Erfolg braucht Taktik – nicht bloß Masse. Wie die Bundeswehr mit GhostPlay das Defense Metaverse zur Fähigkeitsentwicklung nutzt

Heiko Borchert
Ko-Direktor Defense AI Observatory
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
hb@defenseai.eu

Christian Brandlhuber
CTO 21strategies
München, Germany
christian.brandlhuber@21strategies.com

Gary S. Schaal
Ko-Direktor Defense AI Observatory
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
gschaal@hsu-hh.de

Kurzfassung – **GhostPlay hat die Taktikentwicklung für rote und blaue Kräfte mit künstlicher Intelligenz (KI) als souveräne deutsche Fähigkeits- und Technologieinnovation etabliert. Im hochauflösenden und hyperrealistischen digitalen Zwilling des Gefechtsfeldes – dem Defense Metaverse – werden KI-basierte Entscheidungsverfahren entwickelt, die es erlauben, operative Fähigkeiten im Hinblick auf ihren Mehrwert für den Missionserfolg zu erproben. Die Interaktion mit einem nicht-kooperativen Gegner, dessen Fähigkeiten sich z. B. aus dem Wissen über gegnerische Kapazitäten, die Auswertung aktueller Konflikte und der Exploration künftig verfügbarer technischer Optionen ergeben, stellt den Kern des Ansatzes dar. Der Beitrag beleuchtet anhand der gemeinsam mit dem Amt für Heeresentwicklung durchgeführten Untersuchung, wie im Defense Metaverse Konzepte und Fähigkeiten entwickelt werden, um die Leistungsfähigkeit von Hubschraubern durch den Einsatz von Pseudomunition (Air-Launched Effects, ALE) gegen rote bodengebundene Flugabwehr (Ground-Based Air Defense, GBAD) zu steigern. Von entscheidender Bedeutung ist dabei nicht bloß der Einsatz unbemannter Systeme in Massen, sondern vielmehr die Taktik zum Anflug auf das gegnerische Ziel, zur Verwirrung bzw. Überwindung der gegnerischen Sensorik und Effektorik sowie zur emergenten Koordination der Schwarmmitglieder.**

Stichworte – Defense Metaverse, Fähigkeitsentwicklung, Künstliche Intelligenz, Red Teaming, Selbstkoordination.

NOMENKLATUR

AHEntwg	Amt für Heeresentwicklung
ALE	Air-Launched Effects
C-UAV	Counter-Unmanned Aerial Vehicle
DTED	Digital Terrain Elevation Data
GBAD	Ground-Based Air Defense
KI	Künstliche Intelligenz
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDO	Multi-Domain Operations
NLOS	Non-Line of Sight
SAR	Synthetic Aperture Radar
SDD	Software Defined Defense
UAV	Unmanned Aerical Vehicle

I. QUANTITÄT ALS QUALITÄT – VORSICHT VOR VOREILIGEN SCHLUSSFOLGERUNGEN!

2014 gehörten Robert O. Work, damaliger stellvertretender US-Verteidigungsminister, und Shawn Brimley mit ihrer Arbeit „20YY: Preparing for War in the Robotic Age“ [1] zu den ersten Autoren, die in Schwärmen autonomer Systeme ein potenziell revolutionäres neues Element der Kriegführung erkannten. Masse, so ihr Argument, zeichne sich als entscheidendes Kriterium für den Erfolg im Kampf gegen einen ebenbürtigen Gegner ab. „Quantität als Qualität“ hat sich seither zu einem Leitmotiv der Streitkräfteentwicklung der EU- und NATO-Staaten sowie ihrer Gegner entwickelt. Unlängst präsentierte Kathleen Hicks, gegenwärtig stellvertretende US-Verteidigungsministerin, mit der Replicator-Initative einen neuen Vorstoß, der umfassend auf Masse setzt [2]. Auch die Angriffe Russlands gegen die Ukraine seit 2022 und der im April 2024 erfolgte Einsatz von 300 Drohnen und Marschflugkörpern Irans gegen Israel scheinen zu belegen, dass sich diese Überlegung auch in aktuellen Konflikten widerspiegelt.

Ohne Zweifel spielt Masse eine wichtige Rolle, um z. B. gegen einen leistungsfähigen Gegner zu bestehen, etwa indem militärische Fähigkeiten verteilt und über verschiedene Dimensionen koordiniert zum Einsatz kommen. Aber, und diese einschränkende Frage ist wichtig, ist es tatsächlich allein die Masse, die den Ausschlag geben kann?

NEIN – lautet die Antwort, die der vorliegende Beitrag darauf gibt. Umfassende Arbeiten, die gemeinsam mit dem Amt für Heeresentwicklung (AHEntwg) im Rahmen des Vorhabens Wild Hornets durchgeführt wurden, deuten – mit Blick auf die spezifische Interaktion zwischen Drehflüglern und Pseudomunition (Air-Launched Effects, ALE) gegen bodengebundene Flugabwehr (Ground-Based Air Defense, GBAD) – klar darauf hin, dass dies nicht der Fall ist. Entscheidend ist vielmehr, dass diese Masse mit kluger Taktik eingesetzt wird. Dieser Hinweis ist umso relevanter, als er verdeutlicht, wie das Defense Metaverse, der digitale Zwilling des Gefechtsfeldes, der Elemente der analytischen und konstruktiven Simulation mit leistungsstarkem, KI-basiertem Red Teaming kombiniert, Planer und Konzeptentwickler vor Trugschlüssen bewahren kann, die weitreichende Folgen für die Streitkräfteentwicklung haben. Wild Hornets und die Fähigkeitsentwicklung im Defense Metaverse stehen damit stellvertretend für neue

Möglichkeiten, die Software Defined Defense (SDD) den Streitkräften bietet, um sich – ausgehend von analytische Konzepten, Designparametern über neue Systementwicklungen bis in den Einsatz und zur Ausbildung – auf eine grundlegende neue strategische Ausgangslage in Europa und die damit verbundenen Folgen für den Einsatz von Streitkräften im Rahmen der Landes- und Bündnisverteidigung [3] vorzubereiten.

II. Defense Metaverse: Worum geht es?

1992 prägte Neal Stephenson [4] den Begriff des Metaverse. Er beschrieb damit einen dreidimensionalen virtuellen Raum, in dem Menschen mit Softwareagenten interagieren. Jahrzehnte später ist der Begriff in Form des digitalen Zwillings als digitale Kopie physischer Objekte und Prozesse Realität. Im Kontext der Industrie 4.0 [5] dienen digitale Zwillinge von Produktionsanlagen und -abläufen oder von unternehmerischen Lieferketten beispielsweise dazu, Entwicklungs- und Fertigungsprozesse effizienter zu gestalten oder Lieferengpässe in der Versorgung in der digitalen Kopie frühzeitig zu erkennen und damit im realen Umfeld zu vermeiden.

Das Defense Metaverse setzt auf dieser Idee auf. Mit dem digitalen Zwilling des Gefechtsfeldes wird ein Abbild des Einsatzumfeldes geschaffen, das dieses möglichst realitätsecht wiedergibt [6]. Dabei geht es um Aspekte wie z. B. ländliche oder städtische Infrastruktur, Terrain, Vegetation, Wetterbedingungen oder realitätsnahe Sensor- und Effektoreigenschaften. Von zentraler Bedeutung für das mit GhostPlay aufgesetzte Defense Metaverse ist, Angreifer (rote Kräfte) und Verteidiger (blaue Kräfte) in simulierten Auseinandersetzungen (Multi-Agent-Learning & Deep-Reinforcement Learning) gegeneinander antreten zu lassen. Dabei ist das auf Selbstlernen basierende, nicht-kooperative Verhalten der roten Kräfte entscheidend, um bestehende Ansätze hinsichtlich der Konzeption, der Eigenschaften und der Fähigkeiten der blauen Kräfte kritisch zu hinterfragen und zu überprüfen.

Der im Rahmen von GhostPlay entwickelte digitale Zwilling der Einsatzumgebung unterscheidet sich aufgrund seiner vertikalen und horizontalen Durchlässigkeit von bislang verfügbaren Lösungen der analytischen bzw. konstruktiven Simulation im Verteidigungsumfeld:

- *Vertikale Durchlässigkeit:* Das mit GhostPlay konstruierte Defense Metaverse verbindet analytische und konstruktive Aspekte in einem neuen Aggregations- bzw. Disaggregationsansatz. Das erlaubt es, taktische Verhaltensweisen bei hoher Dichte an exemplarischen Szenarien auf ihre statistischen Erfolgsaussichten zu untersuchen. Gleichzeitig bleibt die Analyse von Einzelszenarien weiterhin möglich. Damit behebt das Defense Metaverse ein Problem von Wargaming und Ansätzen der analytischen Simulation: Im Unterschied zu diesen hängen die Ergebnisse nicht mehr von Analysteneinschätzungen ab, die verzerrt sein können (Bias), sondern werden in Einzelszenarien berechnet und aggregiert. Die sehr hohe Zahl an durchlaufenen Szenarien ermöglicht eine sehr hohe Abdeckung missionsrelevanter Anforderungen, ohne dass deren Aussagekraft aufgrund analytischer Verzerrungen eingeschränkt würde.
- *Horizontale Durchlässigkeit:* Parallel ermöglicht das in dieser Form konzipierte Defense Metaverse auch eine neue Form der cyber-physischen Durchlässigkeit. So können, abhängig von den zu untersuchenden Fragestellungen, z. B. probabilistische Modelle durch genauere signalbasierte Modelle simuliert werden. Ebenso ist es möglich, z. B. leistungsfähige generative KI-Methoden einzusetzen, um realistische Sensorcharakteristiken im Detail zu modellieren. Die horizontale Durchlässigkeit erlaubt es zudem, wie in Abschnitt V diskutiert wird, die im Defense Metaverse entwickelten KI-Taktiken physisch auf unbemannte Systeme im Einsatz zu übertragen und deren Leistungsfähigkeit unter Echtbedingungen zu bewerten.

Das Defense Metaverse ermöglicht es, Millionen von Szenarien zu durchlaufen, um die analytisch erforderlichen Antworten zu generieren. In konstruktiven Simulationen klassischen Zuschnitts ist dies ein Problem. Der Umstand, dass wesentliche taktische Bewegungen des Gegners in der Regel gescriptet werden müssen, gestaltet die Szenariobildung aufwändig. Dieser Umstand reduziert die Szenariovielfalt drastisch. Das schränkt wiederum die Aussagekraft der Analyse ein, denn diese ist nur für den untersuchten Szenariosatz repräsentativ. Damit werden z. B. überraschende Aktionen eines Gegners oder seine Flexibilität, die bekannt, aber nicht in die Szenarien integriert werden, kaum betrachtet.

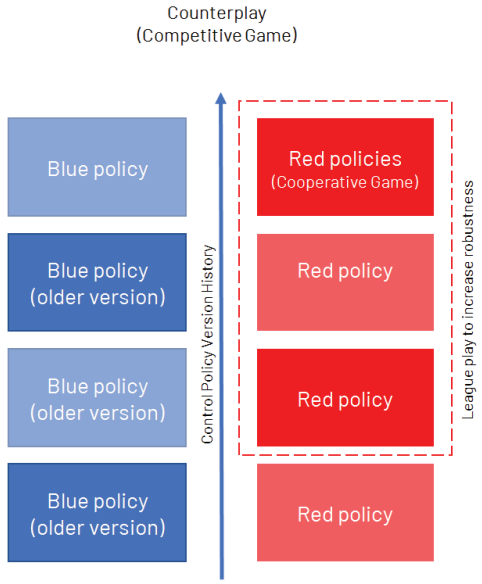

Abbildung 1: Counter-Play-Ansatz in GhostPlay

Um dieses Problem zu beheben, hat GhostPlay die Möglichkeit geschaffen, gegnerische Taktiken von Einzelobjekten, Gruppen und Verbünden im Verfahren des Counter-Play automatisch zu entwickeln (Abbildung 1). Dieser Ansatz erlaubt eine deutlich größere Szenarioabdeckung als klassische Simulationen. Außerdem eröffnet dieser Ansatz die Möglichkeit, Szenarien mit einer sehr hohen Anzahl koordinierter Objekte auf Ebene der jeweiligen Objektdetails zu simulieren und dadurch z. B. Kampfeinsätze hoher Intensität abzubilden.

III. Wild Hornets: Die Anforderungen des Amtes für Heeresentwicklung

Konzeptioneller Bezugspunkt für Wild Hornets (wilde Hornissen) sind die laufenden US-amerikanischen Bemühungen zur Entwicklung eines künftigen Ökosystems der Drehflügler. Im Kern geht es dabei um das Zusammenwirken von bemannten und unbemannten Systemen, sogenannten Air-Launched Effects (ALE) [7], [8]. Ausgehend davon entwickelt

das Amt für Heeresentwicklung (AHEntwg) seit 2022 eigene Konzeptvorstellungen zum taktischen Einsatz von ALE. Diese Arbeit sollte GhostPlay mit der Bereitstellung seines Simulationsumfeldes und der Entwicklung geeigneter KI-Taktiken unterstützen. In der Zusammenarbeit sollte aufgezeigt und nachgewiesen werden, welchen fähigkeitssteigernden Mehrwert KI für die Konfiguration und die Steuerung bzw. Führung von ALE im Einsatz gegen die leistungsfähige rote GBAD schafft. Daraus leiteten sich zwei zentrale Aufgabenstellungen ab:

- Evaluieren geplanter Konzepte für den taktischen ALE-Einsatz im Zusammenwirken mit bemannten Systemen gegen eine leistungsfähige rote GBAD.
- Szenariobezogenes Beschreiben und Simulieren der Schlüsselparameter (z. B. Sensorik, Effektorik), des Umfangs, der Konfiguration sowie des taktischen Verhaltens verschiedener ALE-Optionen.

Um die mit GhostPlay entwickelten Entscheidungsverfahren für Wild Hornets zu nutzen und die analytische Simulation durchzuführen, hat das AHEntwg spezifische Vignetten entwickelt und bereitgestellt sowie hierfür unterschiedliche Forschungsfragen definiert.

Die Basisvignette definiert dazu die gegnerische GBAD. Zu Beginn wurde der für GhostPlay umfassend modellierte Gepard Flugabwehrkanonenpanzer eingesetzt. Dieser GBAD-Typ wurde während der Projektentwicklung mit weiteren Komponenten ergänzt, die im nächsten Abschnitt diskutiert werden. Ferner umschreibt die Basisvignette in allgemeiner Weise die einzusetzenden ALE. Für die GBAD und die ALE wurden jeweils Reichweite und Sensorik spezifiziert, für die ALE zusätzlich deren Geschwindigkeit. Zudem zeigt eine taktische Geländekarte auf, wo die Stellungen der gegnerischen GBAD vermutet werden. In der Ausgangslage schützten die GBAD ein gegnerisches Hochwertziel. Die angreifenden ALE hatten die Aufgabe, die vorgelagerte GBAD zu neutralisieren bzw. zu zerstören, um auch das Hochwertziel ins Visier zu nehmen.

Die unterschiedlichen Vignetten beschreiben die Art und Weise, wie die Ziele angegriffen werden sollten, in zunehmend anspruchsvolleren Missionen. Dabei ging es darum, die Leistungsfähigkeit der KI-Taktik umfassend beurteilen zu können, nicht darum, eine bestimmte Angriffstaktik nachzumodellieren. Wie in [9] beschrieben, sollte die KI vielmehr unter Berücksichtigung der generellen Vorgaben für den Missionserfolg frei explorieren, wie sie ihr Missionsziel am besten erfüllt. Die mit Wild Hornets entwickelten ALE-Angriffstaktiken sind damit selbst erlernt und nicht vorgegeben.

IV. Defense Metaverse für Wild Hornets

Den Überlegungen des AHEntwg liegt ein spezifisches taktisches Anforderungsprofil zugrunde. Das Defense Metaverse musste für diese Anforderungen (z. B. Flüge in Höhe von Baumwipfeln, Vegetationsunterschiede) spezifiziert werden, denn nur damit war es möglich, die taktische Raffinesse zu erforschen, die es einer KI-Taktik ermöglicht, die Einsatzbedingungen optimal zum eigenen Vorteil zu nutzen.

Neben der Modellierung der roten und blauen Kräfte machte dies umfassende Arbeiten an der Modellierung der Einsatzumgebung erforderlich (Abbildung 2). Die vom AHEntwg bereitgestellten Vignetten gehen von einem durchschnittenen Gelände aus, das für Ost- und West-Europa repräsentativ ist. Konkret wurden Geländeabschnitte in der Region Roth, Allersberg, Neumarkt in der Oberpfalz in Franken/Bayern ausgewählt. Die realitätsnahe Simulation erforderte Geländedaten mit entsprechend hoher Auflösung. Die typischerweise für Simulationen verwendeten Digital Terrain Elevation-Daten (DTED) waren für Wild Hornets nicht ausreichend. Stattdessen wurden Daten benötigt, die idealerweise durch SAR-Satelliten gewonnen und mit LiDAR-Vermessungsflügen augmentiert werden. Konkret griff das Entwicklerteam für Wild Hornets auf Daten des Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern zurück, die dieses offen und kostenlos anbietet. In mehreren Entwicklungsschritten wurde die eigene Methode der Terrainerstellung im Defense Metaverse in einen produktionsreifen Prozess überführt, der für den Aufbau einer beliebigen zu simulierenden Einsatzumgebung genutzt werden kann. Mit diesem Prozess kann grundsätzlich innerhalb von ein bis zwei Wochen eine neue Einsatzumgebung mit der hohen Auflösung des

Abbildung 2: Modellierung der Einsatzumgebung für Wild Hornets

GhostPlay-Ansatzes erstellt werden. Dazu wurden eigenständige Softwareprozesse entwickelt, die die Vorverarbeitung und Aufbereitung aller Eingangsdaten und deren Umsetzung auf ein einheitliches Weltmodell weitgehend automatisch und parallel durchführen. Die so erstellten und transformierten Daten werden mit korrekter Geo-Referenzierung automatisch fusioniert und für die Simulation aufbereitet.

In analoger Weise wurden neben dem Terrain, den Gebäuden und spezifischen Wettereffekten – das GhostPlay Defense Metaverse simuliert Einsätze bei unterschiedlichen Hell-Dunkel-Graden, Schnee, Eisregen, Nebel etc. – auch die roten und blauen Waffensysteme modelliert. Gegenwärtig umfasst die Modellbibliothek dazu folgende Systeme:

- ALE und Lenkflugkörper: Switchblade 600 (AeroVironment), Altius 600 (Anduril), Hero (Uvision/Rheinmetall), Spike NLOS (Rafael)
- Drehflügler: Tiger und EC145M (beide Airbus Helicopters)
- GBAD: Gepard Flugabwehrkanonenpanzer (KMW), Patriot (RTX Corp und Lockheed Martin), S-400 Triumf (Almas-Antei), 96K6 Pantsir S1 und S2 (Rostec)
- Radarsysteme: 76N6 Tiefflugradar (Clam Shell, LEMZ)

Zusätzlich zu diesen bekannten Systemen fliessen in Wild Hornets auch Analysen des Einsatzes sogenannter First Person View (FPV)-Drohnen ein. Diese haben sich, wie die Entwicklungen in der Ukraine zeigen, zu einer veritablen Bedrohung für Bodentruppen entwickelt. Sie stellen auch für die GBAD eine erhebliche Bedrohung dar, weil sie noch kleiner als die beschriebenen ALE-Klassen und damit noch schwerer zu entdecken bzw. zu bekämpfen sind. Speziell die aggressiven Flugmanöver dieser Systeme, sofern sie von einem geübten Piloten gesteuert werden, stellen erhebliche Anforderungen an das Target Tracking der GBAD.

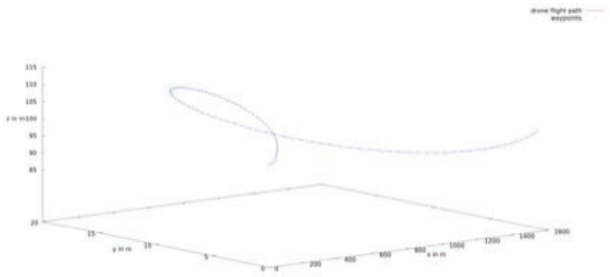

ABBILDUNG 3: TRAJEKTORIE EINER ANN-GESTEUERTEN FPV-DROHNE IN GHOSTPLAY

Gemeinsam mit dem kroatischen FPV-Hersteller Orqa wurden daher die bestehenden Simulationsmodelle von GhostPlay validiert, um die Entwicklung von Anforderungen und Modellen für diese neue Bedrohung zu analysieren. Dazu flogen professionelle FPV-Piloten dieses Herstellers auch im GhostPlay Defense Metaverse. Gestützt darauf wurde eine Entwicklungslinie implementiert, bei der eine Neuronal-Netz-Architektur (ANN) trainiert wird, um die optimalen Flugwege zu einem Ziel zu berechnen und direkt in den FPV-Aktuator-Inputs umzusetzen. Dieser Schritt verfolgte das Ziel, die gegnerische GABD in möglichst kurzer Zeit zu erreichen. Dabei sollte das Netz lernen, auch am aero-dynamischen Limit zu fliegen, falls dies der Zielerreichung dient (Abbildung 3).

V. ERGEBNISSE: TAKTIK, TAKTIK UND TAKTIK

Die Wild Hornets-Vignetten des AHEntwg waren mit spezifischen Untersuchungsfragen verbunden, die die Konzeptentwicklung des Amtes unterstützen. Dabei geht es um Aspekte wie z. B. die schrittweise oder gleichzeitige Zielbekämpfung, die Anflugrichtung und -höhe, den Formationsflug oder die Zusammensetzung eines ALE-Schwarms (homogen oder heterogen mit ALE unterschiedlichen Typs). Die Hauptergebnisse von mehr als 1,2 Millionen Szenarioläufen, die wir an dieser Stelle nur kursorisch zusammenfassen, sind ebenso eindeutig wie überraschend:

- *Erstens ist Saturierung mit Masse nicht das Allheilmittel:* Die Idee, einen Gegner mit bloßer Masse überwinden zu können, ist nicht zielführend – vor allem dann nicht, wenn der Gegner über eine intelligente Flugabwehr verfügt. Die Szenarien machen deutlich, dass eine qualifizierte GBAD insbesondere für den Nahbereich große ALE-Schwärme, die unvorteilhaft eingesetzt werden, verhältnismäßig leicht zerstört. Langsam und tiefffliegende ALE können dagegen unter realistischen Bedingungen sehr effektiv gegen eine solche GBAD eingesetzt werden – insbesondere dann, wenn sie auch Anflughöhe und -geschwindigkeit variieren. Der Schlüssel zum Erfolg liegt dabei in einer Angriffstaktik, die es ermöglicht, das Ziel weitgehend unentdeckt anzufliegen und dabei auch Überraschungsmoment (z. B. Anflug im Sinkflug aus der Sonne) zu nutzen. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die meisten Demo-Szenarien für die UAV-Abwehr, die zeigen, wie ein C-UAV-System stationär und meist in Formation neben- oder hintereinander fliegende Quadrocopter zerstört, die Realität nur ansatzweise korrekt wiedergeben.
- *Zweitens können ALE als „Türöffner" genutzt werden:* ALE können für die Zieleinweisung anderer Lenkflugkörper erfolgreich genutzt werden. So wurde mit Wild Hornets eine Taktik entwickelt, mit der ALE ein Ziel aufklären und die entsprechenden Positionsdaten an einen Lenkflugkörper übermitteln, der das Ziel zerstört. Die ALE profitieren dabei von der Möglichkeit, sich dem Ziel weitgehend unerkannt nähern zu können. Entscheidend ist aber auch hierfür die bereits erwähnte Möglichkeit des Tief- und Tiefstfluges der ALE, die – nach öffentlich frei verfügbaren Informationen – gegenwärtig noch nicht gegeben ist.
- *Drittens ist ALE-Kooperation entscheidend:* Das mit deutlichem Abstand am klarsten herausgearbeitete Ergebnis ergibt sich aus dem Umstand, dass Kooperation für den Erfolg des ALE-Schwarms gegen eine (auch intelligente) GBAD entscheidend ist. Verstehen es die Schwarmmitglieder, ihre Aufgaben und Sub-Aufgaben, die im Rahmen der Mission zu erfüllen sind, kooperativ selbst zuzuteilen und damit verteilt und koordiniert zu agieren, sind sie am effektivsten, weil Rollen und Timing einzelner ALE situativ abgestimmt und neu zugewiesen werden können. Dabei verdeutlichen die Simulationsläufe, dass – nach heutigem Stand der Technik – ein sich selbst koordinierender und kooperativer ALE-Schwarm mit 12–16 Mitgliedern das Missionsziel mit höherer Wahrscheinlichkeit erreicht als ein Schwarm mit 100 Mitgliedern, der nicht über diese Fähigkeit verfügt.

Aus der Gesamtbetrachtung dieser drei Ergebnisse resultiert die Einsicht, dass ein selbstlernender, kooperativer und sich koordinierender Aufklärungs- und Zielbekämpfungsschwarm (Recce-Strike Swarm) sehr gute Aussichten auf hohe Missionserfolge aufweist. Daher wurde mit Wild Hornets auf Wunsch des AHEntwg zusätzlich eine sophistizierte Aufklärungstaktik entwickelt, die wesentlich zu diesem Ergebnis beiträgt. Diese basiert nicht auf dem gegenwärtig bekannten Sweep-Ansatz, wonach UAV für die Aufklärung ein Gelände in regelmässigen parallelen Trajektorien abfliegen (Abbildung 4, links). Dieser Ansatz macht die eigenen Kräfte für den Gegner in hohem Masse berechenbar und damit verwundbar.

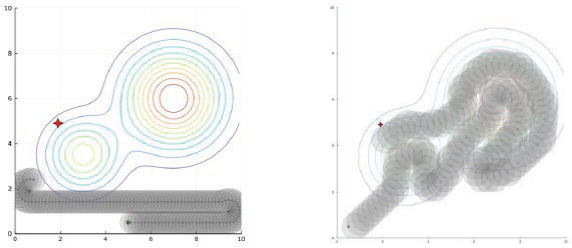

ABBILDUNG 4: AUFKLÄRUNGSSUCHSTRATEGIE SWEEP (LINKS) IM VERGLEICH MIT DEM WILD HORNETS-ANSATZ (RECHTS)

Im Unterschied dazu nutzt die neue Strategie Vorwissen über die möglichen Positionen gegnerischer Stellungen zur optimalen Steuerung der Aufklärungsdrohnen. Diese neue Suchstrategie (Abbildung 4, rechts) plant auf dieser Basis einen optimalen Suchpfad. Für überflogene bzw. beobachtete Positionen, an denen kein Ziel entdeckt wurde, wird die Wahrscheinlichkeit reduziert, dass sich das Ziel dort aufhält. Dabei wird auch die Möglichkeit berücksichtigt, dass sich das Ziel an der Position befindet, aber nicht entdeckt wurde. Im Verlauf der Suchmission kristallisieren sich die potenziellen Zielstandorte immer deutlicher heraus. In der Summe ist dieser Ansatz für den Gegner deutlich schwieriger als Suchmission erkennbar, denn das Verhalten der Aufklärungsdrohne erscheint randomisiert. Mit Wild Hornets wurde insbesondere eine kooperative Suchstrategie entwickelt, durch die mehrere Drohnen mit unterschiedlichen Sensoren ihre Anflugpfade so koordinieren, dass ein vorgegebenes Suchgebiet in kürzester Zeit aufgeklärt und eine optimale Sensor-Effektor-Zu- und Einweisung mit minimaler Latenz erreicht werden kann. Abbildung 5 zeigt die resultierenden Angriffstrajektorien, die selbst von einer leistungsfähigen SHORAD kaum abgewehrt werden können

Im Ergebnis liegt dank Wild Hornets inzwischen eine kombinierte Aufklärungs- und Zielbekämpfungstaktik vor, die für den Einsatz von ALE und gemischten Schwärmen in großen Stellungsräumen eingesetzt werden kann. Am 2. Mai 2024 wurden erste Auskoppelungen dieser Taktik beim Innovationstag des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) erfolgreich auf einen echten Drohnenschwarm übertragen (cyber-physische Durchlässigkeit) und in einer Live-Demonstration vorgeführt.

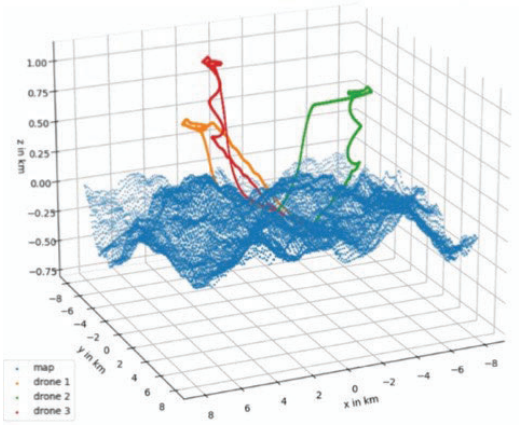

ABBILDUNG 5: SELBSTKOORDINIERENDER SCHWARM MIT AUFKLÄRUNGS- UND ZIELBEKÄMPFUNGSDROHNEN

VI. AUSBLICK

Das hier am spezifischen Anwendungsbeispiel des Einsatzes von ALE in Kombination mit Drehflüglern vorgestellte Defense Metaverse kann zur Unterstützung vielfältiger Aufgabenstellungen der Bundeswehr genutzt werden. Neben der in diesem Aufsatz diskutierten Konzept- und Fähigkeitsentwicklung ist es möglich, das Defense Metaverse für die kontinuierliche Validierung und Verbesserung von Konzepten, Designs und technischer Parameter während der Entwicklung bzw. des Einsatzes neuer Waffensysteme zu nutzen. Parallel zur Entwicklung von GhostPlay und Wild Hornets ist es dem Projektteam auch gelungen, die Darstellung einer leistungsfähigen roten Flugabwehr anhand des beschriebenen Ansatzes in die laufenden Arbeiten für das Future Combat Air System (FCAS) und das Multi Ground Combat System (MGCS) zu integrieren.

Zusätzlich ist in der beantragten Verlängerung von GhostPlay für die Jahre 2025-26, die noch bewilligt werden muss, eine wesentliche konzeptionelle Weiterentwicklung angedacht. In dieser Phase liegt der Schwerpunkt in der Dimension See insbesondere mit dem Ziel

- des Dimensionentransfers der selbsterlernten Taktiken in das Über- und Unterwasserumfeld und der Steigerung der Leistungsfähigkeit dieser Technik für dimensionsübergreifende Operationen (Multi-Domain Operations, MDO);
- die selbsterlernten kooperativen Taktiken zu erweitern (1) von der Steuerung dimensionsspezifischer Schwärme zu dimensionsübergreifenden, sich (vollständig) selbst steuernden Schwarmverbänden sowie (2) zum Schutz vor dimensionsübergreifend agierenden Schwärmen des Gegners (Multi-Domain Counter Swarming).

VII. FAZIT: GREIFBARER FÄHIGKEITSGEWINN FÜR DIE BUNDESWEHR

GhostPlay hat die Entwicklung von KI-Taktiken für rote und blaue Kräfte als souveräne deutsche Fähigkeits-Technologieinnovation etabliert. GhostPlay zeigt, dass KI lernen kann, komplexes taktisches Verhalten in Interaktion mit einem intelligenten Gegner unter Bedingungen (1) eines nur teilweise beobachtbaren Zustandsraums und (2) unvollständiger Information zu erzeugen. Militärische Experten bewerten

diese Taktiken als relevant, realistisch und Erfolg versprechend. Mit dem Einsatz eines KI-gesteuerter Red Teaming u. a. für die Konzept- und Fähigkeitsentwicklung oder der Analyse des taktischen Einsatzwertes geplanter Verteidigungssysteme hat sich GhostPlay eine Alleinstellung erarbeitet, die sich auch in der Überführung der Technologie in laufende Entwicklungsvorhaben der Bundeswehr und dem wachsenden Interesse von Streitkräften der EU-/NATO-Staaten niederschlägt. Aus GhostPlay resultiert – als Ergebnis der Zusammenarbeit mit dem AHEntwg – eine gefechtstaugliche Aufklärungstaktik für ALE. Diese plant ausgehend von Vorwissen einen optimalen Suchpfad, um feindliches Gelände nach möglichen GBAD-Elementen zu untersuchen. Parallel wurde diese Aufklärungstaktik mit einer Zielbekämpfungstaktik erweitert, so dass ein Schwarm aus unterschiedlichen unbemannten Systemen (autonom) gegnerische Ziele erfolgreich aufklären und bekämpfen kann. Erste Auskoppelungen dieser Taktiken wurden am 2. Mai 2024 beim Innovationstag des WIWeB im Fliegerhorst Erding mit UAV erfolgreich live geflogen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken General Klaus Frauenhoff, Oberst Guido Krahl und Oberstleutnant Marcus Preuß für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und die Zustimmung zur Veröffentlichung ausgewählter Projektergebnisse. Diese Forschungsarbeit wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

LITERATUR

[1] Work, R. O.; Brimley, S., *20YY. Preparing for War in the Robotic Age*, Washington, DC, Center for New American Security, 2014.

[2] Hicks, K. „Unpacking the Replicator Initiative“, Arlington, Virginia, 6. September 2023, https://www.defense.gov/News/Speeches/Speech/Article/3517213/deputy-secretary-of-defense-kathleen-hicks-remarks-unpacking-the-replicator-ini/ (Zugriff am 16. April 2024).

[3] Integrierte Sicherheit für Deutschland. *Nationale Sicherheitsstrategie*, Berlin, Bundesregierung, 2023.

[4] Stephenson, N., *Snow Crash*, New York, Bantam Books, 1992.

[5] Garrels, K., Der Digitale Zwilling in Industrie 4.0. Eine Kurz-Einführung zu Merkmalen, Teilmodellen und Verwaltungsschalen, Präsentation, *Plattform Industrie 4.0*, 22. Oktober 2020, https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/presentation_der-digitale-Zwilling.html (Zugriff am 16. April 2024).

[6] Henckel, O., „KI-Gefechtssimulation für die Bundeswehr: GhostPlay“, *Europäische Sicherheit und Technik*, Juli 2023, S. 39-40.

[7] Bassler, Ch; McCarton, M.; Sharp, T.; Chang, J., *Living within one's means: revisiting defense acquisition and affordability A case study of the Army's future vertical lift program*, Washington, DC., CSBA, 2021.

[8] Judson, J., „US Army leaning into launched effects for modernized battlefield“, *Defense News*, 27 März 2024, https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/global-force-symposium/2024/03/26/us-army-leaning-into-launched-effects-for-modernized-battlefield/ (Zugriff am 16. April 2024).

[9] Borchert, H.; Brandlhuber, Ch.; Brandstetter, A.; Schaal, G. S., Free Jazz on the Battlefield. How GhostPlay's AI Approach Enhances Air Defense, Hamburg, *Defense AI Observato*ry, 2022, https://defenseai.eu/daio_study2203 (Zugriff am 16. April 2024).