in der Datenprozessierung verarbeitet und anschließend mithilfe eines 3D-Rekonstruktionsalgorithmus in 3D-Modelle umgewandelt werden, welche dem User schließlich in der 3D-Simulation angezeigt wird. Dadurch ist es möglich, dass sich der User ohne Latenz positionieren kann und nicht warten muss, bis das UAV die tatsächliche Position erreicht hat und Livebilder sendet.

Als Ausgang dienen Kommandos, welche vom automatisierten UAV interpretiert werden können. Um die Latenz zu minimieren, können zwei wichtige Komponenten helfen, um die „gefühlte“ Latenz zu minimieren. Zum einen hilft Predictive Modelling dem User den aktuellen Zustand des UAV im Voraus anzuzeigen. Zum anderen kann man mit Predictive Modelling die Bewegung des Users vorberechnen und diese schon vorab an das UAV senden. Des Weiteren sollen invalide Kommandos oder physikalisch nicht machbare Bewegungen dem User direkt angezeigt werden. Dadurch kann vermieden werden, dass der User zu spät die Rückmeldung bekommt, dass diese Bewegung nicht möglich ist.

Für das Vorberechnen des aktuellen Zustandes des UAVs durch Predictive Modeling müssen die Eingaben des Benutzers, Livedaten des Vehikels und physikalische Gegebenheiten berücksichtigt werden, um akkurate Vorhersagen zu liefern. Das soll dem User dabei helfen, den aktuellen Zustand des UAVs anzuzeigen und ein Überspringen der Steuerung verhindern. Um die Latenz noch weiter zu verringern, sollten die Bewegungen des Users vorhergesagt werden. Es wurde beobachtet, dass Bewegungsmuster der Probanden erkennbar sind

und im weiteren Sinne vorhergesehen werden können. Dadurch können dem UAV schon vorab Befehle über den tatsächlichen Endpunkt der Bewegung gesendet werden.

Ein weiterer Immersionsbruch wird durch nicht ausgeführte Befehle hervorgerufen, welche natürlich zeitverzögert an den User vom UAV zurückgesendet werden. Um dies zu verhindern, sollen alle Aktivitäten des Benutzers durch eine Plausibilitätsprüfung geprüft werden und bei negativen Ergebnissen dem User angezeigt werden. Dabei ist es wichtig, die genauen Möglichkeiten des Fluggerätes zu kennen (Collision Avoidance, Attitude Hold). Aus diesen Kenntnissen ist es wichtig, dass das UAV autonom agiert und allgemeine Kommandos interpretieren, überprüfen und ausführen kann.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Es konnte gezeigt werden, dass mit der Kombination von Sensoren eine schnelle kostengünstige und robuste Ausrichtung mithilfe der Sensoren HMC 6343 und BNO 055 möglich sind. Weitere Untersuchung der Robustheit des Algorithmus und der Sensorkombination in verschiedenen Wetterbedingungen werden durch die vorgestellte Experimentalplattform durchgeführt und werden mehr Klarheit über die Alltagsfähigkeit der automatisierten Ausrichtung zeigen. Außerdem muss die Schnelligkeit des automatischen Ausrichtens verbessert werden. Zudem konnte mit einer rein visuellen Simulation mit dem VR-System HTC Vive Anforderungen für das UAV und HMI gefunden werden. Durch die gewonnenen Erkenntnisse wurde das bereits bestehende HMI-Konzept durch 3D-Rekonstruktion, Predictive Modeling des UAVs und des Users erweitert.

4. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei den Förderern DLR Raumfahrtmanagement (FKY 50YB1523 COPKA), so wie bei unseren Partner IMST GmbH, LSE Space und TV1 für die Unterstützung

REFERENZEN

- [1] Hermann, C. (2005). Analoge Funkkommunikation der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS).
- [2] Wehner, R. TETRA-Standard.
- [3] Wahl, A., & Knödler, S. (2012). Schluss mit analog "–Was bringt der Digitalfunk?. *retten!*, 1(01), 16-19.
- [4] Bode, D., & Breitner, M. H. (2004). *Neues digitales BOS-Netz für Deutschland: Analyse der Probleme und mögliche Betriebskonzepte*. IWI.
- [5] Colonnese, S., Nantista, G., Sansone, C., & Scarano, G. (2005). Low bit-rate H. 264 coding for video communications in TETRA systems. VLBV.
- [6] Samarakoon, M. I., Honary, B., & Rayne, M. (2000). Encrypted video over TETRA. In *Tetra Market and Technology Developments (Ref. No. 2000/007)*, IEE Seminar on (pp. 3-1). IET.
- [7] (2016) Media Mobil Produkt [Online], <http://www.mediamobil.de>
- [8] (2016) Gimaex, Communication Units, <http://www.gimaex.com/>
- [9] Takahashi, T., Jeong, B., Okawa, M., Akaishi, A., Asai, T., Katayama, N., ... & Kadowaki, N. (2013, June). Disaster satellite communication experiments using winds and wireless mesh network. In *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013 16th International Symposium on* (pp. 1-4). IEEE.
- [10] Marcellini, L., Forti, R. L., & Bellaveglia, G. (2011, April). Future developments trend for Ku and Ka antenna for Satcom on the move. In *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*.
- [11] Beljour, H., Coryell, L., Fung, T., Gallagher, J., Hoffmann, R., Michael, G., & Shields, J. (2009, October). Army SATCOM on the move technology initiatives. In *MILCOM 2009-2009 IEEE Military Communications Conference* (pp. 1-7). IEEE.
- [12] Yuan, C., Zhang, Y., & Liu, Z. (2015). A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Canadian journal of forest research*, 45(7), 783-792.
- [13] Quaritsch, M., Kuschnig, R., Hellwagner, H., Rinner, B., Adria, A., & Klagenfurt, U. (2011, May). Fast aerial image acquisition and mosaicking for emergency response operations by collaborative UAVs. In *Proceedings for the International ISCRAM Conference* (pp. 1-5). Hokayem, P. F., & Spong, M. W. (2006). Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 42(12), 2035-2057.
- [14] Freund, E., & Rossmann, J. (1999). Projective virtual reality: Bridging the gap between virtual reality and robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(3), 411-422.
- [15] Milanes, C., Scaria, L., Phan, T., Bolas, M., & Ayanian, N. Mixed Reality for Robotics.