

# MAN-IN-THE-LOOP-SIMULATOR: AUFBAU UND ERSTE ERGEBNISSE EINES SIMULATORS ZUR ONLINE-FÜHRUNG EINES LENKFLUGKÖRPERS UNTER VERWENDUNG VON SUCHKOPFBILDERN

S. Lohmann, A. Schöttl,

LFK-Lenkflugkörpersysteme GmbH, Landshuter Str. 26, 85716 Unterschleißheim,  
Deutschland

## Zusammenfassung

Für einen Man-in-the-Loop-Simulator wurde bei LFK – Lenkflugkörpersysteme GmbH eine generische Lenkflugkörpersimulation aufgebaut, die durch Laden variabler Parametersätze die Simulation unterschiedlicher Lenkflugkörper ermöglicht. Die vom Suchkopf registrierten Umgebungsbilder werden durch eine Echtzeit-Bildgenerierung erzeugt und stehen online zur Verfügung. Um während des Fluges Informationen über die Umgebung des Flugkörpers und das anvisierte Ziel zu erhalten, wurde im Simulator ein Modul integriert, das die Übertragung von Daten an bzw. von einer Bodenstation simuliert. Hierbei werden vom Flugkörper nicht nur Positions- und Lagedaten gesendet, sondern auch realistische IR-Suchkopfbilder. Der Bediener hat nun die Möglichkeit, über einen Joystick die Sucherausrichtung zu ändern, Zielkoordinaten zu aktualisieren oder einen Missionsabbruch zu kommandieren. Hierdurch ist eine Möglichkeit geschaffen worden, über die bisherige unverifizierte Übermittlung reiner Koordinaten hinaus den Flugkörper anhand der tatsächlich vom Sucher erfassten Signale aktiv zu führen.

Der Man-in-the-Loop-Simulator wurde in ersten Versuchen bereits an ein kommerzielles Satellitenkommunikationssystem gekoppelt und ein Roboter in 50 km Entfernung erfolgreich angesteuert. In der aktuellen Erweiterung der Simulation können Bildübertragungs- und Bildkompressionsraten sowie Latenzzeiten der Übertragung innerhalb der Simulation variiert werden. Der Einfluss dieser Parameter auf die Möglichkeiten zur Führung des Flugkörpers und die erfolgreiche Umsetzung der Kommandos können damit direkt untersucht und weiter verbessert und ausgebaut werden. Erste Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Bandbreite und Latenzzeit auf die Führungsmöglichkeit werden präsentiert und unter Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bewertet.

## 1. EINLEITUNG

Trotz der hohen Präzision moderner Flugkörper treten noch immer Kollateralschäden auf, die allein durch eine Verbesserung der automatisierten Systeme nicht verhindert werden können. Vor diesem Hintergrund entstand eine Entwicklung weg vom „fire and forget“-Prinzip hin zu einem Flugkörper, der selbstständig sein Ziel finden und zerstören kann, bei dem aber trotzdem eine Kontrolle durch einen menschlichen Operator gegeben ist. Diese kann beispielsweise durch einen Man-in-the-Loop realisiert werden, der die Sucherbilder des Flugkörpers empfängt, analysiert und ggf. Maßnahmen wie Kurskorrekturen oder den Missionsabbruch kommandieren kann. Zur Untersuchung der Umsetzungsmöglichkeiten eines solchen Man-in-the-Loop-Prinzips wurde bei LFK eine Simulationsumgebung aufgebaut, die neben der reinen Flugkörper-Simulation auch eine Bodenstation und zur Verbindung der beiden Teile einen Datenlink umfasst. Für die Übertragung der Suchkopfbilder können Bandbreite und Verzögerung in

der Simulation variiert und die Auswirkung auf die Kontrollmöglichkeiten eines Operators untersucht werden.

## 2. MAN-IN-THE-LOOP-PRINZIP

Das Prinzip des Man-in-the-loop zur Online-Überwachung eines Lenkflugkörpers ist in Bild 1 dargestellt. Ein Flugkörper wird mit einer vorgegebenen Mission bzw. einem vorprogrammierten Ziel gestartet und fliegt entlang dem flugkörperspezifischen Profil autonom auf das Ziel zu. Während des Fluges übermittelt der Flugkörper über einen Datenlink ständig Daten an eine Bodenstation. In der derzeitigen Ausbaustufe der Simulation werden folgende Informationen übertragen:

- das Bild des Infrarot-Suchkopfes,
- die Position des anvisierten Ziels im Sucherbild (Haltepunkt),
- die Lagedaten des Flugkörpers,

- die Auslenkung des Suchers relativ zur Flugkörperachse,
- die Flugphase, in der sich der Flugkörper befindet (mid-course, endgame).

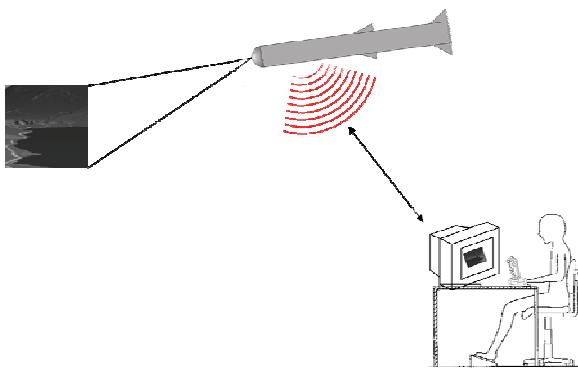


BILD 1. Übertragung von Sucherdaten per Datenlink an einen Operator

Die Bodenstation empfängt die Daten und bereitet sie so auf, dass sie einem Operator in geeigneter Form zur Verfügung stehen. Dieser kann sich in einer Kommandostation befinden, zu der die Datenlink-Daten über eine Satellitenverbindung übertragen werden oder aber es handelt sich um ein Mitglied einer mobilen Einsatztruppe in der Nähe des Zielgebiets, die die Daten des Flugkörpers direkt oder indirekt über eine Relais-Station erhalten.

Der Operator kann nun anhand der Sensordaten über einen Joystick eine Auslenkung des Suchers kommandieren, um eine genauere Aufklärung des Zielgebiets bzw. des Geländes auf dem Weg in das Zielgebiet zu erreichen. Durch Betätigen von Tasten wird eine Korrektur der Zielkoordinaten oder ein Missionsabbruch möglich. Die von der Bodenstation empfangenen Daten können aber auch rückwirkend für Analysen bereits abgeschlossener Mission dienen, ohne dass der Operator in den Ablauf eingegriffen hat. So kann die Auswertung der Bilder Informationen über weitere mögliche Ziele liefern, zur Auswertung des Schadens an bereits beschossenen Zielen dienen oder über die Lage im Zielgebiet in Bezug auf Veränderungen gegenüber den zum Startpunkt des Flugkörpers bekannten Informationen dienen (Abzug / Aufstellung von Fahrzeugen, Ansammlungen von Gegnern oder Zivilisten etc.). Letzteres ist insbesondere zur Vermeidung von Kollateralschäden von großer Bedeutung.

In der Vergangenheit wurde bei LFK bereits die Übermittlung von Suchkopfbildern über eine SATCOM-Satellitenverbindung erfolgreich getestet. Sender und Empfänger waren dabei in zwei Standorten der LFK im Abstand von ca. 50 km aufgestellt. Eine detaillierte Simulation ermittelte Lage und Position des Flugkörpers und dessen Antenne. In der aktuellen Ausbaustufe wurde die Satellitenverbindung durch eine konfigurierbare TCP/IP-Verbindung ersetzt, um variable Übertragungseigenschaften simulieren zu können.

Wichtig ist zu berücksichtigen, dass der Operator den Flugkörper über den Datenlink nicht direkt lenkt. Der Flugkörper ist auch ohne Eingriff des Operators in der Lage, die programmierten Zielkoordinaten anzufliegen und ggf. Kurskorrekturen einzuleiten. Die Umlenkung des Flugkörpers durch den Operator erfolgt in der dargestellten Form eines Updates der Zielkoordinaten. Die nötigen Lenkmanöver werden vom Autopiloten des Flugkörpers berechnet und über die Regelschleife umgesetzt.

### 3. AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DER SIMULATION

Die dem Man-in-the-Loop-Simulator zugrunde liegende Simulation besteht im Wesentlichen aus zwei Anteilen: der Flugkörper-Simulation und der Bodenstation-Simulation. Die beiden Simulationsteile werden jeweils auf einem separaten PC bzw. Laptop betrieben. Die Kommunikation zwischen beiden Anteilen wird jeweils über ein Datenlink-Modell realisiert, das die Informationen über eine konfigurierbare TCP/IP-Verbindung sendet und empfängt.

Der Flugkörper wird durch eine mathematisch digitale Simulation repräsentiert, die die physikalischen Eigenschaften eines Flugkörpers nachbildet. Die Flugkörpersimulation ist so parametrisierbar, dass Flugkörper mit unterschiedlicher Physik, Reichweite und Geschwindigkeit in ihrem Verhalten simuliert werden können. Für die ersten Tests wurde ein generischer Flugkörper mit einer Reichweite von 6 km und einer Geschwindigkeit von 300 m/s simuliert.

Zur Generation der Bilder im Infrarot(IR)-Suchkopf ist an der Flugkörper-Simulation die Echtzeit-Bildgenerierung EMIT (Extensible Multispectral Image Generation Tool) angeschlossen. Der Öffnungswinkel des Suchers beträgt  $12^\circ \times 12^\circ$ , das Sucherbild wird mit einer Auflösung von 256 x 256 Pixeln dargestellt. EMIT generiert Bilder in Blickrichtung des Suchers innerhalb eines vorgegebenen Szenarios, berechnet IR-Strahlungswerte und atmosphärische Dämpfung. Auf diese Weise entstehen Bilder, die der Realität im Suchkopf sehr nahe kommen [1]. In der Flugkörper-Simulation werden diese Suchkopf-Bilder mit dem jpeg2000-Algorithmus komprimiert und zusammen mit Daten über Lage des Flugkörpers, Flugphase und Haltepunkt des aktuellen Ziels an das Datenlink-Modul übergeben.

Die Übertragung per Datenlink kann in Bandbreite, Latenzzeit und Kompressionsrate des Sucherbildes variiert werden, um unterschiedliche Übertragungswege zu simulieren. In der Simulation wird hierzu eine Standard-TCP/IP-Verbindung zwischen den Laptops von Flugkörper- und Bodenstation-Simulation verwendet. Die Sucher-Daten werden gepuffert und entsprechend den Einstellungen für Latenz und Datenrate entweder gesendet oder, bei zu kleiner Bandbreite zur Übertragung aller Sucherbilder, verworfen.

Die Simulation der Bodenstation empfängt über ihr Datenlinkmodul die Sensordaten des Flugkörpers, dekomprimiert die Suchkopfbilder und stellt sie auf dem

Bildschirm des Operators dar (Bild 2a). Zur Kontrolle werden gleichzeitig auf dem Bildschirm der Flugkörper-Simulation die Sucherbilder unverzögert und unkomprimiert angezeigt.

Der Operator hat nun die Möglichkeit, über den angeschlossenen Joystick in die Simulation einzugreifen. Joystickauslenkungen werden über die Zeit integriert als Kommando zur Ausrichtung des Suchers an die Flugkörpersimulation übertragen, d.h. je länger der Joystick in eine bestimmte Richtung gehalten wird, umso größer ist die kommandierte Sucherbewegung. Die Amplitude der Joystickauslenkung ist dabei nicht von Bedeutung.

Bewegt der Operator den Joystick, so wird von der Software der Bodenstations-Simulation das dargestellte Bild zunächst entsprechend der erwarteten Sucherbewegung verschoben. Der Mittelpunkt des Suchers wird dabei ständig durch ein rotes Zielkreuz markiert, das im Flugkörper gespeicherte Ziel wird durch ein grünes Zielkreuz markiert. Der Bildanteil, für den aufgrund der prädizierten Verschiebung (noch) keine Daten vorliegen, wird blau dargestellt (Bild 2b). Dieses Vorgehen ermöglicht dem Operator, die neue Blickrichtung des Suchers abzuschätzen.

Die kommandierte Sucherbewegung wird an die Flugkörpersimulation übertragen und dort entsprechend den vorgegebenen Suchereigenschaften umgesetzt. Die nun vom Sucher empfangenen Bilder werden zurück an die Bodenstation gesendet. Sobald diese neuen Daten eintreffen, wird die Darstellung für den Operator aktualisiert und der blaue Bereich aufgefüllt (Bild 3a).

Drückt der Operator auf den Feuerknopf am Joystick, so wird die derzeitige Sucherausrichtung, markiert durch das rote Zielkreuz, als neuer Haltepunkt für das Ziel in die Flugkörper-Simulation übernommen (Bild 3b). Das grüne Zielkreuz, das die aktuelle Zielposition markiert wird von der Simulation also auf das rote Zielkreuz gesetzt. Die neuen Zielkoordinaten werden nach den aktuellen Winkelablagen der Suchermitte in Bezug zur Flugkörperachse festgelegt. Die z-Koordinate des Ziels beträgt dabei immer konstant 0 m. Der Autopilot des Flugkörpers wird nun im weiteren Simulationsverlauf Lenkmanöver einleiten, um das neue Ziel zu erreichen.

Erkennt der Operator, dass keines der Objekte im Blickfeld ein geeignetes Ziel darstellt, so kann er über einen weiteren Steuerbutton des Joysticks den Missionsabbruch befehlen. Die Simulation wird nach einer entsprechenden Zeitverzögerung, die für die Übertragung des Signals benötigt würde, abgebrochen.

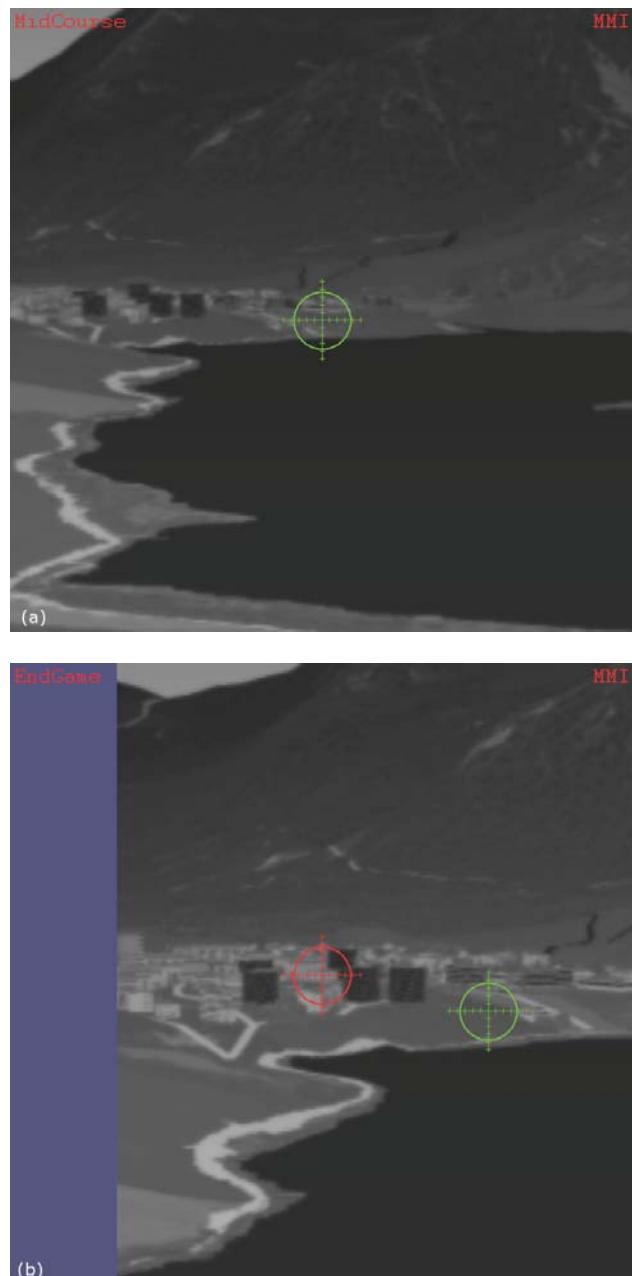


BILD 2. (a) Empfangenes Sucherbild in der Bodenstation: grünes Zielkreuz markiert das aktuelle Ziel; (b) Änderung der Sucherausrichtung durch den Operator: die Verschiebung der Perspektive wird prädiziert, bisher noch nicht im Sucher erfasste Bereiche werden blau dargestellt;



BILD 3. (a) Update vom Flugkörper mit neuer Sucherausrichtung ist erfolgt (rotes Zielkreuz), das grüne Zielkreuz zeigt weiterhin auf das aktuelle Ziel; (b) neue Zielkoordinaten wurden festgelegt, rotes und grünes Zielkreuz liegen aufeinander

#### 4. DURCHFÜHRUNG VON MAN-IN-THE-LOOP-SIMULATIONEN

Die Man-in-the-Loop-Simulation wurde zunächst qualitativ im Hinblick darauf getestet, wie Versuchspersonen mit dem realisierten Aufbau zureckkommen. Die Tests wurden jeweils mit 5-10 Personen durchgeführt. Es wurde ein Szenario verwendet, das die Umgebung des Schliersees darstellt. Der Flugkörper fliegt immer denselben Punkt an, der ohne Eingriff durch einen Operator im Gelände ausserhalb einer Stadt liegt. Als anzufliegende Ziele wurden wahlweise verschiedene Gebäude innerhalb einer Stadt (vgl. Bild 2 und 3) oder eine Brücke am Stadtrand angegeben. Die Dauer eines Simulationslaufs beträgt ca. 30 Sekunden. Folgende Gesichtspunkte wurden in der Auswertung berücksichtigt:

- 1) intuitive Reaktion von Testpersonen hinsichtlich des Aufbaus
- 2) intuitive Erfassung der übertragenen Daten
- 3) Auswirkung der Prädiktion der Sucherbewegung
- 4) Auswirkung der Latenzzeit in der Übertragung
- 5) Auswirkung der Datenrate der Übertragung
- 6) Auswirkung der Bildkompression

Zu 1) Der Testaufbau wurde von den Testpersonen allgemein positiv angenommen. Nach einer kurzen Einführung waren alle Personen in der Lage, die Simulation zu bedienen. Allerdings waren mehrere Testpersonen der Meinung den Flugkörper über den Joystick steuern zu können. Diese Assoziation wird vor allem durch gängige Flugsimulationen bzw. Computerspiele begünstigt.

Zu 2) Die Infrarot-Bilder des Suchers erwiesen sich als gewöhnungsbedürftig. Insbesondere für solche Objekte, die im Infrarot-Bereich wenig Kontrast gegenüber ihrer Umgebung aufweisen, war eine gewisse Trainingsphase nötig, um diese in den Bildern zu erkennen und den Sucher entsprechend auszurichten.

Die Darstellung von zwei identisch geformten Zielkreuzen, die sich lediglich durch ihre Farbgebung unterschieden, wurde allgemein bemängelt. Hier soll im weiteren Verlauf ein deutlicher Unterschied zwischen aktuell im Flugkörper gespeicherten Ziel und Markierung der Sucherausrichtung implementiert werden.

Ein drittes Zielkreuz, das die Lage des Flugkörpers bzw. die Ausrichtung der Flugkörperachse repräsentierte, wurde bereits nach ersten Testläufen eliminiert. Diese Art der Information erwies sich für die Entwickler der Simulation als sehr nützlich, um die korrekte Funktionsweise der Flugkörpersimulation zu überprüfen und könnte daher im Einsatz für eine ähnliche Kontrolle der Flugkörperdaten dienen. Für den unbedarften Operator erwiesen sich jedoch drei bewegte Zielkreuze als zu verwirrend, um innerhalb kurzer Zeit angemessen erfasst zu werden.

Auch die Darstellung weiterer Daten auf dem Bildschirm wurde im Entwicklungsverlauf minimiert, da sie von dem Geschehen auf dem Bildschirm ablenkten. Die Anzeige wurde auf die Angabe von „Midcourse“ bzw. „Endgame“ beschränkt, um den Testpersonen ein Gefühl dafür zu vermitteln, in welcher Flugphase sich der Flugkörper befindet.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Testpersonen jeweils nur ca. 10 Minuten Zeit hatten, sich an die Simulation zu gewöhnen. Eine längere Trainingsphase würde sicherlich dazu führen, dass mehr Daten erfasst werden können und die Identifikation bestimmter Objekte in den IR-Bildern schneller erfolgt. Alle Testpersonen zeigten nach ca. 15-minütiger Wiederholung der Simulation bereits deutlich verbesserte Identifikations- und Trefferquoten.

Zu 3) Die Prädiktion der kommandierten Sucherbewegung erwies sich als essentiell. Ohne diese Rückmeldung der Simulation über die voraussichtliche Magnitude der Sucherbewegung war die gezielte Ausrichtung des Suchers und damit auch das Anvisieren eines neuen Ziels nur sehr schwer möglich.

Zu 4) Die Simulation einer Latenzzeit machte Grenzen in der Eingriffsmöglichkeit eines Operators deutlich, da durch die realistischen Verzögerungen das Gefühl dafür verstärkt wurde, dass es sich um einen entfernten Flugkörper handelt und nicht um ein Computerspiel, das das Maximum der Bildwiederholraten voll ausschöpft. Bei hohen Latenzzeiten wurde es für alle Testpersonen schwierig, ein neues Ziel präzise anzuvisieren, da sich der Flugkörper in der Zeit zwischen Kommando und Realisierung deutlich weiterbewegt hatte und so die Übernahme der neuen Richtung in die Flugkörpersteuerung nicht mehr der vom Operator wahrgenommenen Ausrichtung entsprach. Des Weiteren wurde deutlich, dass eine hohe Latenzzeit dazu führen kann, dass der Flugkörper sein Ziel bereits erreicht hat, wenn ein Kommando zum Missionsabbruch eintrifft. Auch in dieser Hinsicht wurde ein gewisser Trainingsbedarf zur Gewöhnung an die Simulation geäußert. Weitere Vorschläge beinhalteten die Anzeige der noch zurückzulegenden Entfernung zum Ziel bzw. das Einblenden eines Zielbereichs, den der Flugkörper zum jeweiligen Zeitpunkt noch erreichen kann.

Zu 5) und 6) Die Verringerung der Datenrate hatte ähnliche Auswirkungen wie die Simulation einer hohen Latenzzeit, da die Darstellung bei geringer Datenrate stark ruckelt. Dieser Effekt konnte jedoch durch die Erhöhung der Bildkompression zumindest teilweise ausgeglichen werden. Die Bildkompression wiederum erwies sich aufgrund des sehr guten jpeg-Algorithmus als unproblematisch. Eine verstärkte Kompression ließ zwar das Bild größer aussehen, dies wirkte sich aber kaum darauf aus, wie gut Testpersonen Objekte im Sucherbereich identifizieren konnte.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch den Aufbau der Man-in-the-Loop Simulation bei LFK wurde die Möglichkeit geschaffen, die Möglichkeiten zur Online-Führung eines Flugkörpers unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Dabei können sowohl die Parameter zur Beschreibung des Flugkörpers variiert und somit unterschiedliche Flugkörpertypen dargestellt werden, also auch Eigenschaften des verwendeten Datenlinks an unterschiedliche Szenarien angepasst werden.

Der Aufbau der Simulation erwies sich insgesamt als sehr gelungen und wurde von Testpersonen positiv

aufgenommen. Es wurde allerdings deutlich, dass eine komplexere Online-Führung ohne ein intensives Training des Operators nicht möglich ist, da durch die Geschwindigkeit der Abläufe ein rasches Erfassen der Situation und der übermittelten Daten gefordert wird. Verschiedene Verbesserungsvorschläge zur intuitiven Erfassung der dargestellten Daten werden geprüft und ggf. in der Simulation umgesetzt werden.

Für zukünftige Tests ist weiterhin geplant, das Szenario des anfliegenden Flugkörpers stärker zu variieren, so dass kein Gewöhnungseffekt an die dargestellte Umgebung eintritt. Die dann erbrachten Führungs- und Trefferleistungen von Testpersonen werden hierdurch deutlich an Aussagekraft zulegen.

- [1] P. Obermeier, P. Schätz, R. Wiedemann: EMIT - Eine Infrastruktur zur Infrarot-Bildgenerierung; Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Aachen, 8.-9.9. 2009