



Bundesministerium
der Verteidigung

Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2024

Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte

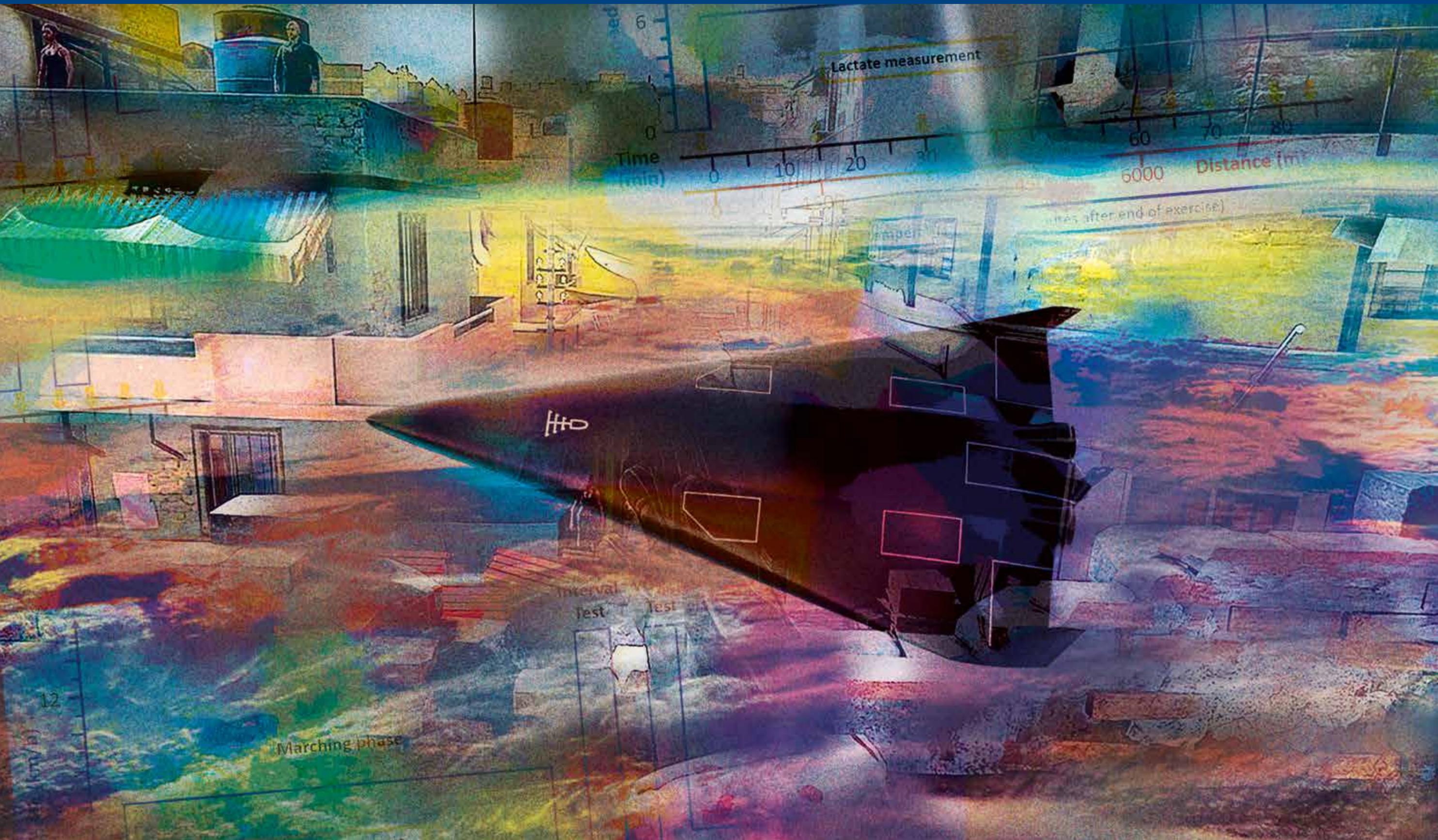


BUNDESWEHR

Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2024

Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte

24



Ministerialdirigent Alexander Schott

Forschungs- und Innovationsdirektor
Bundesministerium der Verteidigung

Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte

Sehr geehrte Forschungsinteressierte!

In seiner Regierungserklärung zur neuen Bundesregierung am 14. Mai 2025 erklärte Bundeskanzler Friedrich Merz: „Dieser Krieg und sein Ausgang entscheiden nicht nur über das Schicksal der Ukraine. Der Ausgang dieses Krieges entscheidet darüber, ob auch künftig Recht und Gesetz gelten in Europa und der Welt oder Tyrannei, militärische Gewalt und das nackte Recht des Stärkeren. In der Ukraine steht deshalb nicht weniger auf dem Spiel als die Friedensordnung unseres gesamten Kontinents.“

Deshalb fordert der Bundeskanzler in seiner Rede: „Wir selbst müssen und wir werden unsere eigene Verteidigungsfähigkeit und unsere Verteidigungsbereitschaft beständig weiter ausbauen. Wir wollen uns verteidigen können, damit wir uns nicht verteidigen müssen. Wir nennen diesen Grundsatz seit Jahrzehnten Abschreckung. Es gibt wenige Lehren aus der jüngeren Geschichte, die sich so passgenau auf die Gegenwart übertragen lassen wie diese, denn diese Lehre ist einfach: Stärke schreckt Aggression ab, Schwäche hingegen lädt zur Aggression ein.“

Mit der Nationalen Sicherheits- und Verteidigungsindustriestrategie (SVI) vom 4. Dezember 2024 nimmt die Bundesregierung die sicherheitspolitischen Herausforderungen unserer Zeit auf und

fordert, den schnellen Entwicklungen durch technologische Führerschaft und rasche Adaptionsfähigkeit zu begegnen, um eine dauerhafte Führungs- und Wirkungsüberlegenheit sowie den Schutz eigener Kräfte zu erreichen.

Grundlage dieser technologischen Führerschaft und Adaptionsfähigkeit ist die wehrwissenschaftliche Forschung mit ihren Forschungsbereichen:

- Wehrtechnische Forschung und Technologie,
- Wehrmedizinische Forschung und Militärpsychologische Forschung,
- Sozialwissenschaftliche Forschung und Militärgeschichtliche Forschung und
- Geowissenschaftliche Forschung.

Der vorliegende Jahresbericht soll Ihnen einen Einblick in diese wehrwissenschaftliche Ressortforschung geben und ein größeres Verständnis für unsere Verteidigungsforschung in der Bundeswehr schaffen.

Gestiegene Bedeutung der Innovation:

Es gilt, bisherige Innovationszyklen zu verkürzen und Forschungsergebnisse und neue Technologien schnell in Innovationen und somit in Fähigkeiten der Bundeswehr zu überführen.

Einen Ausdruck dieser ganzheitlichen Betrachtung von Forschung und Innovation halten Sie bereits



mit diesem Jahresbericht in den Händen. Der Untertitel des Jahresberichtes „Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte“ wurde erstmalig um den Punkt „Innovation“ erweitert und ein entsprechendes Kapitel ergänzt.

Das ist mehr als eine Änderung des Titels. Wir ändern gerade das Vorgehen und das Mindset in der Bundeswehr. Um schnelle Innovationszyklen zu gewährleisten, ist es weiterhin notwendig, die Innovationsaktivitäten des Geschäftsbereiches des Bundesministeriums der Verteidigung stetig zu analysieren und bedarfsabhängig neu zu ordnen. Nachdem eine solche Neuordnung mit der Zusammenführung des Innovationsmanagements und der wehrtechnischen Forschung und Technologie bereits auf Ebene des Bundesministeriums der Verteidigung vollzogen wurde, wird zukünftig eine eigene Dienststelle im Geschäftsbereich als Innovationszentrum der Bundeswehr in Zusammenarbeit mit dem etablierten Digital-labor-Verbund koordinierend in die Bundeswehr wirken und u. a. hochpriorisierte Innovationskampagnen für die Bundeswehr steuern.

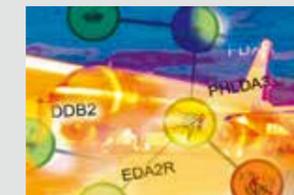
Zivil-militärische Schnittstellen in Forschung und Innovation:

Aus strategischer Sicht und mit Blick auf eine zeitgemäße Gesamtverteidigung ist nicht nur

eine enge Zusammenarbeit innerhalb des Bundesministeriums der Verteidigung und seinem Geschäftsbereich erforderlich, sondern auch mit anderen Ressorts, Bundesländern, Universitäten, zivilen außeruniversitären Forschungseinrichtungen, gewerblicher Wirtschaft und internationalen Einrichtungen. Die schon gelebte zivil-militärische Forschungszusammenarbeit wie bei dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt oder der Fraunhofer-Gesellschaft sowie mit verschiedenen Hochschulen weit über die beiden Bundeswehruniversitäten hinaus kann hier als gutes Vorbild wirken.

Die Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) fordert in ihrem Jahrgutachten 2025 zu „Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands“ angesichts der veränderten Bedrohungslage, die strikte Trennung von militärischer und ziviler Forschung in Deutschland zu überwinden. Dies betrifft insbesondere – aber nicht ausschließlich – Felder wie etwa Drohnen, Quantentechnologien oder Künstliche Intelligenz, die sich weiterhin mit einer enormen Dynamik entwickeln.

Der Wissenschaftsrat führt dazu in seinem Positionspapier von 2025 zur Wissenschaft und Sicherheit in Zeiten weltpolitischer Umbrüche aus: „Mit dem Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine sowie im Zuge des Machtwechsels der USA steht zudem



ein deutlicher Wandel der deutschen strategischen Kultur wie auch der außenpolitischen Kultur an.“ Um diese sicherheitspolitischen Herausforderungen angemessen erfassen sowie den anstehenden strategischen Wandel adäquat vorbereiten und begleiten zu können, sollte sich das wissenschaftliche Feld und das Zusammenspiel von Wissenschaft mit politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Akteuren deutlich weiterentwickeln.“

Errungenschaften und spannende Technologieentwicklungen:

Der Ihnen vorliegende Bericht enthält vielfältige Beiträge aus allen wehrwissenschaftlichen Forschungsbereichen. Es handelt sich hier natürlich nicht um einen vollständigen Überblick zu unserer wehrwissenschaftlichen Forschung und es wurde auch wie in den vergangenen Jahren gewissenhaft abgewogen, welche Themen hier – aus Gründen des Schutzes unserer Errungenschaften – präsentiert werden (können). Nichtsdestotrotz ist es meinem Team hoffentlich wieder gelungen, einen für Sie spannenden und Einblick-schaffenden Bericht zusammenzustellen.

In diesem Jahr möchte ich Ihnen aus der Breite der wehrwissenschaftlichen Forschung insbesondere die Beiträge „Laserwaffensystem MILOS-D: Hochpräzise und kostengünstige Wirkung für landgestützte Kräfte und Spezialkräfte“; „Prakti-

kabilitätstestung der Bakteriophagentherapie am Bundeswehrkrankenhaus Berlin: Das Forschungsprojekt PhagoFlow“ und „Afghanistan, Irak, Mali – aktuelle repräsentative Untersuchung zu Bundeswehrpersonal mit einsatzassoziierten psychischen Störungen“ ans Herz legen. Diese Beiträge zeigen wie nah die wehrwissenschaftliche Forschung am Puls der Zeit ist und sich neue Technologie und Erkenntnisse auf die Fähigkeiten der Bundeswehr auswirken.

Mein persönlicher Dank gilt den Autorinnen und Autoren, die zu diesem Jahresbericht beigetragen haben, und Ihnen, den forschungs- und innovationsinteressierten Leserinnen und Lesern, wünsche ich eine anregende Lektüre.

mit freundlichen Grüßen,

Alexander Schott



Durch Anklicken direkt zum Artikel gelangen

24

Vorwort	05 Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte		
Teil 1	13 Innovationsvorhaben und Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung der Bundeswehr		
	14 Innovationsvorhaben OPEX Marine „Large Unmanned Underwater Vehicle Blue Whale“		
	16 DIANA – eine Innovationsinitiative der NATO zur Förderung von Dual-Use Innovationen		
	18 Enterprise Architekturmanagement der Bundeswehr (EAMBw)		
	20 Mit MITTENS in die multinationale taktische Operationsfähigkeit		
	22 Der Territorial Hub – Optimierung der ressortübergreifenden Führungsfähigkeit der Bundeswehr		
	24 Wargaming – Vorbereitung für das reale Gefechtsfeld (am Beispiel Brigade LITAUEN)		
Teil 2	27 Wehrtechnische Forschung und Technologie		
	28 Hochenergielaser-Forschung – von Komponenten über Systemaspekte bis zur Anwendung		
	30 KI-Verfahren für die Drohnen- und Objekterkennung mit Infrarot- und Videosensorik		
	32 Entwicklung einer ergonomisch gestalteten Standardkonsole für Marineschiffe		
	34 Hybride Intelligenz und Entwicklung einer Workbench zur Untersuchung von Konzepten zur komplementären Integration menschlicher und künstlicher Intelligenz		
	36 Erfolg eines wissenschaftlich fundierten Berechnungsverfahrens für den baulichen Schutz: Rückblick auf 25 Jahre Anwendung des RHT-Betonmodells		
	38 Fähigkeit zur Berechnung von Gefährdungsbereichen und Schädigungszonen durch Trümmerwurf bei Sprengbelastung von Betonstrukturen		
	40 Passivradar mit Satellitenbeleuchtern für verdeckte Überwachung und Aufklärung in maritimen Szenarien		
	42 Breitbandige und robuste Front-End-Module im Ka-Band		
	44 Leistungssteigerung von Rohrwaffensystemen durch simulationsgestützte Schüttdichtenoptimierung		
	46 Kunststoffgebundene Treibladungspulver – aktuelle Trends und Fortschritte		
	48 Vorbereitende Arbeiten zur Zertifizierung neuer Sensoren für die deutsche Beobachtungsplattform A319 Offener Himmel		
	50 Risikoanalyse für den Einsatz von Laserwaffensystemen – numerische und experimentelle Arbeiten des DLR		
	52 Mobiles, flexibles Lager- und Betankungssystem für die reaktionsschnelle Versorgung von Raketenstufen und Nutzlasten mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid		
	54 Konzeptentwicklung für Software Defined Aircraft mit Integrated Serverless Avionics (ISLA): DLR-Ansatz für die nächste Generation von Integrierter Modularer Avionik		
	56 Verbesserung von Systemen zur Mikrowellenfernerkundung mit Quantensensorik		
	58 Synergie bewährter Technologien und zukunftsweisender Konzepte zur fortschrittlichen Weltraumlagebeobachtung		
	60 Reaktive Strukturmaterialien (RSM) – Fortschritte in der Erforschung von Energiefreisetzung und Fragmentierungsverhalten		
	62 Widerstandsfähiges und intelligentes GNSS – ein Praxistest		
	64 Schnellerer Einsatz neuer UAV-UGV Systeme durch Nutzung innovativer Simulationsansätze		
	66 Forschung an einer kompakten Energieversorgung für Pulslasten elektrischer Waffen		
	68 Forschung zu robusten und resilienten leistungselektronischen Systemen für kritische Infrastruktur und den wehrtechnischen Bereich		
	70 Numerische Simulation von Kernwaffenwirkungen für den Nuklearschutz		
	72 Selektive Detektion von chemischen Kampf- und Gefahrstoffen mittels Hochenergie-Ionenmobilitätsspektrometrie		
	74 Wehrtechnisches Innovationspotenzial in der Rettungskette		
	76 Tiefsttemperaturbehandlung für additiv gefertigten Stahl – flexibel und effizient		
	78 Abstandsfähige Kampfmitteldetektion mit UAV-getragener Sensorik		
	80 Fluidische Schubvektorsteuerung: Auslegung, Charakterisierung und Einfluss auf Triebwerk und Mission		
	82 Das Projekt ALFACaD (Automated Low-Flying Aerial Cargo Delivery)		
	84 Flugerprobung eines Aerospike-Raketentriebwerks im Projekt RDRS		
	86 Unterwasser-Glider für den militärischen Einsatz		
	88 Synthetisches Apertur Sonar – mehr als ein besseres Seitensichtsonar		
	90 Target Handoff-System und OSINT-Geolokalisierung		
	92 Laserwaffensystem MILOS-D: Hochpräzise und kostengünstige Wirkung für landgestützte Kräfte und Spezialkräfte		



- Teil 3**
- 95 Wehrmedizinische Forschung und Militärpsychologische Forschung**
- 96** Kultureller Nachweis und molekularepidemiologische Analyse von *Francisella tularensis* aus Zecken
- 98** Neuartige Antidote zur Behandlung von Kampfstoffvergiftungen: Vom virtuellen Strukturvorschlag bis hin zur Testung im Gewebe
- 100** Effizienz im militärischen Marsch: Präventivmedizinische Untersuchungen zur Beanspruchung, Ermüdung und zum Leistungserhalt beim Fußmarsch
- 102** Routine-CT-Diagnostik führt zu strahlenspezifischer Genaktivierung in peripheren Blutzellen
- 104** Simulatorkrankheit – Wie lange beeinflussen Trainingseinheiten im Simulator die Flugeignung und Performance von NH90-Pilotinnen und Piloten?
- 106** Sollten in bestimmten, sehr fordernden Ausbildungen die Soldatinnen und Soldaten als „Military Athletes“ betrachtet werden? Erkenntnisse aus der „Kampfschwimmerstudie“ der Marine
- 108** Praktikabilitätstestung der Bakteriophagentherapie am Bundeswehrkrankenhaus Berlin: Das Forschungsprojekt PhagoFlow
- 110** Beurteilung eines neuen Diagnosesystems zum Nachweis von Malariaparasiten in Vektoren unter einsatzrealen Bedingungen
- 112** Intelligente militärische medizinische Fähigkeiten („iMedCap“ – intelligent medical capabilities) zur Überwachung, medizinischen Versorgung und Evakuierung von ansteckendem, verletztem und kontaminiertem Personal
- 114** Afghanistan, Irak, Mali – aktuelle repräsentative Untersuchung zu Bundeswehrpersonal mit einsatzassoziierten psychischen Störungen
- Teil 4**
- 117 Sozialwissenschaftliche Forschung und Militärgeschichtliche Forschung**
- 118** Hybride Kriegführung – über die Notwendigkeit Krieg „hybrid“ zu denken
- 120** Das Zeitzeugenprojekt des Zentrums für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw)



- Teil 5**
- 123 Geowissenschaftliche Forschung**
- 124** Das Erdsystem- und Seegangmodell zur Verbesserung der Vorhersagequalität
- 126** IT-Service „Wetterinformationen für Kleindrohnen“
- 128** Weiterentwicklungsansätze der Sichtweitemvorhersage für Restlichtverstärkerbrillen
- Teil 6**
- 131 Forschung Cyber/Informationstechnik**
- 132** FIST – Ein Projekt zur Optimierung der Netzwerk-Serviceinfrastruktur und Sicherheit in taktischen Koalitionsnetzen
- 134** Intelligente Emulation von Cyber-Angreifern für Übungszwecke in Cyber-Ranges
- Teil 7**
- 137 Forschung mit Bundeswehrbezug an den Universitäten der Bundeswehr**
- 138** KI-gestützte Anomalieerkennung und Diagnose für komplexe Systeme: Von der Internationalen Raumstation zur militärischen Anwendung
- 140** Close Quarters Battle – Prädiktoren und Trainingseffekte bei unspezialisierten Soldaten und Spezialkräften der Polizei
- 142** Physiologische und psychologische Stressreaktionen bei Soldatinnen und Soldaten in virtuellen Kriegsszenarien
- 144** Resttragfähigkeitsanalyse von Schraubverbindungen nach Druckwellenbelastung zur Sicherheitsbewertung kritischer Infrastrukturen wie Brücken
- 146** Künstliche Intelligenz – Akzeptanz und Nutzung im privaten und beruflichen Umfeld
- Teil 8**
- 149 Anhang**
- 150** Adressen und Kontakte
- 156** Impressum

1

Innovationsvorhaben und Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung der Bundeswehr

Die Bundeswehr steht vor der Herausforderung, sich an veränderte Bedrohungslagen und Rahmenbedingungen anpassen zu müssen. Das Innovationsmanagement (InnoMgmt) sowie die Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung (Meth Zuke&WE) tragen mit ihrem ergebnisoffenen und experimentellen Ansatz in besonderer Form zur Adaptionfähigkeit der Streitkräfte bei. Die für den Bericht ausgewählten Beiträge zeigen die Bandbreite der Anwendbarkeit und einen Mehrwert für das Handlungs- und Leistungsvermögen der Bundeswehr auf.

Durch CD&E-Projekte mit dem Fokus auf das Operationelle Experimentieren werden Wehrtechnik und Verfahren so mit den Nutzenden zusammengebracht, dass sich ein Mehrwert für das militärische Handeln auf dem Gefechtsfeld schneller und konkreter erkennen lässt. Eine agile Vorgehensweise bietet zusätzlich die Möglichkeit, nicht erfolversprechende Ansätze schneller zu erkennen und damit bereits a priori für die Beschaffung zu verwerfen.

Noch konkreter wird es bei Innovationsvorhaben zum Operationellen Experimentieren. In diesem Falle sind die Vorstellungen, wie marktverfügbare Wehrtechnik eingesetzt werden soll, schon sehr weit fortgeschritten. Durch praktische Erprobungen in Übungsszenarien werden Verfahren unter realistischen Einsatzbedingungen evaluiert und der Mehrwert für die Truppe nachgewiesen.

Die CD&E Projekte MITTENS und TerrHub fokussieren auf konkrete Funktionen zur Verarbeitung von Informationen. Die Anforderungen der Bundeswehr sind in diesem Kontext

ausgesprochen vielfältig. Die Bandbreite reicht vom Informationsaustausch im Rahmen von hochagilen Gefechtsszenarien mit hohem Operationstempo bis hin zu verantwortungsbereichsübergreifenden zivil-militärischen Lagebildern im Verständnis einer gesamtstaatlichen Verteidigung.

Im Rahmen eines modellbasierten Ansatzes wird die Analyse- und Steuerungsfähigkeit des Geschäftsbereichs BMVg durch ein umfassendes digitales Modell der Bundeswehr, einer sogenannten „Enterprise Architektur“, unterstützt werden.

Im Rahmen des Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA) der NATO hat Deutschland den Palladion Accelerator an der UniBw M DIANA gegründet. Als Teil des Innovationsökosystems der Bundeswehr trägt der Palladion Accelerator mit seinen Aktivitäten auf den Gebieten Technologietransfer bzw. Technologiereifung und Wissenstransfer dazu bei, dass innovative Lösungen entlang der NATO-Planungsziele schneller in militärische Fähigkeiten eingeführt werden können.

Als sehr wertigen methodischen „Trend“ mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten wird das Wargaming vorgestellt. Die Simulation potenzieller Bedrohungslagen bzw. Szenarien und das Durchspielen und Entwickeln möglicher Lösungen ist weit mehr als nur ein spielerischer Ansatz. Im Kontext der Digitalisierung und im Zusammenhang mit immer komplexeren nationalen und internationalen Strukturen sowie unsicherer Zukünfte bietet diese Methodik eine Vielzahl an Möglichkeiten für die Bundeswehr.



Innovationsvorhaben OPEX Marine „Large Unmanned Underwater Vehicle Blue Whale“

Die Bundeswehr steht vor der Herausforderung, ihre Fähigkeiten kontinuierlich zu erweitern sowie an die sich wandelnden Anforderungen der modernen Kriegsführung und die sich schnell ändernden Bedrohungsszenare anzupassen. Ein neu etabliertes Schlüsselement dieser Bemühungen sind Innovationsvorhaben mit operativen Experimenten (OPEX). 2024 wurde ein erstes Pilotvorhaben erfolgreich durchgeführt.

Unbemannte Systeme sind integraler Bestandteil der strategischen Überlegungen der Streitkräfte der Bundeswehr zur See. Der „Kurs Marine 2035+“ der Deutschen Marine legt besonderes Augenmerk auf die schnelle und effektive Integration von unbemannten Plattformen und die optimale Ergänzung von bemannten Systemen. Unbemannte Systeme versprechen eine gesteigerte Effizienz und Flexibilität, die für die Bewältigung zukünftiger Herausforderungen essentiell sind.

OPEX ermöglichen es der Bundeswehr, unter direkter Einbindung aller wichtigen Stakeholder und unter realen Bedingungen, die technische Zuverlässigkeit bzw. den technischen Reifegrad der erprobten Testmuster zu verifizieren, möglichen militärischen Anpassungsbedarf zu identifizieren sowie Rahmenbedingungen für eine nahtlose Integration und Nutzung u. a. unbemannter Systeme festzustellen. Dies kann einen entscheidenden Beitrag zur Beschleunigung von Beschaffungsvorhaben leisten.

Ziel des Innovationsvorhabens OPEX Marine „Large Unmanned Underwater Vehicle Blue Whale“ (LUUV Blue Whale) war es,



Abb. 1: Das LUUV -Blue Whale- wird für Tests vom Begleitschiff abgefiert



Abb. 2: Ein Bundeswehrschiiff begleitet LUUV „Blue Whale“ vor Eckernförde

einen Technologieträger im Bereich des Unterwasser-Seekrieges und die mit diesem verbundenen Verfahren unter realistischen Einsatzbedingungen zu evaluieren. Den Schwerpunkt bildeten die Fähigkeiten zur weiträumigen Unterwasser-Ortung sowie zur verdeckten Überwasser-Aufklärung – beides bislang Aufgaben bemannter Uboote.

In einem ganzheitlichen Ansatz wurde das Innovationsvorhaben unter Leitung des Marinekommandos (MarKdo) mit aktiver Begleitung u. a. des Planungsamtes der Bundeswehr (PlgABw), des Bundesamtes für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw), der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) sowie des Center of Excellence for Operations in Confined and Shallow Waters der NATO (COE CSW) durchgeführt.

Hauptbestandteil war die zweiwöchige Testung des LUUV Typvertreter „Blue Whale“ in See in Kooperation mit der Industrie. „Blue Whale“ ist ein ca. 11 Meter langes und 5,5 Tonnen schweres unbemanntes Unterwasserfahrzeug mit hohem technologischem Reifegrad. Sensorik für Über- und Unterwasseraufklärung sowie Kommunikationstechnologie sind in „Blue Whale“ integriert. Ein detaillierter Abschlussbericht der Kampagne wird gegenwärtig erstellt.

Es ist bereits jetzt abzusehen, dass Innovationsvorhaben auf Grundlage eines operativen Experiments einen Mehrwert für die Streitkräfte bieten und auch zukünftig einen wichtigen Stellenwert in der Bundeswehr haben werden. Die Gründung des Forschungs- und Innovationshubs auf Ebene BMVg, mit der dadurch verbundenen Zusammenlegung der Aufgaben-

bereiche Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung der Bundeswehr, Forschung und Technologie (F&T) und Innovationsmanagement des Geschäftsbereiches BMVg, wird Innovationsvorhaben wie z. B. OPEX-Kampagnen einen weiteren Aufwind geben. An einer Verstetigung und Folgeprojekten wird bereits aktiv gearbeitet.



Abb. 3: LUUV „Blue Whale“ während eines Tests



Abb. 4: LUUV Blue Whale auf dem Begleitschiff

OTL Christian Köferstein
 Bundesministerium der Verteidigung
 Abteilung Planung
 Berlin

RDir'in Dr. Elisabeth Erley
 Bundesministerium der Verteidigung
 Abteilung Planung
 Bonn

BMVgPlgFIHABII@BMVg.Bund.de

BMVgPlgFIHABII@BMVg.Bund.de

DIANA – eine Innovationsinitiative der NATO zur Förderung von Dual-Use Innovationen

Als Reaktion auf die zunehmende Bedeutung von ziviler Innovationskraft für die Entwicklung militärischer Fähigkeiten wurde der Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA) ins Leben gerufen. DIANA unterstützt dabei nicht nur die internationale Zusammenarbeit, sondern fördert gezielt Startups und beschleunigt die Entwicklung von disruptiven Dual-Use Technologien.

Mit Einrichtung der NATO-Agentur DIANA (Abb. 1) wurde ein bündnisweites Innovationsnetzwerk etabliert, um die Innovations- und Technologieführerschaft der NATO im Bereich der Emerging and Disruptive Technologies (EDT) zu erhalten und weiter auszubauen. Mit DIANA wird vor allem die zivil-militärische Zusammenarbeit gestärkt. Der Fokus von DIANA liegt auf der Förderung von Startups im Bereich der Dual-Use Technologien, die den technologischen Fortschritt der NATO Mitgliedstaaten sichern und die NATO auf künftige Herausforderungen vorbereiten.

DIANA arbeitet derzeit mit einem einzigartigen Netzwerk, bestehend aus mehr als 20 sogenannten Acceleratoren (Beschleunigerstandorten) (Abb. 2) und mehr als 180 assoziierten Testzentren aus der gesamten NATO. Die geförderten Startups erhalten hierdurch Zugang zu erstklassigen Einrichtungen innerhalb des Bündnisses. Der deutsche Anteil am Innovationsökosystem DIANA besteht aus dem Palladion Defence Accelerator der Universität der Bundeswehr München und weiteren, aktuell 14 Testzentren.



Abb. 1: Das Logo der NATO Agentur Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic



Abb. 2: Übersicht der Accelerator-Standorte der NATO Agentur Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic

Durch DIANA können Startups gefördert werden, die EDT-basierte Lösungen für Dual-Use Herausforderungen in einem Technical Readiness Level (TRL) von mindestens vier bis sieben anbieten können.

Im Rahmen des Accelerator-Programms ermöglicht DIANA den Austausch mit Mentoren aus dem Bereich Sicherheit und Verteidigung sowie militärischen Nutzern, koordiniert den Zugang zu vertrauenswürdigen Investoren und stellt eigene Finanzmittel zur Verfügung (Abb. 3). DIANA trägt damit dazu bei, die Verteidigungsbedarfe der Bündnispartner zum Treiber technologischer Entwicklungen, insbesondere durch Startups, zu machen.

Das Accelerator-Programm erfolgt als Wettbewerb in Form von jährlichen Challenges und besteht aus zwei Phasen. Die Challenges fokussieren auf militärische Herausforderungen z. B. der sicheren Nutzung von Informationen, Logistik und Lieferketten, der menschlichen Gesundheit sowie im Bereich der Resilienz und der kritischen Infrastruktur oder dem Welt-raum. Die eingereichten Lösungsvorschläge werden in einem Auswahlverfahren technisch, militärisch und wirtschaftlich erstbewertet. Die Auswahlsieger absolvieren dann das sogenannte Bootcamp, eine initiale Phase von sechs Monaten. In dieser Phase erhalten die Startups an einem zugewiesenen Accelerator ein Mentoring und Coaching, entwickeln den Business Case weiter und werden mit dem Verteidigungsbereich und dessen Besonderheiten bekannt gemacht. Ferner erhalten sie Zugang zu dem weltweiten Testzentren-Netzwerk und können ihren Lösungsansatz technologisch weiterentwickeln. Jedes Startup erhält zudem einen frei verwendbaren Zuschuss von 100 T €. Am Ende des Bootcamps können sich die Startups für eine weiterführende Förderung in der sogenannten Grow Phase bewerben. Neben weiteren Finanzmitteln in Höhe von 300 T € liegen die Schwerpunkte in dieser Phase auf der vertiefenden Technologiema-turierung, dem Netzwerkaufbau mit Fähigkeits-entwicklern/Beschaffern sowie dem Kontakt zur wehrtech-nischen Industrie und auch Wagniskapitalgebern.

DIANA erreichte im Jahr 2023 die initiale Betriebsfähigkeit (IOC) und startete im Juni 2023 die ersten drei Challenges. Auf diese haben sich insgesamt 1300 Startups beworben. Davon wurden 44 für das Bootcamp und insgesamt 10 Startups für die Grow Phase ausgewählt. Mit mehr als 2600 Bewerbungen für die fünf DIANA Challenges 2024 hat sich die Zahl im Folgejahr bereits verdoppelt. Für das Bootcamp wurden hiervon insgesamt 74, darunter vier deutsche Startups, ausgewählt.

Ab 2025 und voller Betriebsfähigkeit (FOC) sollen jedes Jahr bis zu 10 Challenges durchgeführt werden.

Mit DIANA setzt die NATO ein klares Zeichen für Dual-Use Innovationen als wichtigen Bestandteil der Sicherheitspolitik des 21. Jahrhunderts.



Abb. 3: Überblick über die Unterstützungsleistungen des DIANA Accelerator-Programms

Enterprise Architekturmanagement der Bundeswehr (EAMBw)

Das Zielbild Architektur für den Geschäftsbereich BMVg beschreibt die Vision, die Bundeswehr in all' ihren Abhängigkeiten und Wechselwirkungen mit durchgängigen und kompatiblen Datenmodellen zu erfassen und zu verstehen, um u. a. die Steuerungsfähigkeit zu verbessern. Das Enterprise Architekturmanagement (EAM) erstellt eine Enterprise Architektur (EA), um das Zielbild zu erreichen.

Das EAM verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, welcher internationale zivile Standards und Vorgaben der NATO berücksichtigt. Es zielt auf strategische Planung, Beschaffung und Nutzung unter Berücksichtigung der Felder „People, Process and Technology“, welche auch die digitale Transformation der NATO kennzeichnen. Das primäre Ziel des EAM ist das Erreichen des ministeriell gebilligten Zielbildes Architektur mit der Fähigkeit modellbasierter Analyse- und Entscheidungsfähigkeit auf strategischer Ebene. Dieses Ziel geht weit über die bisherigen Ambitionen der Anwendung der Methode Architektur in der Bundeswehr hinaus.

Das EAM wird federführend durch das Team Enterprise Architekturmanagement der Bundeswehr (EAMBw) im Planungsamt der Bundeswehr und zusätzlich durch aufbau- und ablauforganisatorische Elemente in den Organisationsbereichen föderal umgesetzt. Im Jahr 2024 wurden im Rahmen des EAM u. a. die Allgemeine Regelung „Enterprise Architekturmanagement“ veröffentlicht, tagten bundeswehübergreifende Arbeitsgruppen, wurden die Architekturbedarfe der Organisationsbereiche als eine Grundlage für die zukünftige Enterprise Architektur (EA)



Abb. 1: Logo des Projekts EAMBw

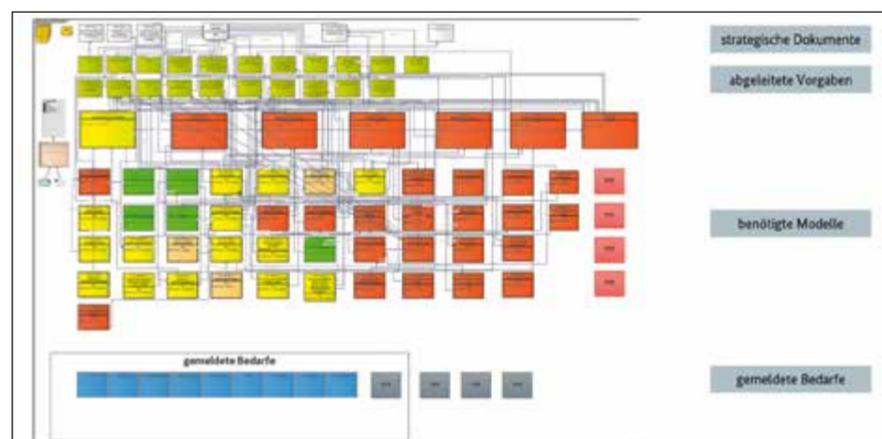


Abb. 2: EA Bebauungsplan

zusammengetragen und ein ganzheitlicher EA-Bebauungsplan für die weitere strategische Ausrichtung entwickelt und ministeriell gebilligt.

In multinationalen Gremien abgestimmte Vorgaben, wie das NATO Architecture Framework (NAF) und die EA-Policy, bilden für das EAM die Grundlage für Interoperabilität und Ausrichtung auf Ziele des Bündnisses. Das NATO Architecture Capability Team (ACaT) konzentrierte sich 2024 auf Schwerpunktthemen wie Multi-Domain Operations (MDO), Federated Mission Networking (FMN) und Referenzarchitekturen für die digitale Transformation. Ebenfalls 2024 hat die NATO damit begonnen, die Organisationsstrukturen durch die Einführung zentraler „Architecture Authorities“ zu etablieren. Das ACaT soll diese Funktionen administrieren.

Auf nationaler Ebene ist die Modellierung der Operationellen Architektur Führungsfähigkeit der Bundeswehr (OpArch FüFä Bw) angewiesen, um Referenzen für Projektarchitekturen zu liefern, systemische Analysen zu ermöglichen und die Ansteuerung des Portfoliomanagements zu ermöglichen. Mit der Erarbeitung des Funkkonzeptes „Brigade Litauen“ konnte 2024 erstmals eine sogenannte Toolchain realisiert werden. Dabei wurden die in der Architektur hinterlegten Daten automatisiert in ein Führungsinformationssystem (Sitaware) exportiert, dargestellt und anschließend georeferenziert mit einem Funkanalysetool (Comrod) ausgewertet. Dies zeigt das Potential der OpArch FüFä Bw als „Actionable Architecture“.

Ein weiteres nationales Schlüsselprojekt ist die in 2024 begonnene Erstellung der „Referenzarchitektur Luftwaffe“ (RefArch Lw), welche nach Finalisierung als Architekturmodell einen Beitrag

zur strategischen Analyse bieten soll. Hierzu wurden insbesondere zur methodischen Begleitung mehrere Workshops in 2024 durchgeführt. Ein Modell soll noch 2025 erstellt werden.

Zur Unterstützung der weitergehenden Entwicklungsarbeiten wurde die Architekturmanagementplattform (AMP) als zentrales Repository für Bundeswehr-Architekturprodukte etabliert. Die Plattform ermöglicht architekturübergreifende Analysen und eine automatisierte Qualitätssicherung. Des Weiteren hält die AMP zudem regelmäßig durchzuführende Versionskontrollen im Blick. Im Jahr 2025 wird die Entwicklung weiterverfolgt, um eine verbesserte Entscheidungsunterstützung für die Bundeswehführung zu ermöglichen.

Als Anwendungsbereich gehört das Prozessmanagement untrennbar zum EAM. Im Zuge der Neuausrichtung innerhalb des Prozessmanagements bietet sich nun die Möglichkeit, beide Seiten näher zusammenzubringen. Dies wird künftig Chancen zu einem einheitlichen Vorgehen u.a. auf dem Handlungsfeld NATO C3 Taxonomie, bei der Ausgestaltung von Konventionen oder der Implementierung des Prozessregisters als Modell bieten.



Abb. 3: Die Fachgruppe EAM in der Projektarbeit

Mit MITTENS in die multinationale taktische Operationsfähigkeit

Mit dem agil angelegten CD&E-Projekt MITTENS wurde rasch eine zielgerichtete Lösung zur Sicherstellung der taktischen Operationsfähigkeit im multinationalen Umfeld entwickelt. Dabei kam es besonders darauf an, den Fähigkeitszuwachs in einem pragmatischen Verfahren möglichst schnell für die Truppe verfügbar zu machen, um den deutschen Kräftebeitrag gem. NATO Force Model nachweisbar erfüllen zu können.

MITTENS steht für „Multinationales, interoperables, taktisches Tablet für den Einsatz bis NATO SECRET“. Ziel des Projekts war eine schnell erreichbare Mindest-Führungsfähigkeit einschließlich des Geheimhaltungsgrades NATO SECRET mit mobilen Endgeräten unterschiedlicher Hersteller in Kombination mit dem HF Datenfunkgerät AN/PRC-160(V) der Firma HARRIS und der Software SitaWare® der Firma Systematic sicherzustellen. Im iterativen Ansatz wurde anhand folgender Leitfragen untersucht, wie eine truppentaugliche Lösung aussehen könnte:

1. Kann der Mitigationlösung MITTENS Kriegstauglichkeit attestiert werden?
2. Bietet MITTENS einen operationellen Mehrwert insbesondere durch die Bereitstellung eines Lagebildes NATO SECRET in den taktischen Führungseinrichtungen?
3. Inwieweit kann die im Rahmen des CD&E Projektes verwendete Mitigationlösung im multinationalen Kontext reibungsarm zu Interoperabilität befähigen und inwieweit ist die Lösung FMN (Federated Mission Networking) konform?



Abb. 1: Untersuchung ET80/85 mit Kräften ObjSchRgt Lw in SCHORTENS

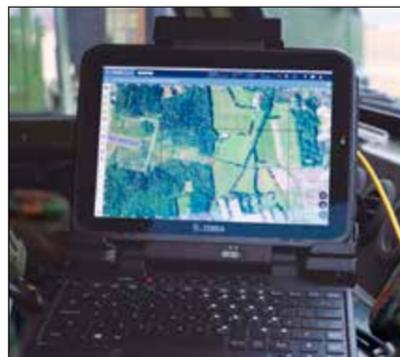


Abb. 2: Lagedarstellung SitaWare Frontline mit ET 80/85 auf Plattform Eagle IV

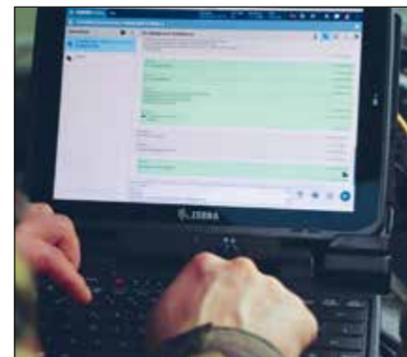


Abb. 3: 9-Line MEDEVAC REQUEST via SitaWare Chat mit ET80/85

Experimente mit der Truppe haben bestätigt, dass durch die Verwendung von MITTENS eine deutliche Verbesserung der Qualität des Lagebilds auf allen betrachteten taktischen Ebenen sowie eine Steigerung des Operationstempos erreicht wird. Die eingesetzten Produkt-Prototypen der mobilen Endgeräte wurden einer technischen Prüfung durch die WTD 81 unterzogen. Diese und auch alle weiteren, die Produkteigenschaften und -Performance betreffenden Experimentergebnisse wurden unmittelbar rückgekoppelt, so dass eine iterative Weiterentwicklung der Prototypen durch die Hersteller bereits während der Projektlaufzeit möglich war.

Mit einer eigens angemeldeten Testumgebung („Capability“) war MITTENS Teilnehmer an der NATO-Interoperabilitätsübung CWIX 2024. Hier wurden die Leistungsfähigkeit von MITTENS, mit besonderem Fokus auf Interoperabilität auch unter Verwendung alternativer Funksysteme und Übertragungsmittel, ebenso wie die Lagedarstellung XY erfolgreich experimentell nachgewiesen.

Die mobilen Endgeräte werden stets ausschließlich als Eingabe- bzw. Visualisierungsgeräte genutzt, auf denen selbst keinerlei Informationen gespeichert werden. Sicherheitskritische Informationen sind zusammen mit den individuellen Zugriffsberechtigungen des jeweiligen Nutzenden auf einem externen Medium gespeichert. Auch auf unterschiedlichen Plattformen konnte MITTENS überzeugen. Während des Zertifizierungsdurchgangs 19/24 des AufklBtl 8 unter Leitung des Kdr PzBrig 12 am Gefechtsübungszentrum des Heeres wurde MITTENS – ohne in das operative Drehbuch des Zertifizierungsdurchgangs einzuwirken – den Akteuren beigelegt. So konnte zugleich ein Lasttest unter Einsatzbedingungen über einen längeren Zeit-

raum hinweg durchgeführt und der operative Mehrwert einem breiten Publikum aus hochrangigen Besuchern unmittelbar anhand von Realdaten präsentiert werden. Hierbei wurde zudem das elektromagnetische Spektrum durch Kräfte EloKa überwacht. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Anwendung von MITTENS durch Reduzierung des digitalen Fußabdrucks zu einer verminderten Aufklärbarkeit führt.

MITTENS ist nicht als Ersatz für bestehende Übertragungswege vorgesehen. Vielmehr ist es ein Add-on, das seine Funktionsfähigkeit selbst für die Notfallkommunikation (HF-Funk) gemäß der NATO-Forderungen (PACE) unter Beweis gestellt hat. Durch MITTENS werden Informationen von Sensoren und Effektoren gleichermaßen gebündelt und den Führungsebenen auch über große Entfernungen hinweg bereitgestellt. MITTENS bietet für die taktische Ebene die derzeit einzige, kurzfristig verfügbare Möglichkeit der multinationalen Interoperabilität bei gleichzeitigem Beitrag zu einem COP im Sinne eines modernen Battlespace-Managements. Durch Schaffen von Informationsüberlegenheit leistet MITTENS somit einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der Anforderungen an die hochagile Gefechtsführung.



Abb. 4: Model BACKBONE® der Firma MUSE, Wechsel Sicherheitsdomäne mittels Austausch Dongel



Abb. 5: GefübZ Heeres Leistungsschau MITTENS, Model BACKBONE® der Firma MUSE



Abb. 6: AN/PRC 160 ManPack; Übertragungsmedium im Rahmen des CD&E Projektes



Abb. 7: Model BACKBONE® MUSE, auf Plattform BV206S Fü

OTL i.G. Oliver Gerhardt
Planungsamt der Bundeswehr
Taufkirchen

Hptm Max Feltl
Planungsamt der Bundeswehr
Taufkirchen

PlgABwTerrHub@bundeswehr.org

PlgABwTerrHub@bundeswehr.org

Der Territorial Hub – Optimierung der ressortübergreifenden Führungsfähigkeit der Bundeswehr

Das Projekt TerrHub hat nachgewiesen, dass unter der Prämisse „Cyber-Security First“ die Bereitstellung eines zivil-militärischen Lagebilds für die Gesamtverteidigung Deutschlands (DEU) umsetzbar ist. Mit der Akkreditierung (VS-Nur für den Dienstgebrauch) des IT-Systems und der experimentellen Überprüfung (Proof of Concept) wurden 2024 wichtige Meilensteine erreicht. 2025 werden die Maßnahmen für die Akkreditierung „Geheim“ umgesetzt.

Das Concept Development and Experimentation (CD&E) Projekt Territorial Hub (TerrHub) umfasst verschiedene Teilprojekte, die das Ziel verfolgen, die Führungsfähigkeit zu verbessern und die Anbindung weiterer Organe der Inneren Sicherheit, wie Polizei, BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe), THW sowie Feuerwehr und Rettungsdienste zu ermöglichen. Eine Herausforderung ist dabei die prozessuale Verarbeitung und das Teilen von Informationen mit unterschiedlichen Geheimhaltungsgraden. TerrHub verbindet dafür digitale Welten durch neue und sichere Technologien.

Im Jahr 2024 stand die Verbesserung der Führungsfähigkeit des Territorialen Führungskommandos im Fokus des Projekts, indem u. a. partielle Einsatz-Lagebilder der Äußeren Sicherheit zu einem gemeinsamen Lagebild verbunden wurden. Weiterhin wurde der Austausch von Informationen mit Behörden der Inneren Sicherheit experimentell untersucht. Für die experimentelle Überprüfung wurde mit einem Firmenkonsortium innerhalb von sechs Monaten der Demonstrator TerrHub neu entwickelt. Dieses IT-System stellt verschiedene Informations-

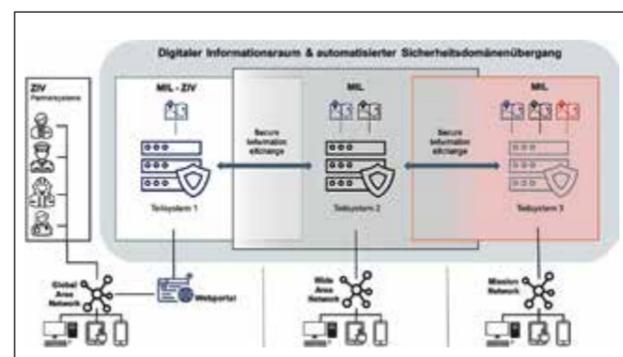


Abb. 1: TerrHub – Funktionsskizze



Abb. 2: vernetzt und integriert (Quelle: iStock – Quardia)

räume bereit und verwaltet den sicheren Rechtezugriff auf die Lageinformationen.

In Experimenten konnte validiert werden, dass das Teilen von Lageinformationen zwischen Behörden und Organisationen der Inneren und Äußeren Sicherheit technisch möglich und organisatorisch sicher umsetzbar ist. Der sicherheitsdomänenübergreifende Informationsaustausch macht ein gemeinsames zivil-militärisches operatives Lagebild (civ-mil COP) in nahezu Echtzeit möglich. Das „neue“ erweiterte Lagebewusstsein schafft die Basis für den bekannten Dreiklang von Informations-, Entscheidungs- und Wirkungsüberlegenheit für die Gesamtverteidigung DEU.

Der Fokus des CD&E-Projekts lag bewusst auf dem wichtigen Service „Territorial Command & Control System“. Zukünftige Werkzeuge für das Informationsmanagement, eine effizientere digitale Zusammenarbeit sowie Vorhersage-, Simulations- und Auswertefunktionen sind bereits konzeptionell beschrieben. Nach aktuellen wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen werden die Schutzziele Vertraulichkeit, Verfügbarkeit und Integrität vollumfänglich erreicht. Dies wird nicht zuletzt durch die Akkreditierungsbescheinigung der DEUmilSAA (Deutsche militärische Security Accreditation Authority) bestätigt.

Die richtigen Informationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen, ist die Grundlage für ein höheres Operationstempo und eine verbesserte Entscheidungsfindung. Zugleich erfordert das Future Operating Environment zunehmend die Beachtung der Cybersicherheit. Die Erkenntnisse von TerrHub werden im CD&E-Projekt Multi-Domain Operations



Abb. 3: sicher und widerstandsfähig (Quelle: iStock – Just_super)

direkt verwendet und in weitere Rüstungsprojekte eingebracht. Die entwickelte Lösung „Secure Information eXchange“ (SecInfoX) als designiertes MESBw-Plugin bietet einen Sicherheitsdomänenübergang „as-a-service“ für den automatisierten Austausch von Lageinformationen.

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich Empfehlungen für die Führungsfähigkeit von Streitkräften in einem Future Operating Environment ableiten. Als wichtigste Attribute einer zukünftigen Führungsfähigkeit müssen gelten:

1. Vernetzung und Integrationstiefe,
2. Sicherheit und Widerstandsfähigkeit,
3. Interoperabilität und performante Skalierbarkeit.

Auf Basis der wegweisenden Ergebnisse werden die Arbeiten am TerrHub mit dem F&T-Vorhaben Ressortübergreifendes Lagebild (RessüLa) fortgesetzt. BAAINBw und PlgABw arbeiten gemeinsam an der Verstetigung und Weiterentwicklung des IT-Systems TerrHub für die zukünftigen Bedarfsträger. TerrHub und RessüLa zeigen damit beispielhaft, wie Planung, Zukunftsentwicklung, Rüstung und Beschaffung für eine schnelle Fähigkeitsentwicklung im Zuge der Gesamtverteidigung DEU harmonisieren können. Die Einbindung von TerrHub in Übungen könnte bereits im Jahr 2025 Realität werden.



Abb. 4: interoperabel und performant skalierbar (Quelle: iStock – putilich)

Wargaming – Vorbereitung für das reale Gefechtsfeld (am Beispiel Brigade LITAUEN)

Würfel fallen, Figuren bewegen sich, der nächste Spielzug auf dem Spielbrett wird energisch diskutiert. Es ist jedoch kein Spieleabend unter Freunden, sondern eine ernste Veranstaltung der Bundeswehr: Wargaming. Spielelemente, wie sie in kommerziellen Brettspielen vorkommen, werden in einem neuen Kontext eingesetzt, um potenzielle Bedrohungslagen zu simulieren und Lösungen für diese zu entwickeln.

In der Bundeswehr hat Wargaming seit Beginn des Ukraine-Kriegs stetig an Bedeutung gewonnen, sodass zu Beginn des Jahres 2023 erstmals eine bundeswehrgemeinsame Arbeitsgruppe unter der Leitung des Planungsamtes der Bundeswehr die Thematik einheitlich betrachtete. Innerhalb kürzester Zeit wurden eine abgestimmte Definition sowie Anwendungsgebiete erarbeitet. Diese wurden anschließend im bereits im Mai 2024 veröffentlichtem „Wargaming Handbuch der Bundeswehr“ festgehalten. Darin wird Wargaming als Methode definiert, die „szenaribasierte Modelle in einer konfliktdarstellenden safe-to-fail Umgebung nutzt, in der sich Ereignisse, menschliche Entscheidungen und resultierende Ergebnisse wechselseitig beeinflussen“.

Man unterscheidet dabei zwischen zwei allgemeinen Anwendungszwecken: educational und analytical Wargaming. Während der Fokus bei educational Wargaming („lehrreich“) auf der Wissensvermittlung und Erfahrungsgewinnung liegt, werden bei analytical Wargaming („analytisch“) die Auswirkungen und Konsequenzen von Entscheidungen untersucht.



Abb. 1: Wargaming in der Erprobung
(rechts: Projektleiter OTL KUHN)



Abb. 2: Das Wargame HyDRA auf der Wargaming Initiative for NATO 2024

Ein analytisches Wargaming-Projekt, welches derzeit vom Bundesministerium der Verteidigung, bwConsulting und dem Planungsamt der Bundeswehr bearbeitet wird, soll die in Litauen eingesetzte deutsche Brigade so praxisnah wie möglich auf den Ernstfall vorbereiten. Dabei wird die Frage gestellt, welche Entscheidungen müssen getroffen werden müssen, um die Führungsfähigkeit des Informations- und Kommunikationsverbunds auch im Bündnisverteidigungsfall aufrechtzuerhalten. Dabei gilt es, nicht nur die nationale, sondern auch die multinationale Interoperabilität durchweg sicher zu stellen.

Zu Beginn des Projekts wurde hierfür in einem Data Collection and Analysis Plan (DCAP) genau festgelegt, welche Fragen im Detail beantwortet werden sollen. Der DCAP ist somit die Grundlage für alle weiteren Schritte. Er wird bei der Erstellung des Wargames immer wieder herangezogen, um zu überprüfen, ob neue Spielmechaniken oder Szenarioanpassungen zur besseren Beantwortung der zu Beginn gestellten Fragen führen.

Im nächsten Schritt wurde in enger Abstimmung mit Expertinnen und Experten der Bundeswehr das Szenario und ein Prototyp des Spiels, des Wargames, erstellt. So wurde sichergestellt, dass die Realität des Gefechtsfeldes so präzise wie möglich abgebildet wird.

Der Prototyp umfasst an dieser Stelle bereits eine große Lagekarte, die auf mehreren zusammengestellten Tischen ausgebreitet ist. Darauf befinden sich verschiedene Spielfiguren. Diese stellen vorher definierte Einheiten und Gefechtsstände dar. Dazwischen sind verschiedenfarbige Schnüre gespannt, um unterschiedlichste Funkverbindungen zu visualisieren. Plötzlich durchschneidet die Spielleitung eine dieser Verbin-

dungen. Der Feind hat offensichtlich eine Verbindung gestört – die Lage, das Spiel beginnt. Sofort diskutieren die Spieler am Tisch, wie die begrenzten Ressourcen eingesetzt werden können, um die Verbindung wiederherzustellen. Der Ausgang, die Lösung des Spiels ist in diesem Moment offen und das Ziel der analytischen Herangehensweise.

Prototyp und Szenario werden in den folgenden Monaten immer wieder getestet, mit dem DCAP verglichen und iterativ angepasst. Am Ende dieses Prozesses entsteht ein Wargame, dass die Brigade LITAUEN für den Bündnisverteidigungsfall in den Kernkompetenzen wie beispielsweise der interoperablen Führungsfähigkeit auf einem multidimensionalen Gefechtsfeld mit multinationaler Kooperation vorbereitet, um so bereits handlungsfähig zu sein, bevor die Lage real wird.



Abb. 3: Das Preußische Kriegsspiel von 1824 auf einer Weiterbildung



Abb. 4: Wargaming Handbuch der Bundeswehr

2

Wehrtechnische Forschung und Technologie

Dieses Kapitel illustriert eindrucksvoll die Vielfalt der wehrtechnischen Forschung, die Impulsgeber und Teil des aufzubauenden Innovationssystems der Bundeswehr ist. Hier bringen Forschungsinstitute, Wehrwissenschaftliche und Wehrtechnische Dienststellen sowie Industrieunternehmen ihre herausragenden Fachkompetenzen ein.

Wesentliche Träger der Aktivitäten im Forschungsbereich „Wehrtechnische Forschung und Technologie“ sind neben bundeswehreigenen Wehrwissenschaftlichen und Wehrtechnischen Dienststellen, welche maßgeblich die Gewinnung von Fachkenntnissen zur militärischen Anwendung betreiben, auch die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG) und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) mit ihren Instituten sowie das Deutsch-Französische Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL). Ihr fachliches Spektrum der Kompetenzträger ist außerordentlich breit über die verschiedenen wehrtechnischen Technologiefelder verteilt, was in den nachfolgenden Einzelberichten eindrucksvoll illustriert wird.

Mit einer großen Anzahl von Unternehmen ist die deutsche Sicherheits- und Verteidigungsindustrie gleichermaßen in der wehrtechnischen Forschung vertreten. Sie wird in der Regel projektbezogen an bestimmten Technologien sowie mit Anteilen der Systemintegration beauftragt, wenn eine Perspektive der militärischen Nutzung in den Streitkräften erkennbar ist.

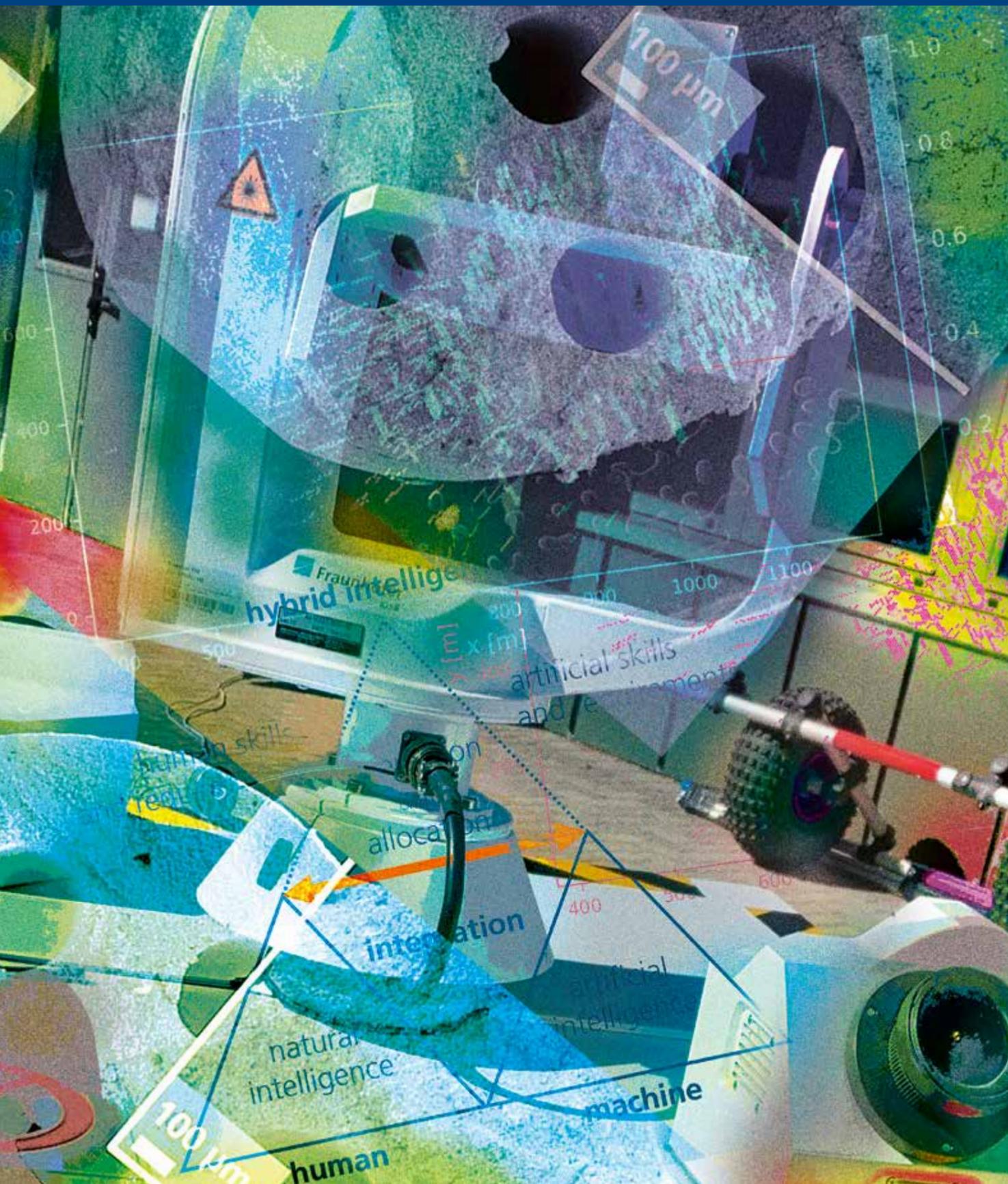
Die hier dargestellten Akteure der wehrtechnischen Forschung decken den gesamten Bereich Technologiereifmachung ab: Von der themenspezifischen Grundlagenforschung über die angewandte Forschung bis zum Nachweis der Anwendungs-

reife. Dabei kommen disruptive Technologien und Werkzeuge wie Künstliche Intelligenz und Quantentechnologien auf vielfältige Weise zum Einsatz. Schritt für Schritt erhöhen die erarbeiteten Erkenntnisse die individuellen Technologiereifegrade mit Blick auf zukünftige Produkte. In der Regel ist hier bei allen Beteiligten ein langer Atem erforderlich.

Das BAAINBw und das BMVg stellen mit der Koordination der verschiedenen Forschungsprogramme sicher, dass wehrtechnische Kompetenzen in allen relevanten Technologiebereichen verfügbar sind. Damit ist eine grundlegende Analyse- und Bewertungsfähigkeit der Bundeswehr in diesen Bereichen gegeben. Nur so kann sie aktuelle Entwicklungen, Erkenntnisse und nicht zuletzt neue Bedrohungen schnell erkennen und angemessen darauf reagieren.

Mit internationaler Arbeitsteilung können Synergien erschlossen und Ressourcen eingespart werden. Dazu werden Kooperationen auf den Ebenen EU und NATO, aber auch in bestimmten Forschungsfeldern bilateral mit einzelnen Partnerstaaten vorgenommen. Ergänzend dazu wächst in diesen Jahren die Beteiligung Deutschlands an den von der Europäischen Kommission finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojekten des Europäischen Verteidigungsfonds stetig.

Die aktuellen weltpolitischen Herausforderungen und die daraus resultierenden Entscheidungen und Planungen der neuen Bundesregierung werden auch im Bereich der wehrtechnischen Forschung neue Impulse und neue Maßstäbe setzen. Darauf bereitet sich der FIH bereits seit Monaten proaktiv vor, wie im Vorwort des Forschungs- und Innovationsdirektors aufgezeigt wird.



Hochenergielaser-Forschung – von Komponenten über Systemaspekte bis zur Anwendung

Hochenergielaser (HEL) sind moderne Waffensysteme, deren Potential detailliert erforscht und bewertet werden muss. Am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) werden dazu alle Aspekte der Lasertechnologie wie Strahlausbreitung, Zielverfolgung, Optronik und Systemtechnik, Wirkung und Lasersicherheit sowie deren wechselseitige Abhängigkeiten in Experiment und Simulation untersucht und unter realen Bedingungen bewertet.

Um die Fähigkeiten von militärischen Hochenergielasern detailliert bewerten zu können und neue Technologien der Truppe verfügbar zu machen, ist es erforderlich, die komplexen Zusammenhänge der relevanten Themenfelder übergreifend zu behandeln, realistisch zu simulieren und auch experimentell realitätsnah zu demonstrieren und zu verifizieren. Die Wechselwirkungen des Laserstrahls mit der Atmosphäre können die Intensität, den Fokus und damit die Wirkung des Strahls über große Entfernungen erheblich verändern – ein entscheidender Aspekt um den Einsatz und die Leistungsfähigkeit eines Laserwaffensystems (LWS) zu verstehen und zu optimieren. Dazu arbeitet das Fraunhofer IOSB an einer numerischen Simulation der HEL-Strahlausbreitung, die alle relevanten atmosphärischen Effekte wie Beugung, turbulente oder thermische Strahlaufweitung (Abb. 1) und andere nichtlineare optische Effekte im Fall von Ultrakurzpulslasern berücksichtigt. Die Simulation wird derzeit auf andere Laserarchitekturen, wie kohärente Strahlkombination, erweitert. Diese hat zusätzlich das Potential zur Kompensation atmosphärischer Turbulenzen zur Erhöhung der effektiven Wirkreichweite.

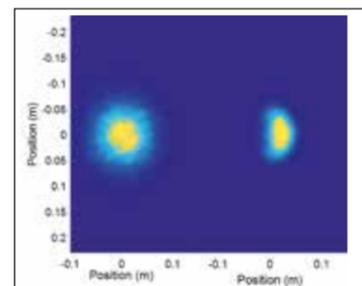


Abb. 1: Gemessene Leistungsdichteverteilung am Ziel bei geringer Leistung und hoher Turbulenz (links) und bei höherer Leistung (mit thermischer Strahlaufweitung) aber geringer Turbulenz (rechts)

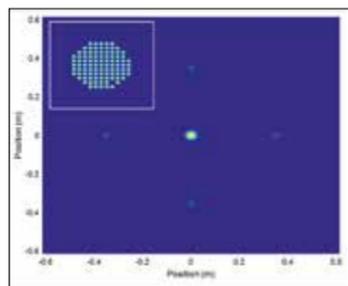


Abb. 2: Leistungsdichteverteilung des 120-kW-Lasers im Nahfeld (weißer Kasten) und im Fernfeld (Zielbereich) bei gleichphasiger Emission aller Kanäle

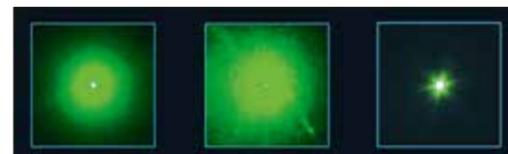


Abb. 3: Streustrahlung in Vorwärtsrichtung in Abhängigkeit von Aerosolbelastungen. Links: in mit Seifenblasen gesättigter Atmosphäre. Mitte: durch schwebende Sandpartikel. Rechts: durch saubere unbelastete Atmosphäre

Zur Verifikation und für weiterführende Experimente wird derzeit am IOSB ein neues 120-kW-Lasersystem mit kohärenter Kopplung installiert. Das Fernfeld weist eine sehr schmale zentrale Intensitätskeule auf (Abb. 2). Integriert in eine mobile Messanlage, ermöglicht dieses Lasersystem Untersuchungen zur Strahlausbreitung und Kompensation atmosphärischer Turbulenz in Echtzeit sowie Laserwirkung und Sicherheitsaspekte unter realistischen Bedingungen.

Ein weiterer Aspekt ist die systematische Erforschung von Aerosolen und ihren Auswirkungen auf das Wettergeschehen und dadurch das Streuverhalten von Laserstrahlung (Abb. 3). Zur Erforschung dieser dynamischen Prozesse wird vom IOSB eine Expansionswolkenkammer auf dem Gelände der WTD 91 in Meppen konzipiert und realisiert (Abb. 4). Darin werden Temperatur, Druck und Luftfeuchte realitätsgetreu eingestellt und auf diese Weise verschiedene atmosphärische Zustände, inkl. Wolkenbildung, reproduzierbar nachgestellt. Der HEL-Strahl wird am Austritt bezüglich Leistung und Strahlprofil vermessen; Streuphänomene innerhalb der Kammer werden messtechnisch erfasst. Dies erlaubt eine umfassende Betrachtung der Lasersicherheit und die Erarbeitung entsprechender Konzepte für Erprobung, Übung und Einsatz.

Das IOSB erforscht neue und verbesserte Laserkomponenten und Laserarchitekturen auch für zukünftige HEL > 1,4 µm Wellenlänge mit reduziertem Gefährdungsbereich. Dazu gehören die Herstellung aktiver Hochleistungslaserfasern, passender Faserlaserkomponenten (Abb. 5) und die Züchtung von Laserkristallen zur Sicherstellung der nationalen technologischen Souveränität und Versorgungssicherheit. Dadurch erstrecken sich die Arbeiten des IOSB über alle kritischen

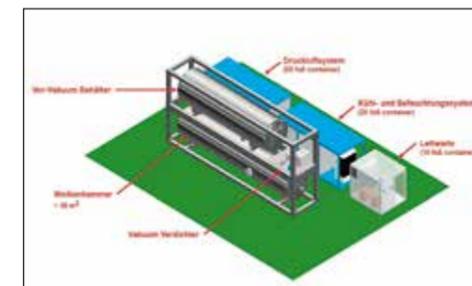


Abb. 4: Schematische Darstellung einer Expansionswolkenkammer. Durch plötzliche Expansion in einen Vakuumbehälter (Expansionsvolumen) fällt der Druck in der Hauptkammer schlagartig ab, wodurch sich kontrolliert Wolken bilden

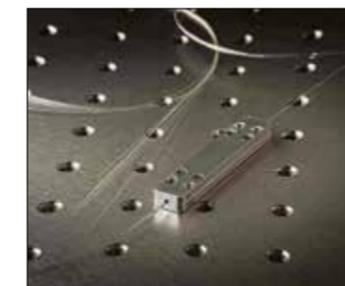


Abb. 5: Spezial-Faserkomponente zur Kopplung von Signal- und Pumpstrahlung für einen Hochleistungs-2 µm-Faserlaser



Abb. 6: Integriertes Hochleistungs-Thulium-Faserlasermodul

Schritte der Wertschöpfungsketten für Faser- und Festkörperlaser und ermöglichen so eine fundierte Erforschung des Machbaren ohne signifikante Einschränkungen.

Nachdem bereits in 2022 mit einem IOSB-Thulium-Faserlaser eine Ausgangsleistung von 940 W bei 2 µm aus nur einer Faser demonstriert werden konnte, wurden integrierte Faserlasermodule realisiert (Abb. 6), auf deren Basis aktuell Konzepte zur weiteren Leistungssteigerung der Einzelfaser und der kohärenten Kopplung auf 10–20 kW im 2 µm-Bereich, inkl. atmosphärischer Kompensation, erforscht und realisiert werden. Für die HEL-Zielbeleuchtung werden Laserarchitekturen im kurzwelligen Infrarot (SWIR) mit hoher Pulsenergie untersucht, welche in der aktiven Bildgebung Verwendung finden.

So stellt das Fraunhofer IOSB dem BMVg umfassende Analysen und Bewertungen zur Wirksamkeit und Effektivität von LWS in relevanten militärischen Szenarien bereit und sichert Zugang zu und Verfügbarkeit von neuen Laserarchitekturen und Komponenten sowie Optroniken für HEL-Systeme.

Norbert Heinze
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Dr. Alina Lindner
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

KI-Verfahren für die Drohnen- und Objekterkennung mit Infrarot- und Videosensorik

Der Schutz vor Einzeldrohnen und Drohnenschwärmen erfordert nicht nur ihre Detektion und Verfolgung, sondern auch Kenntnis über Art und Bedrohungspotenzial, Verhalten und Herkunft. Dies kann mit Hilfe von KI-Verfahren in Realzeit mit passiver Infrarot- und Videosensorik durchgeführt werden. Diese liefern dann im Verbund mit anderen Systemen einen wichtigen Beitrag für eine Situationsanalyse.

Drohnen sind ein entscheidendes Element der modernen Kriegsführung und können gezielt gegen Kräfte am Boden, militärische Sicherheitsbereiche und kritische Infrastruktur eingesetzt werden. Ihre Detektion, Erkennung, Analyse und Bekämpfung stellen somit wesentliche Voraussetzungen für den Schutz der eigenen Truppe, kritischer Infrastrukturen und sonstiger Einrichtungen dar. Die Erforschung entsprechender Verfahren ist daher von höchster Bedeutung. Dies gilt sowohl für Szenarien an Land und in der Dimension Luft als auch im maritimen Umfeld.

Infrarot- und Videosensoren ermöglichen es, Videos von anfliegenden Drohnen aufzunehmen und KI-Verfahren zur Bildanalyse darauf anzuwenden. Auf diese Weise lassen sich die Objekte detektieren, verfolgen, analysieren und damit Art und Nutzung von Drohnen erkennen (Abb. 1 und 2). Das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB forscht seit zehn Jahren an solchen KI-Verfahren (speziell: Deep Learning-Verfahren) zur Bildanalyse und integriert sie in sein Drohnen-detektionssystem MODEAS (Abb. 3).



Abb. 1: KI-Verfahren müssen in der Lage sein, tief-fliegende Drohnen vor diversen Hintergründen, wie Vegetation und Bebauung zu detektieren und sie nicht mit anderen Objekten, wie Vögeln oder aufgewirbelten Gegenständen, zu verwechseln



Abb. 2: Detektion vor Vegetation



Abb. 3: IOSB-Experimentalsystem MODEAS zur optischen Detektion, Tracking und Analyse von anfliegenden Drohnen

Die Aufgabenstellung knüpft damit direkt an andere Arbeiten des IOSB zu Echtzeitverfahren für die videobasierte luftgestützte Aufklärung an. Auch hier müssen visuell optische und Infrarot-Bilder (IR) von kleinen Objekten und deren Verhalten in variabler Umgebung und unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen analysiert werden.

Für das Training der KI-Verfahren werden große Mengen annotierter Bilddaten, die die Objektklassen aus verschiedenen Blickwinkeln, Beleuchtungssituationen und Umgebungen zeigen, verwendet. Auf diese Weise lernen die Verfahren, wie die zu erkennenden Drohnen in den verschiedenen Situationen aussehen (Abb. 4). Diese Trainingsdatensätze sind im visuellen Bereich schwierig und aufwändig zu erstellen. Im Infrarot-Bereich ist die Verfügbarkeit von Trainingsdaten noch stärker eingeschränkt. Daher werden vom IOSB spezielle Techniken des frugalen Lernens (Lernen mit wenigen Trainingsdaten) erforscht und eingesetzt, z. B. um die Trainingsdatensätze durch Variation von vorhandenen Daten anzureichern, IR-Verfahren mit Hilfe von adaptierten visuell-optischen Daten zu trainieren oder mit kleinen annotierten Trainingsdatensätzen zu lernen.

Für den Analyseprozess wird in MODEAS zunächst eine initiale Detektion der Drohnen durchgeführt. Eine Funkdetektion hat eine große Reichweite, ist aber nur für funkende Drohnen wirksam. In MODEAS wird eine auf Radar basierende Erst-detektion eingesetzt, die auch für autonome Drohnen, die keine Funksignale aussenden, wirksam ist. Radar hat zwar eine große Reichweite und kann auch Drohnenschwärme erfassen, ist aber typischerweise nicht in der Lage, Drohrentypen und ihre Nutzlast zu erkennen.



Abb. 4: Die KI-basierte Objektdetektion im Videoauswertesystem müssen die Drohnen bei unterschiedlichen Beleuchtungssituationen und Blickwinkeln für die verschiedenen Typen erlernen

Mit Hilfe einer solchen Voreinweisung wird dann im IOSB-System MODEAS eine Telekamera mit Videosensorik auf ein detektiertes potentiell Ziel eingeschwenkt und dieses mit KI-Verfahren detektiert und verfolgt. Damit wird auch die genaue Richtungsinformation ermittelt.

Auf den Videostrom werden weitere Deep Learning (KI)-Verfahren angewendet, die über die Unterscheidung zwischen den Klassen Drohne und Verwechslungsobjekt hinausgehende Informationen liefern.

Hierzu hat das IOSB Verfahren zur Unterscheidung verschiedener Klassen von Drohnen und insbesondere zur Detektion der Nutzlast realisiert. Dabei kann es sich z. B. um Videosensorik oder eine Funkausstattung handeln, aber auch um abwerfbare Munition oder fest verbaute Sprengkörper bei einer Kamikaze-Drohne (Abb. 5).

Bei Drohnenschwärmen werden dabei die Drohnen nacheinander abgearbeitet und die gewonnenen Informationen den Tracks (Spurverfolgung) im Trackmanagementsystem zugeordnet (Abb. 6).

Auf Basis dieser Informationen kann dann im System über die Priorisierung weiterer Maßnahmen entschieden werden.



Abb. 5: Die Erkennung von Nutzlasten ermöglicht die Einschätzung der Gefährlichkeit und damit auch eine Priorisierung der Bekämpfung bei der Detektion eines Drohnenschwarms



Abb. 6: Die Drohnen-Erkennung mit Infrarot- und Video-Sensoren ermöglicht es hochgenaue Winkelinformationen für eine Bekämpfung zu bestimmen und die Art und Nutzung von Drohnen mit Hilfe von KI-Verfahren zu analysieren, so dass bei Drohnenschwärmen Priorisierungen möglich werden

Dr. Jessica Conradi
Fraunhofer-Institut für Kommunikation,
Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Entwicklung einer ergonomisch gestalteten Standardkonsole für Marineschiffe

Um Arbeitsplätze auf seegehenden Einheiten standardisieren zu können, wurde ein ergonomisch gestaltetes Konsolenkonzept unter Einbeziehung der relevanten Nutzergruppe entwickelt und mit COTS-Geräten (Commercial Off-The-Shelf) realisiert. Das Konzept berücksichtigt die besonderen Anforderungen an militärische Arbeitsplätze auf seegehenden Einheiten und kann an zukünftige Gegebenheiten angepasst werden.

Militärische Arbeitsplätze auf seegehenden Einheiten sind besonderen Randbedingungen ausgesetzt. Dazu zählen z. B. hochdynamische Lageänderungen und Bedrohungslagen, inklusive Gefecht oder Evakuierung, sowie ein 24/7-Schichtbetrieb und hohe Anforderungen an die Informationssicherheit. Zusätzlich sind die Arbeitsplätze permanent dem Seegang ausgesetzt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde durch das Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE in Zusammenarbeit mit dem Marineunterstützungskommando (MUKdo) sowie der Einsatzflottille 2 (EF2) eine Konsole entwickelt, die für die Standardisierung solcher Arbeitsplätze verwendet werden soll (Abb. 1). Außerdem wurde im Hinblick auf Beschaffungszyklen und Nutzungsdauern militärischer Plattformen ein langfristig nutzbares Konzept erstellt, das an die jeweils zur Verfügung stehende Hardware (z. B. Display-Arten, -Größen oder -Auflösungen) anpassbar ist.

Die Entwicklung der Standardkonsole erfolgte nach dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess (DIN ISO 9241-210) und beinhaltete eine umfassende Kontextanalyse zu Richtlinien



Abb. 1: Realisierung Standardkonsole mit COTS-Hardware

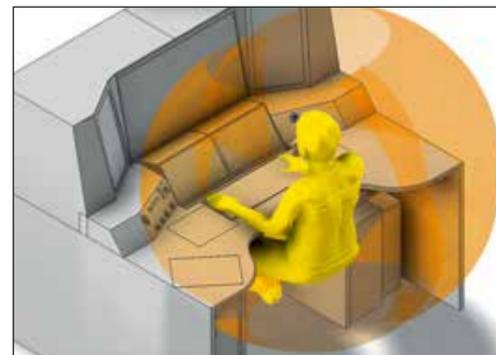


Abb. 2: Anwendung des digitalen Menschmodells RAMSIS bei der Auslegung der Standardkonsole, hier zur Auslegung des Greifraumes für Touchdisplays und Hardwareschalter

und Umgebungsfaktoren sowie einer Aufgabenanalyse unter Einbeziehung von Operateuren der Fregattenklassen F123, F124 und F125.

Aus dem Kontext wurde der Interaktionsbedarf abgeleitet, der in einem abstrakten Darstellungskonzept umgesetzt wurde. Dieses kann leicht an verfügbare Interaktionsgeräte angepasst werden. Das Darstellungskonzept definiert sowohl die Bereiche, in denen Monitore angeordnet werden können, als auch ein grundlegendes Konzept für die Informationsdarstellung.

Die Konsole ist so ausgelegt, dass sie für einen Körperbau-bereich vom 5. Perzentil weiblich („kleine Frau“) bis zum 95. Perzentil männlich („großer Mann“) sowie für unterschiedliche Körperbautypen ergonomisch nutzbar ist. Dabei wurden u. a. verschiedene Längen- und Breitenmaße sowie verschiedene Proportionen (z. B. „Sitzzwerg“, „Sitzriese“) berücksichtigt. Mit Hilfe des digitalen Menschmodells RAMSIS der Firma Human Solutions wurde der Arbeitsplatz anthropometrisch ausgelegt und es wurden Greif- und Sichträume definiert (Abb. 2).

Dem abstrakten Displaykonzept liegt eine optimale Sitzposition zugrunde, die daraus ermittelte Augenposition bestimmt die optimalen Sehbereiche für „sehr wichtige/häufige“ (Bereich I), „wichtige / häufige“ (Bereich II) und „gelegentliche“ Arbeiten (Bereich III) bestimmt (Abb. 3).

Aufgrund dieses abstrakten, langfristig gültigen Konzeptes wurde mittels COTS-Produkten (Commercial of the shelf) ein Beispielarbeitsplatz realisiert (siehe Abb. 1). Er enthält einen großen Monitor im zentralen Gesichtsfeld, auf dem z. B. ein Führungs- und Waffeneinsatzsystem (FüWES) dargestellt

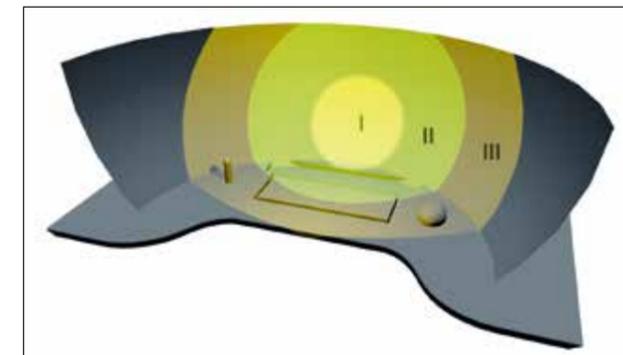


Abb. 3: Abstraktes Konzept für die Anordnung von Bildschirmen und Informationen innerhalb des Gesichtsfeldes des Nutzers

werden kann. Zwei Flankenmonitore dienen der Anzeige weiterer Informationen, die auch in physisch getrennten Netzen (IT-Sicherheit) betrieben werden können. Außerdem sind zwei Touchmonitore im Greifraum angeordnet, die beispielsweise für Sprechstellen, Checklisten, Vorschriften etc. genutzt werden können.

Als Eingabegeräte sind Tastatur, Joystick sowie eine spezielle, für den Einsatz auf Schiffen angepasste Maus vorhanden. Der Arbeitsplatz ist symmetrisch angelegt und kann für Links- und Rechtshänder optimiert werden. Es ist genügend Platz für handschriftliche Notizen vorhanden. Wichtig sind zudem ein Schlüsselschalter für die Freigabe und Hardware-Buttons für den haptisch kontrollierten Einsatz von Wirkmitteln sowie ein Umschalter für physisch getrennte Netz-Zuordnung der Interaktionsgeräte. Zudem ist Raum vorgesehen für persönliche Dinge, schriftliche Informationen und die persönliche Schutzausstattung.

Jonas Rockbach
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Dr. Sven Fuchs
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Hybride Intelligenz und Entwicklung einer Workbench zur Untersuchung von Konzepten zur komplementären Integration menschlicher und künstlicher Intelligenz

Der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) kann zu Leistungssteigerungen führen, wenn die Fähigkeiten von Mensch und KI gewinnbringend kombiniert werden. Zur Erforschung von hybrider Intelligenz (HI), d. h. der komplementären Integration menschlicher und künstlicher Intelligenz, wird eine HI-Workbench als Umgebung zur Untersuchung von transparenten und kontrollierbaren KI-Funktionen entwickelt.

Der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in militärischen Systemen bietet insbesondere dann hohes Potenzial, wenn die Stärken des Menschen mit denen der KI komplementär kombiniert werden. Während KI primär große Mengen an Daten in kurzer Zeit analysieren, Erkenntnisse extrahieren und Handlungsoptionen aufgabenspezifisch vorschlagen kann (spezialisierte Intelligenz), sind Menschen in der Lage, kreative Lösungen zu finden, um auch in unvorhersehbaren Situationen und bei unvollständigen Datenlagen erfahrungsbasiert Entscheidungen zu treffen (breite Intelligenz). Am Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE wird daher erforscht, wie menschliche und technische Stärken komplementär vereint werden können, um Entscheidungen gleichzeitig schnell (KI-unterstützt) und angemessen (unter menschlicher Supervision) ausführen zu können. Darauf zielt das Paradigma der menschenzentrierten KI, demgemäß bei der Systemgestaltung eine Vereinbarkeit von hoher menschlicher und hoher maschineller Kontrolle erreicht wird. Dieses junge Paradigma ist jedoch zurzeit noch ein theoretisches Konstrukt, das durch weitere Forschung umsetzbar ausgestaltet werden muss.

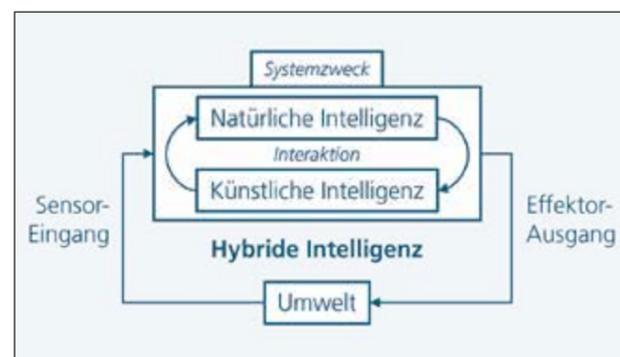


Abb. 1: Hybride Intelligenz (HI) entsteht durch die Interaktion natürlicher und künstlicher Intelligenz im Kontext von Systemzweck und Umwelt

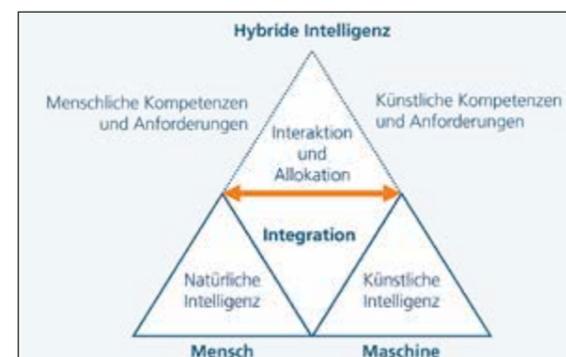


Abb. 2: Die Triade der hybriden Intelligenz (HI) beschreibt deren Gestaltungsraum als die Integration von menschlichen und künstlichen Eigenschaften im Kontext des hybriden Verhaltens

Elena Dalingher
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Die Supervision durch den Menschen ist notwendig, um die Ausrichtung der KI an vorgegebenen Missionszielen sicherzustellen, die Übersteuerung fehlerhafter KI-Ergebnisse zu ermöglichen und die Einhaltung ethischer und rechtlicher Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Das leistungssteigernde Potenzial von KI sollte jedoch wiederum nicht durch zu enge menschliche Kontrolle gedämpft werden. Die komplementäre Integration von menschlicher und künstlicher Intelligenz unter Betrachtung der relativen Stärken und Schwächen bezeichnen die Verfasser als hybride Intelligenz (HI). Grundlage von HI ist die Betrachtung von Mensch und Maschine als separate, aber eng interagierende, zielgerichtete intelligente Akteure, die durch ihre Interaktion kooperativ zum Systemzweck beitragen (Abb. 1). Dies umfasst eine rollen- oder kontextbasierte Arbeitsteilung, kann jedoch ebenfalls Unterstützung, Handlungsvorschläge oder korrektive Interventionen in beide Richtungen beinhalten. Beispielsweise könnte eine KI in kritischen Situationen temporär die Initiative übernehmen, wobei eine Kontrollierbarkeit durch eine Parametrisierung der Übergabeauslöser erhalten bleibt. Basierend auf fundamentalen Anforderungen an die hybride Intelligenz werden die relativen Fähigkeiten von Mensch und Maschine laufend ausgewertet und mittels dynamischer Interaktionsgestaltung zu einem Hybriden integriert (Abb. 2).

Zur Erforschung und Gestaltung von HI-Konzepten ist eine experimentelle Entwicklungs-, Simulations- und Testumgebung (HI-Workbench) in Vorbereitung, mit der HI-Funktionen agil entwickelt werden können. Im Vordergrund stehen dabei die Konzeption und Untersuchung von Methoden kooperativer Interaktion mit KI, um sowohl angemessenes Vertrauen als auch Transparenz und Kontrollierbarkeit zu schaffen, ohne das Potenzial von KI auszubremsen. Die Evaluation in der Workbench erfordert drei Expertisen (Abb. 3): wehrtechnische Domänenexpertise (bspw. zum Thema Aufklärung), technische KI-Expertise, und die integrierende HI-Expertise. Mittels der HI-Workbench wird schließlich nicht nur die Leistung des Algorithmus, sondern auch dessen Einfluss auf die hybride Leistung (Mensch-KI-Systemleistung) erfasst und optimiert. Nur so kann sichergestellt werden, dass technisch machbare KI-Funktionen auch zu einer höheren Intelligenz des Gesamtsystems und somit einem sicheren Mehrwert in der Anwendung führen.



Abb. 3: Rollen und verschachtelte Expertisen an der HI-Workbench am Beispiel militärische Aufklärung

Erfolg eines wissenschaftlich fundierten Berechnungsverfahrens für den baulichen Schutz: Rückblick auf 25 Jahre Anwendung des RHT-Betonmodells

Impakt- und Explosionsvorgänge auf Stahlbeton-Konstruktionen der kritischen Infrastruktur und von Schutzbauten wurden in dreidimensionalen, hochdetaillierten Computersimulationen durch das am Fraunhofer-Institut für Kurzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), entwickelte Werkstoffmodell (dessen Akronym „RHT“ sich aus den Namen der wesentlichen Entwickler Riedel, Hiermaier und Thoma herleitet) prognosefähig berechenbar. Seine Verfügbarkeit in kommerziellen Berechnungsprogrammen führte zu sehr breiter Validierung und zahllosen nationalen und weltweiten Anwendungen.

In den neunziger Jahren wurden dreidimensionale Computer-Simulationsverfahren der Finite-Elemente-Methoden (FEM) auch für Anwendungen der Kurzeitdynamik, wie Automobil-Crash im zivilen und Schutz und Wirkung im militärischen Bereich, zugänglich. Rechencodes auf Mainframes militärischer Großrechenanlagen, vor allem der USA, wurden durch Ausgründungen kommerziell auf Servern und Personal Computern nutzbar. Dadurch konnten immer realitätsgetreuer Gebäude, Fahrzeuge aller Art und Wirkmittel unter Impakt und Explosion numerisch berechnet werden. Bald erwiesen sich einfache elastisch-plastische Beschreibungen für Metalle als nicht mehr ausreichend. Deswegen mussten konstitutive Modelle für Verbundwerkstoffe, Gewebe und Baumaterialien, wie vor allem Beton, vertieft oder ganz neu entwickelt werden.

Am Fraunhofer EMI wurde zu dieser Zeit das RHT-Modell für das hochdynamische Widerstandsverhalten von Beton formuliert. Es beschreibt das komplexe mehraxiale, druck- und dehnratenabhängige Festigkeits- und Nachbruchverhalten des stark heterogenen Werkstoffs. Die Druck-Dichte-Energie-Beziehung (oder Zustandsgleichung) unter starken Stößen,

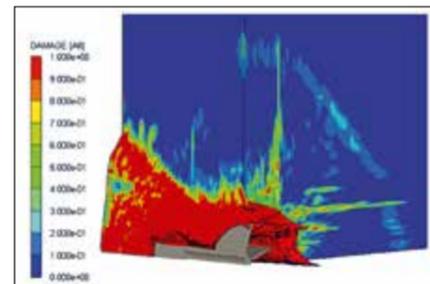


Abb. 1: Eindringung des Hecks einer Mörsergranate in eine Stahlbeton-Schutzstruktur (Quelle: WTD 52)

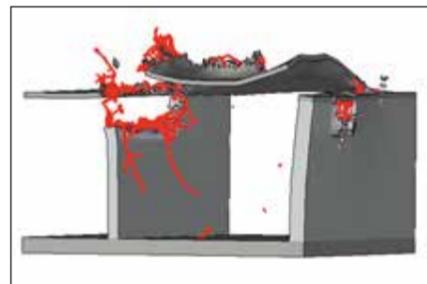


Abb. 2: Aufreißen eines Versorgungsschachts unter einer Straße durch Explosion einer Sprengfalle (Quelle: WTD 52)

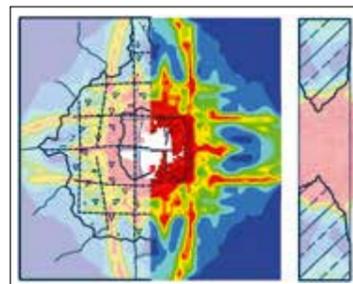


Abb. 3: Simulierte Durchbruchöffnung in einer nuklearen Sicherheitsbarriere nach Kontaktdetonation im Vergleich zu experimentellen Bruchlinien (linke Hälfte)

wie sie bei ballistischem Impakt und Explosionswirkung auftreten, wurde besser messbar gemacht und mathematisch beschrieben. Die Implementierung des Modells fand in haus-eigenen Rechenverfahren und in kommerziellen FEM-Programmpaketen (Ansys Autodyn im Jahr 2000, LS-DYNA ab 2011) statt.

Nach seiner ursprünglichen Validierung an großskaligen Impaktversuchen der WTD 91 mit der 500 kg schweren, Beton brechenden Bombe BETAB-500 wurde das Betonmodell für zahlreiche Aufgaben des baulichen Schutzes am Fraunhofer EMI und der WTD 52 verwendet. Es etablierte sich in der deutschen Nutzerschaft über zweieinhalb Jahrzehnte als eines der Standardmodelle, zum Beispiel für:

- Auslegung von Luftfahrzeug-Sheltern
- Auslegung eines Munitionsarbeitshauses
- Berechnung von Strukturreaktionen bei den SHIELD-Großexplosionsversuchen in Schweden
- Schutzauslegung gegen Mörserbeschuss (Abb. 1)
- Berechnungen zu Strukturreaktionen bei der CUIRA-Versuchsserie mit der Schweiz für Lagerstätten der Munitionsbevorratung
- Berechnungen im Rahmen der internationalen Klotz Group zur Verbesserung des gemeinschaftlich entwickelten Engineering Tools für Munitionslagersicherheit
- Berechnungen zur Auswirkung von Sprengfallen in Straßenkanälen (Abb. 2).

Neben militärischen fand und findet das Modell auch zahlreiche zivile Anwendungen, zum Beispiel in der nuklearen Sicherheit (Abb. 3 und 4) für Terror- und Flugzeugimpaktenschutz kerntechnischer Anlagen. Auch für das pyrotechnisch getriebene Setzen

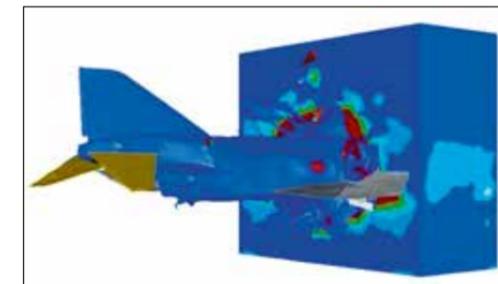


Abb. 4: Flugzeugimpakt einer Phantom F4 auf eine Kernkraftwerk-Ersatzstruktur, entsprechend einem Großversuch von USA/ Japan

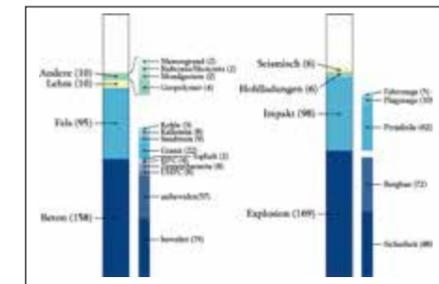


Abb. 5: Dynamische Anwendungen (links) und Materialien (rechts) in weltweiten Veröffentlichungen

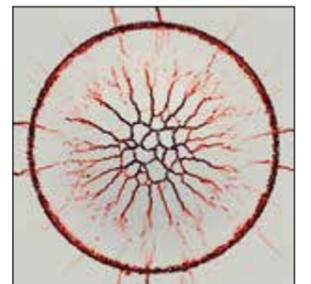


Abb. 6: Neueste Evolution der Betonmodellierung zur Abbildung von Trümmerbildung und Abgangsbedingungen (Quelle: Dr. Grunwald)

von Betonankern oder Abbruchsprengungen ist es gut geeignet.

Durch die weltweite Verfügbarkeit in kommerziellen FEM-Programmen finden sich in der Fachliteratur mehrere Hundert Referenzen mit wissenschaftlichen und ingenieur-technischen Anwendungen des Modells. Neben Rückmeldungen zu möglichen Verbesserungen bestätigt im Wesentlichen auch die internationale Fachwelt die breite Nutzbarkeit des Modells für unterschiedliche hochdynamische Einwirkungen (Abb. 5, links) auf Beton und Beton-ähnliche Materialien, wie zum Beispiel auch Mauerwerksziegel und Gestein (Abb. 5, rechts).

Neueste Entwicklungen ermöglichen seit Kurzem auch die Beschreibung von Trümmergrößen und Abgangsbedingungen (Abb. 6) zur numerischen Ermittlung von Sicherheitsperimetern rund um Munitionslager oder explosionsgefährdeten Silos (siehe auch Beitrag Dr. Grunwald, EMI). Die Schlüsselgrößen waren bisher nur in äußerst teuren und seltenen Großversuchen zugänglich.

Insgesamt wurde somit vor einem Vierteljahrhundert eine wissenschaftlich international anerkannte Basis geschaffen, Betonbauteile und Gebäude im Bereich Wirkung und Schutz prognosefähig zu simulieren.

Dr. Christoph Grunwald
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Dr. Malte v. Ramin
Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-Institut
EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Fähigkeit zur Berechnung von Gefährdungsbereichen und Schädigungszonen durch Trümmerwurf bei Sprengbelastung von Betonstrukturen

Mittels einer leistungsfähigen Mesoskalenbeschreibung von Beton ist es nun möglich, die Schädigung von Beton unter hochdynamischer Beanspruchung bis zum Bruch – und damit zur Trümmerbildung – zu berechnen. Die diskreten Trümmerteile können erstmalig individuell beschrieben und ihre Flugweiten bestimmt werden.

Beton zählt aufgrund seiner Vielseitigkeit, Langlebigkeit und wirtschaftlichen Verfügbarkeit zu den am häufigsten verwendeten Baustoffen. Die Mehrheit der großen Büro- und Wohngebäude sowie unzählige Strukturen für industrielle und militärische Zwecke bestehen aus Beton. Werden Betonstrukturen hochdynamisch beansprucht, entstehen im Material Spannungswellen, die zu Bruch und Fragmentierung führen. Die mit hoher Geschwindigkeit herausgeschleuderten Bruchstücke können zu gefährlichen Projektilen werden, in Einzelfällen wurden mehr als 1000 Meter Flugweite gemessen.

In vielen Fällen sind Menschen und Einrichtungen durch Betonbauwerke geschützt – bei deren Versagen stellt der Trümmerwurf eine erhebliche Gefahr dar. Bisher basierten darauf bezogene Risikoanalysen auf statistischen Verteilungen der Trümmermasse und deren Abgangsbedingungen, die aus wenigen aufwendigen Großversuchen ermittelt wurden. Ein präzises, prognosefähiges numerisches Werkzeug stand bislang nicht zur Verfügung.

Am Fraunhofer-Institut für Kurzezeitdynamik, Ernst-Mach-

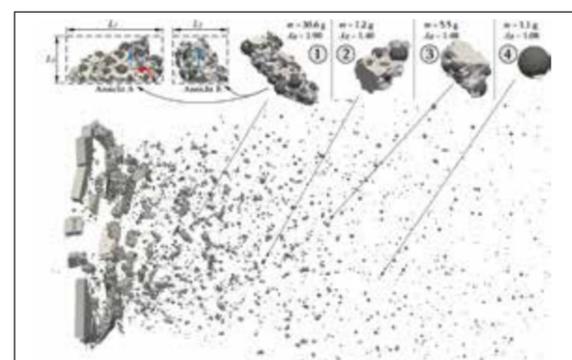


Abb. 1: Betonplatte unter Explosionsbelastung: Die Platte zerbricht, und eine Wolke von kleineren Trümmern wird mit Geschwindigkeiten bis zu 400 m/s herausgeschleudert. Die einzelnen Trümmer können erstmals diskret ausgewertet und analysiert werden

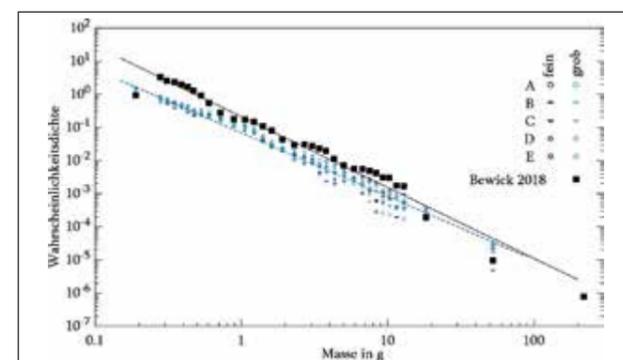


Abb. 2: Vergleich der Massenverteilung zwischen Experiment (schwarze Quadrate) und Simulationen

Institut EMI, wurde in den letzten Jahren eine Mesoskalenbeschreibung von Beton verwendet, um nicht nur die initiale Schädigung, sondern Risswachstum, vollständigen Bruch und Trümmerbildung zu simulieren. Die Gesteinskörnung wird explizit modelliert und in eine Mörtelmatrix eingebettet. Durch die Modellierung der Heterogenität des Materials werden lokale Spannungszustände direkt auf der Strukturebene aufgelöst.

Erstmals ist es damit möglich, die sich bei hochdynamischer Belastung bildenden Betontrümmer diskret auszuwerten und mit experimentellen Ergebnissen zu vergleichen, siehe Abb. 1 und 2. Die detaillierte Analyse erlaubt darüber hinaus, Form und aerodynamische Faktoren der Trümmer zu bestimmen, was zu genaueren Flugbahnrechnungen führt. Insgesamt ist damit ein deutlicher Fortschritt zur numerischen Beschreibung des komplexen Problems von Trümmerbildung und -wurf von Betonstrukturen unter hochdynamischen Belastungen gelungen.

Relevant ist dies bei der Herstellung oder Lagerung von Munition. Sicherheitsabstände werden häufig zu konservativ angenommen, wodurch der zur Verfügung stehende Außenraum nicht optimal genutzt wird. Mit dem neuen Verfahren ist es nun möglich, diese Abstände deutlich exakter zu bestimmen. Während bei Munitionslagern Trümmer in die Umgebung geschleudert werden, kann auch der umgekehrte Fall auftreten. Detonieren Sprengladungen unmittelbar vor der Außenseite eines Gebäudes, kann der resultierende Trümmerflug in das Gebäudeinnere Personen oder Ausrüstung erheblich gefährden. Gleiches gilt für ungewollte Explosionen: Häufig sind Personenopfer durch Trümmerwurf nach Unfällen mit explosionsfähigen Stoffen zu beklagen. Nicht nur das

Risiko getroffen zu werden kann nun bedeutend genauer ermittelt werden, sondern auch die Intensität eines Treffers.

Darüber hinaus stellt die Zunahme der Bedrohung durch terroristische Anschläge unter Verwendung militärischer Wirkmittel eine Gefährdung für kritische Infrastrukturen dar. Könnten Trümmer in komplexen Industrieanlagen möglicherweise sensible Anlagenteile treffen und beschädigen? Auch bei forensischen Analysen kann das Verfahren, z. B. zur Ermittlung der Einwirkung, ausgehend vom Schädigungsbild, ebenfalls realistischere Ergebnisse liefern als bisher, s. Abb. 3.

Die Lösung der Modelle auf der Mesoskala erfordert einen hohen Rechenaufwand und benötigt entsprechende Hardware. Aufgrund begrenzter Ressourcen wurde das Verfahren bisher prototypisch angewandt. Für die geplanten Kapazitätserweiterungen im Bereich Munitionslager kann das Verfahren jedoch verwendet werden, um raumeffiziente Gefährdungsbereiche zu bestimmen, sofern geeignete Hardware zur Verfügung steht. Neben diesem Erfordernis sind verbesserte Modelle zur Berücksichtigung von Erdüberdeckung bei Munitionslagerorten zukünftig ebenso zu betrachten wie nachhaltige Bauwerkstoffe, z. B. Geopolymerbetone.

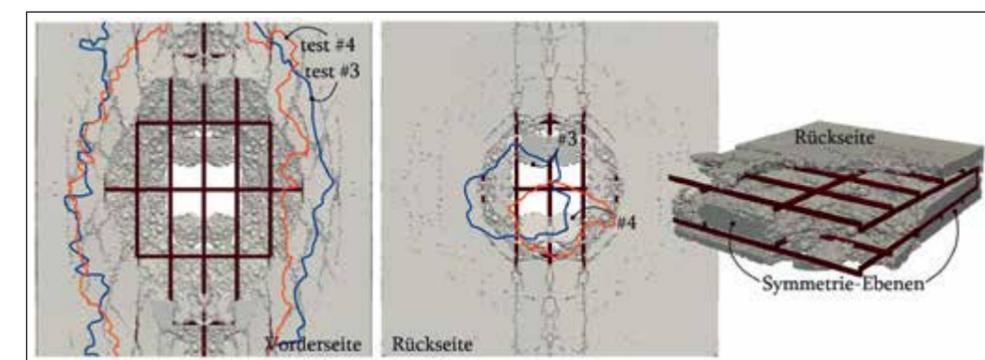


Abb. 3: Das Schädigungsbild nach Abgang der Trümmer ist sehr realistisch und kann für forensische Analysen verwendet werden. Die Linienzüge mit den Beschriftungen (test #3 bzw. #4) markieren den Kratertrand im Experiment

Dr. Iole Pisciotano
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

Dr. Diego Cristallini
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

Passivradar mit Satellitenbeleuchtern für verdeckte Überwachung und Aufklärung in maritimen Szenarien

Während Passivradare, die terrestrische Beleuchter nutzen, mittlerweile eine ausgereifte Technologie mit mehreren kommerziellen Systemen auf dem Markt sind, ist die Nutzung von Satellitenbeleuchtern noch ein offenes Forschungsfeld. Satelliten könnten den Betrieb von passivem Radar in abgelegenen Gebieten und auf offenem Meer durch Stealth-Plattformen wie U-Booten ermöglichen.

In den letzten Jahrzehnten hat der Raumfahrtsektor erheblich an Bedeutung gewonnen, ebenso wie die kommerziellen Kommunikations- und Rundfunkdienste, die vom Weltraum aus bereitgestellt werden. Dies hat das Interesse der Passivradar-Forschungsgemeinschaft geweckt, die darauf abzielt, die Fähigkeiten solcher Signale als Gelegenheitsbeleuchter zu untersuchen. Tatsächlich stellen Satellitensignale eine geeignete Beleuchtungsquelle dar, falls keine terrestrische Infrastruktur verfügbar ist, insbesondere in abgelegenen Gebieten und auf offenem Meer.

Die Nutzung von Satellitensignalen für Passivradarzwecke könnte in militärischen Szenarien mehrere strategische Vorteile bieten:

- (i) Eine Weltraum-basierte Übertragungsinfrastruktur ist im Allgemeinen schwieriger durch gegnerische Kräfte in einer Kampfsituation zu zerstören;
- (ii) Die Satelliten, obwohl auf nicht-kooperative Weise genutzt, könnten auch feindliches Territorium beleuchten;
- (iii) Ein Weltraum-basiertes passives Radar, das darauf ausgelegt ist, ein global verfügbares Satellitensignal zu nutzen,

	Orbit	Signalbandbreite	Signalstärke an der Erdoberfläche [dBW/m ²]	Kontinuierliche Beleuchtung	Erkennungsbereich
GNSS (GPS, Galileo, Beidou, Glonass)	MEO	bis zu 15 MHz im L-Band	ca. -130	ja	begrenzt
DVB-S / DirectTV (z.B. Astra)	GEO	bis zu 2 GHz im Ku-Band	ca. -108	ja	mittel/begrenzt
FSS (Starlink, OneWeb)	LEO	bis zu 250 MHz im Ku-Band	ca. -98	ja	mittel
SAR-Konstellationen (z.B. Capella, Icoye)	LEO	über 1 GHz im X-Band	ca. -50	nein	groß

Abb. 1: Überblick über potenzielle Raumbeleuchter für passives Radar



Abb. 2: Betrachtetes Szenario

- könnte weltweit operationell einsetzbar sein, möglicherweise nur mit geringfügigen Modifikationen. Dies ist von entscheidender Bedeutung, um Entwicklungs- und Missionsplanungskosten zu reduzieren;
- (iv) Militärische Szenarien auf offenem Meer sind durch Stealth-Plattformen besonders relevant.

Eine Zusammenfassung möglicher Satellitenbeleuchter mit ihren Eigenschaften ist in Abb. 1 dargestellt.

Das exemplarische operationale Szenario wird in Abb. 2 skizziert. In diesem Fall wird ein U-Boot als typische militärische Plattform betrachtet, die gezwungen ist, so leise wie möglich zu operieren, und damit an der Nutzung von Passivradar-Technologie ein besonderes Interesse haben könnte. Das U-Boot operiert auf offenem Meer und benötigt die Aufklärung eines maritimen Ziels, dessen Anwesenheit bereits durch andere Mittel festgestellt wurde. Die Aufklärung kann beispielsweise in Form von passiver Radarabbildung über inverse synthetische Apertur-Radar (ISAR)-Ansätze erfolgen. ISAR kann äußerst relevante Informationen über ein nicht-kooperatives Ziel liefern, indem die relative Rotationsbewegung zwischen dem Radar und dem Ziel ausgenutzt wird.

Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR ist im letzten Jahrzehnt aktiv in der Entwicklung des SABBIA®-Systems, eines satellitengestützten passiven Radars zur Bildgebung von maritimen Zielen. Während einer ersten Messkampagne, die 2018 entlang des Rheins in der Nähe von Bonn, Deutschland, durchgeführt wurde, wurde das SABBIA®-System in einer stationären Konfiguration betrieben, das heißt, es war fest am Boden installiert. Das resultierende

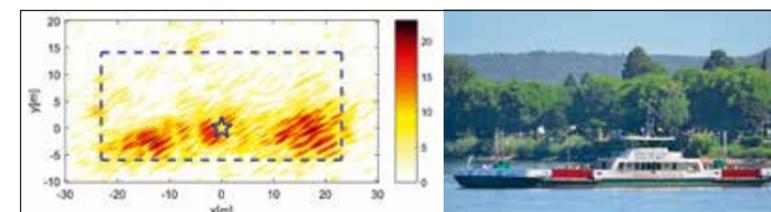


Abb. 3: Passives ISAR-Bild (links, in dB-Skala) von einer Fähre (rechts) mit SABBIA®-System in stationärer Konfiguration

passive ISAR-Bild einer Fähre, die den Fluss entlangfährt, ist in Abb. 3 dargestellt. Kürzlich, während der PaRMeSTO NATO SET-320 Kampagne, die im September 2024 durchgeführt wurde, wurde das Experiment mit derselben Fähre als Ziel und dem SABBIA®-System, das nun auf einem beweglichen Schiff montiert ist, wiederholt (siehe Abb. 4). Dieses vereinfachte Setup ahmt das operationale Szenario nach, in dem das passive Radar von einer Stealth-Plattform betrieben wird, um verdeckte Aufklärung zu ermöglichen.

Passivradarabbildung mit Satellitenbeleuchtern könnte die maritimen Operationen in den nächsten Jahrzehnten erheblich beeinflussen. Die zusätzliche Zielabbildungsfähigkeit in einem vollständig stillen Modus kann erhebliche strategische Vorteile bringen und somit die Überlegenheit in diesem Bereich gewährleisten.



Abb. 4: SABBIA®-System montiert auf einem beweglichen Schiff

Dr. Philipp Neining
 Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik IAF
 Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

Dr. Fabian Thome
 Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik IAF
 Freiburg

info@iaf.fraunhofer.de

Breitbandige und robuste Front-End-Module im Ka-Band

Breitbandige Front-End-Module im Ka-Band (26 – 40 GHz) ermöglichen die drahtlose Kommunikation bei hohen Datenraten über große Entfernungen und sind Schlüsselelemente für Radare mit hoher räumlicher Auflösung. High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) im Materialsystem Galliumnitrid (GaN) bieten dabei signifikante Vorteile in der Widerstandsfähigkeit gegen elektronische Angriffe und gegenüber Störsignalen.

Auf Indiumgalliumarsenid (InGaAs) oder GaN basierende Verbindungshalbleiter bieten im Vergleich zu Silizium-basierten Halbleitern wertvolle Vorteile für Hochfrequenzanwendungen. Für mit InGaAs-Prozessen realisierte MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuits) sind hier besonders die sehr hohen Betriebsfrequenzen bis über 1 THz und die sehr niedrigen Rauschzahlen zu nennen. Daher können diese Schaltungen auch Signale verstärken, die mit Silizium-basierten Technologien vom Rauschen nicht zu unterscheiden sind.

Neben den verwendeten rauscharmen Verstärkern (Low Noise Amplifier, LNA) sind zum Aufbau einer Kommunikationsverbindung oder eines Radarsystems ein Hochfrequenz (HF)-Schalter und ein Leistungsverstärker (High-Power Amplifier, HPA) notwendig, die zusammengenommen als Frontend-Modul (FEM) bezeichnet werden (Abb. 1).

Mit FEMs aus InGaAs-Halbleitern konnten am Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik IAF Kommunikations- und Radarsysteme realisiert werden, die über extrem hohe Empfindlichkeit und Auflösung verfügen. Aus diesem

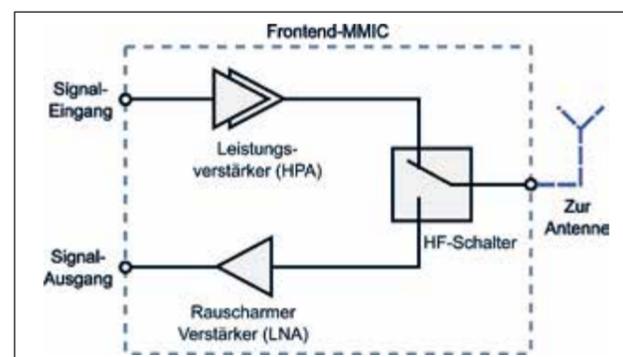


Abb. 1: Architektur eines Frontend-Moduls (FEM) mit rauscharmem Verstärker, Hochleistungsverstärker und HF-Schalter

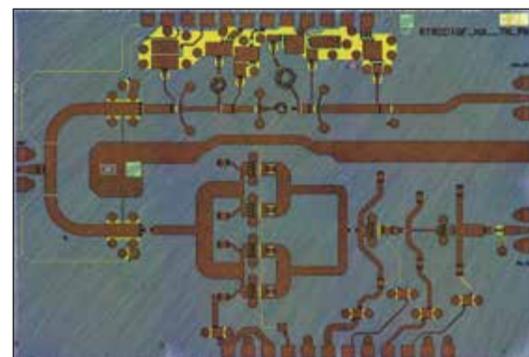


Abb. 2: Chipfoto des mit dem GaN15-Prozess des Fraunhofer IAF prozessierten Ka-Band FEM. Der Chip hat die Maße 4 x 2,75 mm²

Grund werden InGaAs-MMICs erfolgreich für Anwendungen eingesetzt, die sehr hohe Anforderungen an die Performanz stellen.

Im Zusammenhang mit rauscharmen Verstärkern und FEMs wurden am Fraunhofer IAF in letzter Zeit auch GaN-basierte Verbindungshalbleiter untersucht. GaN ermöglicht aufgrund seiner größeren Bandlücke im Vergleich zu InGaAs höhere Betriebsspannungen bei deutlich verbesserter Robustheit gegenüber Signalen mit hohen Pegelwerten. Die erreichten Rauschzahlen liegen bei GaN geringfügig über denen von InGaAs, jedoch kann bei GaN-Schaltungen auf Grund der höheren Robustheit auf eine Schutzschaltung vor dem LNA verzichtet werden, wodurch das Rauschverhalten des Gesamtsystems verbessert wird.

Im Rahmen der aktuellen Forschung hat das Fraunhofer IAF eines der weltweit ersten Ka-Band-FEMs in GaN-Technologie entworfen, hergestellt und messtechnisch charakterisiert. Ein Foto des 4 x 2,75 mm² messenden Chips ist in Abb. 2 zu sehen. Zur Prozessierung wurde der institutseigene GaN15-Prozess genutzt, der eine Gatelänge von 150 nm, eine Betriebsspannung von bis zu 30 V und eine nachgewiesenermaßen hohe Lebensdauer aufweist.

Im Betriebsfrequenzbereich zwischen 31 und 40 GHz erreicht der FEM-MMIC im Sendebetrieb eine lineare Verstärkung von bis zu 22 dB und eine Ausgangsleistung des HPA von bis zu 34,9 dBm (3,1 W). Der rauscharme Verstärker erreicht sogar eine größere Bandbreite und weist zwischen 26,5 und 40 GHz eine Rauschzahl von weniger als 3,5 dB auf (Abb. 3). Dies ist die bisher größte demonstrierte Bandbreite eines LNAs in einem GaN-FEM und

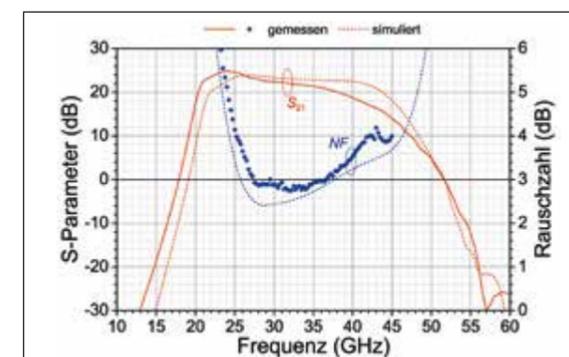


Abb. 3: Gemessene Verstärkung (rot, links) und Rauschzahl (blau, rechts) über der Frequenz für das realisierte FEM im Empfangspfad

die bisher mit Abstand geringste Rauschzahl, die mit einem Prozess mit hoher Robustheit erreicht wurde.

In diesem Zusammenhang wurden zur Untersuchung der Robustheit von GaN-MMICs ausführliche Experimente durchgeführt. Dabei wurde der Eingang (also das Gate) mehrerer Testschaltungen hohen Dauerstrich-HF-Leistungen von bis zu 35 dBm (3,2 W) ausgesetzt – eine Situation wie sie auch bei starken elektromagnetischen Signalen, wie in terrestrischen Übertragungssystemen, auftreten kann (Abb. 4). Die ausführliche messtechnische Charakterisierung vor und nach Belastung zeigt, dass keinerlei Beeinträchtigungen der Schaltungen im Hinblick auf Rauschzahl und Kleinsignalverstärkung zu beobachten ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine GaN-FEM-Technologie für das Ka-Band erarbeitet werden konnte, die den bisherigen Stand der Technik übertrifft. Damit wird die Grundlage für zukünftige Anwendungen gelegt, die sowohl hohe Performanz als auch hohe Robustheit erfordern. Insbesondere in Umgebungen, in denen hohe Signalpegel durch Übersprechen oder durch Jammer zu erwarten sind, weisen die robusten FEM große Vorteile auf.



Abb. 4: Terrestrisches Übertragungssystem (TÜtrSys) für große Reichweiten (Quelle: Bundeswehr / Martina Pump)

Dr. Sebastian Wurster
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Martin Lietz, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Leistungssteigerung von Rohrwaffensystemen durch simulationsgestützte Schüttdichtenoptimierung

Die Schüttdichte eines Treibladungspulvers (TLP) bestimmt die TLP-Masse im Ladungsraum und damit den für den Geschossantrieb zur Verfügung stehenden Energiegehalt und ist somit für die Leistung von entscheidender Bedeutung. Für eine optimale Auslegung der Geometrie und des Befüllungsprozesses forscht das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT deshalb an einer Methode zur simulativen Prognose der Schüttdichte.

Zur Prognose der Leistungsfähigkeit eines Antriebskonzeptes muss die Schüttdichte in der Munition bekannt sein. Die Schüttdichte wird gegenwärtig auf Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt oder muss experimentell für jede Geometrie einzeln bestimmt werden. In jedem Fall steht für jede Antriebsauslegung die Validierung der erreichbaren Schüttdichte unter realen Systembedingungen am Ende des Auslegungsprozesses.

Die experimentelle Bestimmung der Schüttdichte erfolgt dabei gemäß der technischen Arbeitsvorschrift TL 1376-0600T500. Hierfür muss eine große Menge an TLP hergestellt werden, was insbesondere bei neuen TLP-Formulierungen und -Geometrien zeitaufwändig und kostenintensiv ist. Darüber hinaus wird die Schüttdichte in einem statischen Normgefäß ermittelt, wodurch der Einfluss von Ladungsraumkomponenten, z. B. ins Pulverbett ragende Treibladungszünder oder Penetratoren, vernachlässigt und der reale Munitionsladeprozess, z. B. unter Rütteln oder Drehen, nicht abgebildet wird. Dadurch entspricht die unter Laborbedingungen experimentell bestimmte nicht der erreichbaren Schüttdichte im realen System.



Abb. 1: CAD-Modell eines konventionell gefertigten zylindrischen Treibladungspulvers mit variierendem Schnittwinkel (links, mitte) und eines nicht konventionell herstellbaren Treibladungspulvers (rechts)



Abb. 2: Befüllungsprozess eines generischen Ladungsraums (links) und resultierendes Pulverbett (rechts)

Weiter bieten neuartige Fertigungsmethoden wie der 3D-Druck große Möglichkeiten im Rahmen der geometrischen Freiheitsgrade in der TLP-Herstellung. Mit der simulativen Schüttdichtenoptimierung können ressourcenschonend diese Freiheitsgrade in der TLP-Entwicklung vollumfänglich untersucht werden.

Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer ICT eine simulative Methodik zur Vorhersage der Schüttdichte von TLP entwickelt. Die Simulation basiert auf der Diskrete-Elemente-Methode (DEM), bei der das Verhalten von granularen Materialien als eine Menge einzelner Teilchen bzw. TLP-Körner betrachtet wird. Dies umfasst die Wirkung äußerer Kräfte auf die TLP-Körner sowie deren Wechselwirkungen untereinander.

Ferner können Wechselwirkungen mit dem Ladungsraum und dessen Komponenten, wie beispielsweise dem Treibladungszünder oder Penetrator, berücksichtigt werden. Die geometrischen Formen der TLP-Körner sowie der Komponenten sind hierbei frei wählbar. Darüber hinaus werden Aspekte des Befüllprozesses, wie beispielsweise das Rütteln oder Drehen einer Munitionshülse, berücksichtigt. Dies ermöglicht es, konventionelle extrudierbare sowie mittels 3D-Druck gefertigte TLP-Geometrien (Abb. 1) anwendungsnah zu simulieren und darüber hinaus zu optimieren.

Die Methodik wurde in eine Softwarelösung implementiert und ermöglicht die variable Definition der Prozessparameter, wie zum Beispiel den Massenstrom beim Befüllen und mechanische Eigenschaften des TLP und des Ladungsraums. Im Anschluss werden die TLP-Körner in den Ladungsraum gefüllt und gezählt (Abb. 2). Durch mehrfache Ausführungen der Simulation des

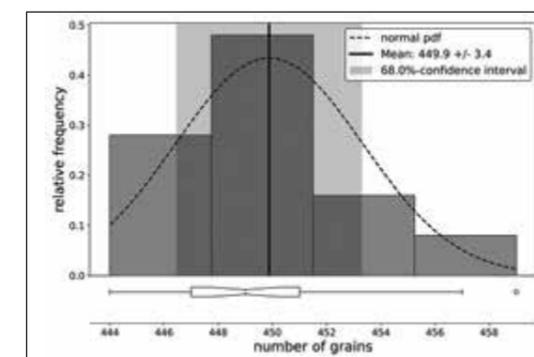


Abb. 3: Statistische Auswertung von 25 Schüttdichtensimulationen unter Verwendung eines zylindrischen Treibladungspulvers

Befüllungsprozesses mit randomisierten Anfangsbedingungen kann eine statistische Verteilungsfunktion der Schüttdichte berechnet werden (Abb. 3).

In einer Beispielstudie zur Leistungssteigerung wurde der Schnittwinkel eines konventionellen siebenfach perforierten zylindrischen TLP-Korns mit einem Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis von 1,5 optimiert. Hierzu wurden Simulationen mit vier verschiedenen Schnittwinkeln zwischen 45 und 90 Grad durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass in diesem Fall der optimale Schnittwinkel im gewählten Parameterraum circa 60 Grad beträgt. Hierbei kann eine Schüttdichtensteigerung von 1,5 % im Vergleich zur geraden Schnittkante (90 Grad) erreicht werden (Abb. 4).

Da die Methode für beliebige Geometrien und Prozessparameter verwendet werden kann, bietet sie Potenzial in der Leistungssteigerung bestehender sowie bei der Entwicklung zukünftiger Rohrwaffenantriebe unter Anwendung neuer und etablierter Fertigungsverfahren.

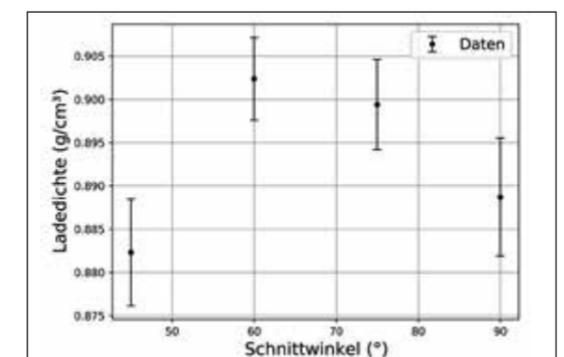


Abb. 4: Resultierende durchschnittliche Ladedichte eines zylindrischen Treibladungspulvers mit variierendem Schnittwinkel

Kunststoffgebundene Treibladungspulver – aktuelle Trends und Fortschritte

Kunststoffgebundene Treibladungspulver (TLP) basieren auf (energetischen) polymeren Bindemitteln. Sie bieten eine Vielzahl positiver Eigenschaften, die für das Erreichen der hohen Anforderungen an moderne TLP notwendig sind. So wurden leistungsstarke Formulierungen mit neuen Weichmachern für die Einstellung der erforderlichen TLP-Mechanik und Verarbeitungseigenschaften entwickelt.

Die Anforderungen an moderne Treibladungspulver (TLP) sind heute hoch und vielfältig. Neben einer hohen Leistung erfordern Treibladungspulver eine große Sicherheit in Versorgung und Verfügbarkeit, eine sichere Langzeitlagerung und Handhabung in den verschiedensten klimatischen Umgebungen in Kombination mit einer geringen Sensitivität gegenüber äußeren Einwirkungen. Daneben rücken ökologische und gesundheitliche Aspekte zunehmend in den Fokus.

Kunststoffgebundene Treibladungspulver bieten viele Möglichkeiten zur Erfüllung dieses komplexen Anforderungsprofils. Sie basieren auf polymeren Bindersystemen und setzen sich meist aus deren Kombination mit Weichmachern und energetischen Füllstoffen zusammen. Ihr Aufbau unterscheidet sich durch den polymeren Binder von dem konventioneller Treibladungspulver, die Nitrocellulose als Bindemittel enthalten und entweder zum Großteil aus dieser Nitrocellulose bestehen (einbasig) oder zusätzlich Sprengöle (zweibasig) und ggf. weitere energetische Füllstoffe (dreibasig) enthalten.



Abb. 1: Kunststoffgebundenes Treibladungspulver in zylindrischer 7-Loch-Geometrie zur Evaluierung neuer Materialien und Formulierungszusammensetzungen, wie zum Beispiel neuer und moderner Nitrat-basierter und Azido-Weichmacher



Abb. 2: Strangpresseextrusion im Technikumsmaßstab am Fraunhofer ICT ermöglicht die Herstellung von Kleinchargen für die TLP-Entwicklung und -Charakterisierung sowie die Bemusterung umfangreicher Beschusskampagnen

Der Einsatz polymerer Bindemittel schafft eine Vielzahl positiver Eigenschaften für die Entwicklung neuer leistungsstarker Treibladungspulver. Synthetische Bindemittel kennzeichnen dabei eine hohe thermische und chemische Stabilität, eine geringe Empfindlichkeit sowie die Unabhängigkeit der Rohstoffversorgung. Insbesondere ermöglicht ihre allgemein gute Materialverträglichkeit den Einsatz neuer Materialien und – zusammen mit dem Vermögen, einen hohen Anteil an Energieträgern aufnehmen zu können – die Entwicklung neuer leistungsstarker TLP-Formulierungen (Abb. 1).

Die Forschung am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT deckt das gesamte Spektrum für die Entwicklung und Auslegung von kunststoffgebundenen Treibladungspulvern vom Rohstoff bis zum Prototyp ab. Insbesondere werden neue polymere Bindermaterialien, Weichmacher und energetische Füllstoffe untersucht. Für die Rohstoffverarbeitung und Formgebung stehen sowohl konventionelle Verfahren, wie Knet-systeme und Strangpressen, als auch innovative Prozesse, wie zentrifugale und akustische Mischsysteme, vom Labor- bis Technikumsmaßstab zur Verfügung (Abb. 2). Hergestellte TLP-Muster werden umfangreich hinsichtlich ihrer Basis-eigenschaften sowie des Abbrandverhaltens, der erzielbaren Leistung und Erosivität charakterisiert.

In aktuellen Arbeiten konnten neue kunststoffgebundene TLP-Formulierungen auf Basis von energetischen Bindemitteln entwickelt werden. Eine Herausforderung ist dabei die Einstellung der mechanischen Eigenschaften über das gesamte Temperaturband von -40 °C bis $+50\text{ °C}$ bei simultan guten Verarbeitungseigenschaften der Formulierung. Dies ist von großer Bedeutung, da somit die Versprödung bzw. Erweichung

bei Extremtemperaturen verhindert wird, was zu Leistungseinbußen und Sicherheitsrisiken führen würde. Üblicherweise geschieht dies durch den Einsatz geeigneter Weichmacher. Es sind zum einen Nitrat-basierte Weichmacher und zum anderen Azido-Weichmacher betrachtet worden, die sich vor allem in kunststoffgebundenen Formulierungen durch deren gute Materialverträglichkeit einsetzen lassen. Die betrachteten energetischen Weichmacher tragen wesentlich zum Erreichen der erforderlichen TLP-Mechanik bei und ermöglichen zudem eine gute Verarbeitbarkeit der Formulierungen für eine hohe Geometrietreue und Qualität (Abb. 3 und Abb. 4). Darüber hinaus erreichen die Formulierungen eine hohe Leistung bei vergleichsweise moderaten Verbrennungstemperaturen und geringer Erosivität, eine gute Langzeitstabilität und geringe Empfindlichkeit.

Künftige Forschung im Bereich kunststoffgebundener TLP wird die weitere Optimierung und Leistungssteigerung der Formulierungen durch den Einsatz neuer energetischer Materialien umfassen. Darüber hinaus sollen Formulierungen für verschiedene Kaliber durch Anpassen der Zusammensetzung adaptiert und getestet werden.

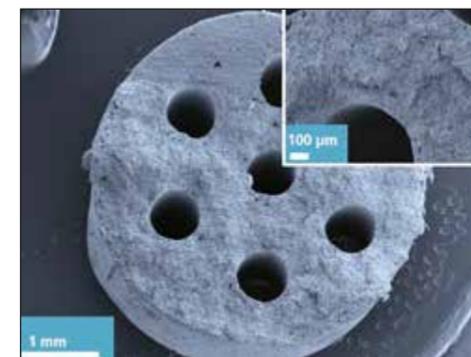


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen eines kunststoffgebundenen Treibladungspulvers in verschiedenen Vergrößerungen: Darstellungen des Kornquerschnitts an einer künstlich erzeugten Bruchfläche, was die gute Herstellungsqualität anhand der nahezu fehlstellenfreien Matrix sowie der homogenen Komponentenverteilung zeigt

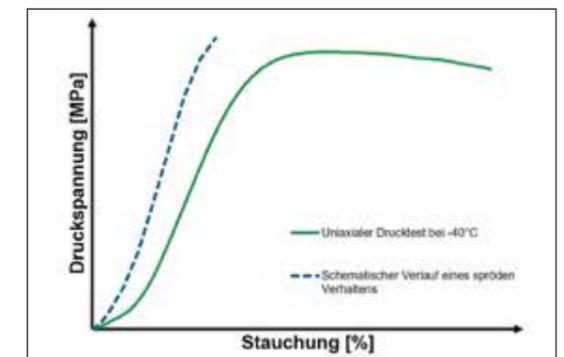


Abb. 4: Druckspannung-Stauchungskurve aus dem uniaxialen Drucktest eines kunststoffgebundenen TLP mit modernem Weichmacher unter Tieftemperaturbedingungen von -40 °C : Das TLP zeigt im uniaxialen Drucktest bei Tieftemperatur eine hohe Festigkeit, aber keine Kaltversprödung (sprödes Verhalten ist zum Vergleich schematisch gezeigt)

Vorbereitende Arbeiten zur Zertifizierung neuer Sensoren für die deutsche Beobachtungsplattform A319 Offener Himmel

Für die Arbeit im Vertrag über den Offenen Himmel erhält das Zentrum für Verifikationsaufgaben der Bundeswehr wissenschaftliche und technische Unterstützung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Im Fokus der Arbeiten steht dabei die Methodenentwicklung für die Verifikation von Eigenschaften abbildender Sensoren, insbesondere im Spektralbereich des thermischen Infrarots.

Der Vertrag über den Offenen Himmel von 1992 erlaubt es seinen 32 Mitgliedsstaaten, gegenseitig ihre Staatsgebiete aus der Luft zu beobachten, und zwar jederzeit, vollständig und kurzfristig. Um das zu ermöglichen, sind im Vertragstext verschiedene Arten von Sensoren vorgesehen: Optische Kameras im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum, Kameras für das thermische Infrarot und abbildende Radare. Damit sollte eine luftgestützte Beobachtung zu allen Tageszeiten und bei jedem Wetter ermöglicht werden.

Bisher sind jedoch nur die Prozeduren und Regeln für die Aufnahme von Bildern im sichtbaren und nahinfraroten Teil des Spektrums festgelegt. Nach diesen Vorgaben wurden im Jahr 2022 neue Kamerasysteme der Mitgliedsstaaten Rumänien und Deutschland zertifiziert und werden seitdem im Rahmen des Vertrages eingesetzt. Allerdings erlauben diese Sensoren nur Aufnahmen bei Tageslicht und unter geeigneten Wetterbedingungen.

In der deutschen Beobachtungsplattform Airbus A319 Offener Himmel (Abb. 1) wurden bereits Sensoren für das Thermische



Abb. 1: Airbus A319 OH im Wärmebild (Thermales Infrarot) während einer Kampagne zur Gewinnung von Testdaten (Quelle: Bundeswehr / Michael Donaubaue)



Abb. 2: Arbeitstreffen mit Sensorexperten mehrerer Vertragsstaaten zur Erarbeitung neuer Prozeduren für den Vertrag über den Offenen Himmel (Quelle: Bundeswehr / Anika Bückendorf)

Infrarot, auch als Wärmebild bekannt, eingebaut. Damit diese Sensoren zukünftig auch für die Arbeit im Vertrag über den Offenen Himmel eingesetzt werden können, müssen die Grundlagen dafür in der Informellen Arbeitsgruppe Sensorik (IWGS) erarbeitet und dann von der Beratungskommission Offener Himmel (OSCC) beschlossen werden. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unterstützt hierbei die Bundeswehr bei der Grundlagenarbeit.

Im Jahr 2024 wurde zusammen mit Vertretern anderer Vertragsstaaten der Entwurf für ein Regelwerk erarbeitet. Darin sind die Prozeduren beschrieben, die es ermöglichen, die Einhaltung der vertraglichen Vorgaben für Bilder im thermischen Infrarot zu prüfen und sicherzustellen. Für die Erstellung dieses Regelwerkes war die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern mit Fachexpertise und Militärangehörigen, die mit den vertraglichen Prozeduren vertraut sind, zwingend notwendig (Abb. 2).

Zusätzlich wurde an der Vereinfachung bestehender Prozeduren gearbeitet. Bedingt durch die lange Lebensdauer des Vertrages und die teils starken Antagonismen einzelner Vertragspartner in der Vergangenheit hat sich ein komplexes Regelwerk mit teils übermäßig komplizierten Regularien entwickelt. Zudem bieten Weiterentwicklungen in der Sensortechnologie die Möglichkeit zur Vereinfachung bestimmter aufwendiger Nachweisführungen.

Konnte für Kameras mit chemischem Film die Auflösung einer bestimmten Kombination aus Objektiv und Filmmaterial nur empirisch ermittelt werden, bietet die aktuelle digitale Sensortechnologie mit ihrer räumlich diskreten Abtastung die Möglichkeit zur Berechnung eines Grenzwertes für die Auflösung des Sensorsystems. Dabei müssen allerdings eine Vielzahl geo-

metrischer Parameter der Aufnahmekonfiguration bekannt sein bzw. gemessen werden. Dafür wurden am DLR Institut für Optische Sensorsysteme Abbildungsgeometrien berechnet und modelliert (Abb. 3).

Aus inhaltlicher Sicht stehen damit der Zertifizierung der Sensorik für thermale Infrarot in der deutschen Beobachtungsplattform A319 OH bei Billigung des neuen Regelwerks durch alle Vertragsstaaten keine Hindernisse mehr im Weg. Auch eine erhebliche Verringerung des Aufwands der Zertifizierung dieser und weiterer neuer Sensoren kann kurzfristig in Prozeduren umgesetzt werden. Mit der notwendigen politischen Unterstützung könnte damit schon 2025 eine deutliche Modernisierung der Arbeit im Vertrag über den Offenen Himmel erreicht werden.

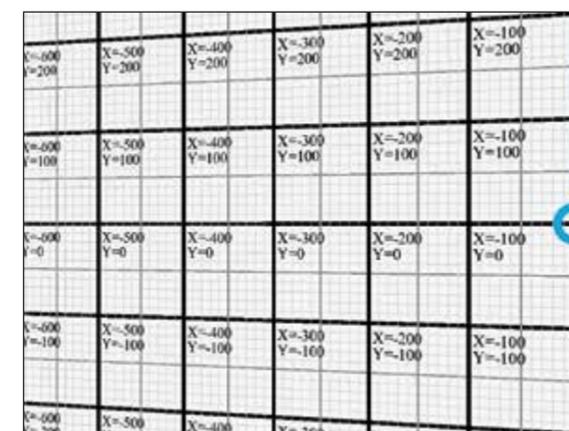


Abb. 3: Projektion des Sensorpixelrasters einer der beiden Thermalkameras des A319 OH auf eine virtuelle Bildebene (Quelle: DLR / Dirk Frommholz)

Dipl.-Phys. Jochen Speiser
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Technische Physik
Stuttgart

info-pds@dlr.de

Dipl.-Ing. Stefan Backfisch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Technische Physik
Lampoldshausen

info-pds@dlr.de

Risikoanalyse für den Einsatz von Laserwaffensystemen – numerische und experimentelle Arbeiten des DLR

Die Bewertung des Risikos durch am Ziel reflektierte und gestreute Laserstrahlung ist unerlässlich für einen regelkonformen Einsatz von Hochenergie-Laserwaffensystemen. Mit der Kombination aus experimentellen Untersuchungen im Labor und auf einer Laserfreistrahlschrecke und der Entwicklung von numerischen Modellen für Expositionswahrscheinlichkeiten werden wichtige Werkzeuge dafür erstellt.

Hochenergie-Laser (HEL) gelten als vielseitige Waffen für ein breites Spektrum von Bedrohungen. In mehreren Ländern, darunter auch Deutschland, hat die technologische Entwicklung einen relevanten Stand erreicht, einschließlich erster HEL-Waffensystemdemonstratoren. Für den zukünftigen Einsatz solcher Systeme sind Risikobewertungen in Übereinstimmung mit den gesetzlichen Bestimmungen und dem humanitären Völkerrecht erforderlich. Die Reflexion und Streuung der HEL-Strahlung am Ziel kann spezifische Risiken für Dritte sowie eigene und verbündete Kräfte schaffen. Daten über die Reflexions- und Streueigenschaften der Laserstrahlung am Ziel – einschließlich der Veränderung dieser Eigenschaften während des Einsatzes – sowie Modelle zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Exposition in gegebenen Szenarien sind für eine zuverlässige Risikobewertung unerlässlich.

In den letzten zehn Jahren wurde eine spezifische Laborinfrastruktur entwickelt, um die erforderlichen Daten zu generieren. In unserem HEL-Wechselwirkungslabor – siehe Abb. 1 – werden Ziele bestrahlt und dabei gleichzeitig die reflektierte Laserleistung mit einem schnellen Leistungssensor und die räumliche



Abb. 1: HEL Wechselwirkungslabor, links: Targetbereich mit Sensoren und Kameras; rechts: Ansicht von der Rückseite, Streuschirm im Hintergrund (Distanz zwischen Schirm und Target 1 m)

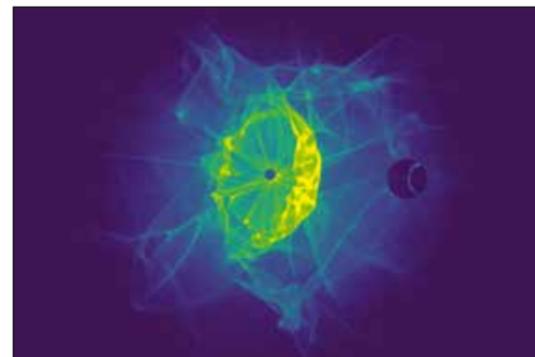


Abb. 2: Falschfarbenplot der auf dem Streuschirm aufgezeichneten Intensität – PMMA nach 500 ms Laserbestrahlung

Verteilung des Streulichts mit einer Kombination aus einem Streuschirm und Hochgeschwindigkeitskameras erfasst. Als Beispiel zeigt Abb. 2 die Lichtverteilung auf dem Schirm während der Laserwirkung an einem PMMA-Target. Darüber hinaus wird auch die Laserwirkung charakterisiert (z. B. Temperaturerhöhung und Durchdringungszeit).

Aktuelle Ergebnisse deuten darauf hin, dass die ausgeprägten und schnell variierenden räumlichen Strukturen (Hot Spots) der Streustrahlung, die bei vielen Materialien beobachtet werden, auf eine Nahfeldzone um das Ziel herum beschränkt sind. Bei größeren Entfernungen sollte der Einfluss der Hot Spots deutlich abnehmen. Um dies zu untersuchen, wurden HEL-Wechselwirkungsexperimente auf der 130 m langen Laserfreistrahlschrecke am DLR-Standort Lampoldshausen durchgeführt (vgl. Abb. 3).

Insbesondere wurden spezielle Sensoren mit hoher Empfindlichkeit entwickelt, um Streustrahlung in großer Entfernung vom Ziel zu messen. Kürzlich wurde mit neuartigen Tests begonnen, bei denen ein Streuschirm in 20 m Abstand auf der Freistrahlschrecke aufgestellt wurde.

Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurden numerische Modelle zur Berechnung der Gefahrenbereiche entwickelt. Da weder die genaue Position, Bewegung und Ausrichtung des Ziels noch der genaue Auftreffpunkt des Laserstrahls auf dem Ziel für ein Einsatzszenario vorhergesagt werden können, sind statistische Überlegungen erforderlich. Auf der Grundlage der Berechnung zahlreicher Zielbahnen und Auftreffpunkte („Realisierungen“) kann die Wahrscheinlichkeit der Exposition mit gefährlichen Strahlungswerten analysiert werden.



Abb. 3: Test eines Sensors auf der Laserfreistrahlschrecke (Positionseinstellung mit einem grünen Laser)

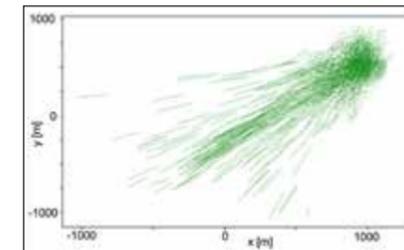


Abb. 4: Gefährdungs- und Risikoanalyse-Modell – räumliche Verteilung der „relevanten Bereiche“ für 2000 „Realisierungen“ eines bestimmten Szenarios

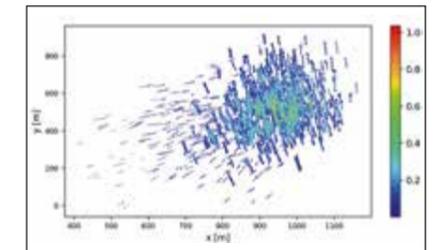


Abb. 5: Gefährdungs- und Risikoanalyse-Modell – lokale Wahrscheinlichkeit der Exposition mit gefährlichen Strahlungswerten für 2000 „Realisierungen“ eines bestimmten Szenarios, farbcodiert nach Wahrscheinlichkeit in Prozent

Um eine große Anzahl von „Realisierungen“ berechnen zu können, müssen die numerischen Modelle sehr effizient sein. Dies wird in erster Linie durch die Aufbereitung der experimentellen Daten (Datenreduktion) erreicht. Der Verlust an Komplexität der Eingabedaten wird durch die Mittelwertbildung der statistischen Methodik gemildert. Zusätzlich ist eine schnelle Identifizierung von „relevanten Bereichen“ für detailliertere Berechnungen implementiert (vgl. Abb. 4 und 5).

Erste Ergebnisse zeigen, dass bei hohen (d. h. fliegenden) Zielen mit realistischen Oberflächeneigenschaften (z. B. Krümmung) die „Gefahrenbereiche“ am Boden recht klein sein können und sogar verschwinden, sobald sich das Ziel in ausreichender Höhe befindet. Entsprechend gering fallen auch die Expositionswahrscheinlichkeiten aus. Um diese erste Einschätzung zu untermauern, müssen zusätzliche experimentelle Daten erfasst und eine größere Anzahl von Einsatzszenarien analysiert werden. Dieser duale Ansatz, der auf Experimenten und Simulationen basiert, soll die Akzeptanz und das Vertrauen in die Risikoanalyse bei allen Beteiligten fördern.

Stefan May, M.Sc.
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Responsive Space Cluster Competence Center (RSC³)
Faßberg

rs-info@dlr.de

Nora M. Riedel, M.Sc.
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Responsive Space Cluster Competence Center (RSC³)
Faßberg

rs-info@dlr.de

Mobiles, flexibles Lager- und Betankungssystem für die reaktionsschnelle Versorgung von Raketenstufen und Nutzlasten mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid

Wasserstoffperoxid gewinnt als Treibstoff in der Raumfahrt zunehmend an Bedeutung. Um dieser Entwicklung gerecht zu werden und eine sichere, zuverlässige Versorgung von Systemen auch an kleineren Startplätzen zu ermöglichen, hat das RSC³ des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR das mobile, schnell einsetzbare Transport-, Lager- und Versorgungssystem „MoHyPer“ entwickelt.

Die Nachfrage nach einem kostengünstigeren Zugang zum Weltraum hat sich in den letzten Jahren stetig beschleunigt. In der Folge werden weltweit zahlreiche neue Startplätze für Raumtransportsysteme geplant und geschaffen. Insbesondere der Einschuss in polare Umlaufbahnen, welche häufig von Micro-Launchern bedient werden, erfordert Startplätze in höheren Breitengraden, wodurch sich das Spektrum der möglichen Standorte deutlich erweitert hat. Die zunehmenden Startaktivitäten verstärken jedoch auch Bedenken über mögliche Auswirkungen der Raumfahrt auf die Umwelt, was zu einem Anstieg der Forschung im Bereich umweltfreundlicher Treibstoffe geführt hat.

Hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid (engl. high-test peroxide: HTP) gilt als vielversprechende umweltfreundliche Treibstoffalternative für den Einsatz in Raketenoberstufen sowie bei orbitalen Anwendungen. Es ist katalytisch zersetzbar und bei seiner chemischen Umsetzung entstehen lediglich Wasserdampf und Sauerstoff als Reaktionsprodukte. Zudem ist es weder giftig noch krebserregend und ist bei Raumtemperatur flüssig, wodurch die Handhabung im Vergleich zu herkömm-



Abb. 1: Das Mobile Wasserstoffperoxid Transport- und Lagersystem „MoHyPer“



Abb. 2: Im MoHyPer integrierte Reinstwasseranlage

lichen, oft kryogenen Treibstoffen deutlich einfacher und kostengünstiger ist. Der Einsatz beispielsweise in Hybridtriebwerken ermöglicht eine inhärente Wiederzündfähigkeit und eine gute Schubdrosselung über einen großen Einsatzbereich. Aber auch die Verwendung von HTP in Lageregelungs- und Satellittriebwerken, unter anderem als Substitut für das karzinogene Hydrazin, rückt durch sich zunehmend verschärfende Umweltauflagen immer weiter in den Fokus wissenschaftlicher Forschung und kommerzieller Anbieter. Dennoch fehlt den meisten der derzeitigen Startplätzen eine zuverlässige und sichere Infrastruktur für die Durchführung von Starts bei denen HTP benötigt wird.

Der „Mobile Hydrogen Peroxide Transport and Storage Container“ (MoHyPer), welcher vom „Responsive Space Cluster Competence Center“ (RSC³) des DLR entwickelt wurde, soll diese Lücke schließen (Abb. 1). Das in einen Standard 20-Fuß-High-Cube-Container integrierte System dient dem sicheren Transport sowie der Lagerung von HTP und bietet zudem die Möglichkeit zur gefahrlosen Betankung und, bei Bedarf, Bedrückung von Raketenstufen und Nutzlasten. Zur Ausrüstung gehören u. a. Heiz- und Kühlsysteme, Überdrucksicherungen, Sicherheits- und Notfalleinrichtungen sowie ein Überwachungssystem. Dabei ist das MoHyPer thermisch isoliert und vollständig fernsteuerbar. Das HTP selbst wird in fünf, von der Firma EVONIK patentierten, Tanks mit jeweils 220 Litern Fassungsvermögen gelagert und transportiert. Das MoHyPer ist für den Land-, See- und Bahntransport zertifiziert.

Es vereint folgende Eigenschaften:

- Transport und Lagerung von bis zu 1100 Liter HTP (klimatisiert und fernüberwachbar)



Abb. 3: Technikraum des MoHyPer

- Reinstwasserbereitstellung mittels integriertem Aufbereitungssystem (Abb. 2)
- Fernsteuerbare Oxidatorbetankung durch integriertes Pump- und Leitungssystem
- Fernsteuerbare Hochdruckversorgung für Druckförderungs-systeme mit Inertgasen bis 1000 bar
- Bereitstellung notwendiger Sicherheitseinrichtungen (z. B. Notdusche, Notfallfassflutung).

Der Innenraum des Containers ist in zwei Bereiche geteilt, um die notwendigen Voraussetzungen zur stabilen Lagerung und sicheren Handhabung des HTP zu gewährleisten (Tankraum) und zudem die erforderlichen technischen Anlagen unterzubringen (Technikraum, Abb. 3). Am Betriebsort ist somit lediglich eine externe Versorgung mit Strom, Wasser von beliebiger Qualität sowie ggf. benötigter Gase erforderlich. Aufgrund der integrierten Systeme und Fähigkeiten, kombiniert mit den geringen Systemanforderungen ermöglicht das MoHyPer den zuverlässigen, reaktionsschnellen, flexiblen und sicheren Betrieb von mit Wasserstoffperoxid betriebenen Raketenstufen und Nutzlasten an beliebigen Startplätzen weltweit.

Sven Friedrich
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Wanja Zaeske
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Info-pds@dlr.de

Info-pds@dlr.de

Konzeptentwicklung für Software Defined Aircraft mit Integrated Serverless Avionics (ISLA): DLR-Ansatz für die nächste Generation von Integrierter Modularer Avionik

Die Zukunft der Avionik erfordert Systeme, welche dynamisch auf Fehler reagieren und sich passend dazu adaptieren können. Hierfür ermöglicht ein Umschwung zu dem sogenannten Serverless Paradigma, Applikationen unabhängig von der Hardware zu entwickeln. Erleichterte Migration und Wiederverwendung sowie verringerter Zulassungsaufwand der Applikationen sind die Folge.

Die Erforschung von Resilienzsteigerung durch Laufzeit-Adaptierung von Integrierter Modularer Avionik (IMA) geht mit D-RESILIENZ in die zweite Runde. Zielsetzung ist nach wie vor, dass On-Board Software in der Avionik widerstandsfähiger gemacht wird. Historisch lag der Fokus hierzu vor allem auf dem Entwicklungsprozess, d. h. man hat Software so robust und sicher entwickelt wie (unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten) möglich und dann nach umfassendem Test ausgeliefert. Mit der stark wachsenden Menge an Software, welche sich in modernen IMA-Systeme findet, stößt dieser Ansatz aber an seine Grenzen: auch unter striktestem Qualitätsmanagement (Abb. 1, Aufgabe 2) bleiben, statistisch betrachtet, einige Fehler unentdeckt. Da aber aktuelle Avionik-Systeme heute Millionen an Zeilen Software enthalten, finden mehr und mehr Fehler ihren Weg ins Flugzeug.

Eine weitere Steigerung des Entwicklungsaufwandes droht aber, die Softwareentwicklung in der Avionik gänzlich zum Erliegen zu bringen. Deshalb verfolgen wir in D-RESILIENZ einen komplementären Ansatz: Laufzeit-Fehler-Adaptierung. Damit ist gemeint, dass Fehler zur Laufzeit, z. B. durch intelli-

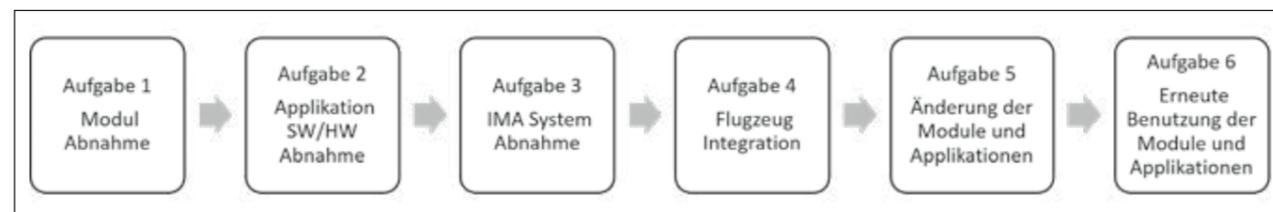


Abb. 1: Lebenszyklus und Zertifizierung von Modulen/Applikationen in Integrierter Modularer Avionik (IMA)

apl. Prof. Dr.-Ing. Umut Durak
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Info-pds@dlr.de

gentes Monitoring, detektiert werden. Die erkannten Fehler werden dann mit gezielten Mitigationsstrategien behandelt, abgeschwächt oder isoliert. Kurz gesagt: Obwohl weiterhin im Entwicklungsprozess großer Aufwand in die Fehlervermeidung gesteckt wird, wird die Software besser für das Auftreten von Fehlern während des Betriebs gerüstet.

Traditionelle Avionik-Software ist sehr starr, z. B. ist die Zuteilung, auf welchem Computer eine Applikation ausgeführt wird, fest zugeordnet. Das erleichtert den Entwurf (Abb. 1, Aufgabe 1), da der Möglichkeitenraum für Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Applikationen eingeschränkt wird. Gleichzeitig beschränkt dies aber auch die Freiheitsgrade für eine Laufzeit-Fehler-Adaptierung. Der Konflikt ist also: Ein starres System ist leichter zu entwerfen und abzusichern, aber ein dynamisches System hat viel mehr Spielraum, um zur Laufzeit mit Fehlern umzugehen.

In D-RESILIENZ greifen wir diese falsche Dichotomie mit dem Serverless Paradigma an. Unter Serverless versteht man nicht etwa, dass keine Server (oder Computer) benutzt werden, sondern dass es für die Software weitgehend egal ist, wo sich diese befinden, oder wie viele es sind. Genau diese Entkopplung ist, was Serverless-Architekturen sehr skalierbar und herausragend robust macht. Solange noch hinreichend viele

Computer laufen, findet die Plattform eine Lösung, die Software auszuführen. Genau diese Eigenschaft nutzen wir in D-RESILIENZ, um nicht trotz, sondern durch eine dynamische Zuteilung von Software auf Computer einen robusteren, Fehler-toleranteren Betrieb zu ermöglichen.

Ein weiterer Vorteil der Entkopplung von Software und Hardware ist, dass Portierungen erheblich einfacher werden. In einem gewöhnlichen IMA-System werden Applikationen ausgeführt, welche eigens für ihre Zielhardware kompiliert wurde (vgl. Abb. 2). Dies ermöglicht zwar die Ausführung auf Systemen mit similärer Hardware, erfordert jedoch eine erneute Kompilierung und somit wiederholte Zulassungsaufwände für andere Hardwarearchitekturen. Mit unserer Serverless-Plattform hingegen (Abb. 3) erhalten wir die Möglichkeit, Applikationen losgelöst von der zugrundeliegenden Hardware auszuführen (Stärkung von Abb. 1, Aufgabe 6). So können Kosten für die Entwicklung neuer Luftfahrzeuge gespart werden, Portierung von existierender Software wird stark vereinfacht.

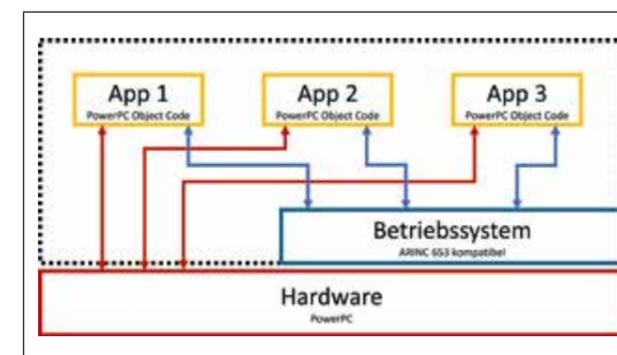


Abb. 2: Beispielhaftes IMA-System mit drei Applikationen, welche eng an das Betriebssystem und die darunterliegende Hardware gekoppelt sind

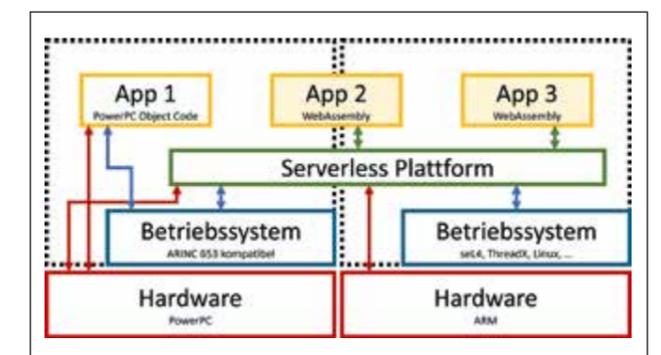


Abb. 3: Beispielhaftes Serverless-System mit einer Serverless-Plattform als Abstraktionsschicht zwischen Applikationen und Betriebssystem

Dr. Markus Peichl
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

info-pds@dlr.de

Prof. Dr. Kai Bongs
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Quantentechnologien
Ulm

info-pds@dlr.de

Verbesserung von Systemen zur Mikrowellenfernerkundung mit Quantensensorik

Im Institut für Quantentechnologien des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR wird unter anderem anwendungsorientierte Forschung betrieben, um zusammen mit dem DLR Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme quantenmechanische Effekte und Vorhersagen in konkrete Bauteile bzw. Systeme für die Mikrowellenfernerkundung umzusetzen. Dabei sind primär hochgenaue Uhren bzw. Zeit- und Frequenznormale neben neuartiger Empfängertechnologie von größtem Interesse.

Die Quantentechnologie verspricht zukünftige technologische Performanz-Steigerungen in vieler Hinsicht und in der Mikrowellenfernerkundung wird das Quantenradar viel diskutiert. In seinem BMBF-Projekt QUARATE konnte das Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme aber zeigen, dass für das Quantenradar nur ein recht limitierter Nutzen in absehbarer Zeit möglich sein wird (Abb. 1).

Prinzipielle quantenmechanische Gegebenheiten, die nach wie vor notwendige Kryo-Umgebung und erreichbare Qualität der Schaltkreise verbieten noch die praktische Anwendung für moderne Radare. Ungeachtet dessen scheint es in absehbarer Zeit möglich zu sein, a) Uhren bzw. Zeit- oder Frequenznormale mit bisher unerreichter Genauigkeit basierend auf Quantentechnologien zu entwickeln. Daneben könnten b) auch im Bereich von Mikrowellenempfängern neue Einsatzszenarien durch sogenannte Rydberg-Sensoren möglich sein.

Applikation a) wird z. B. benötigt, wenn moderne Radare eine Vielzahl räumlich weit voneinander getrennter Sender und Empfänger benutzen. Anwendung b) wäre für rein passiv ab-

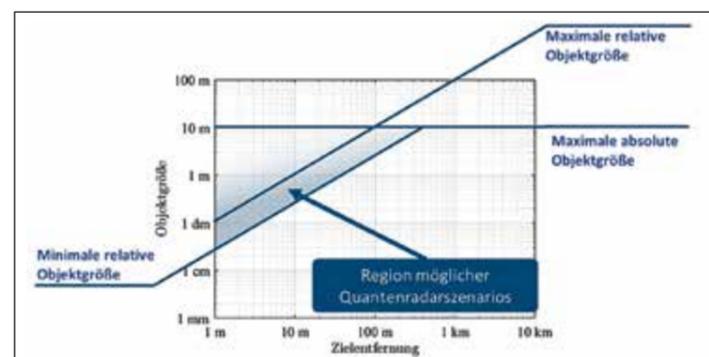


Abb. 1: Eingrenzung möglicher Anwendungsszenarios für ein Quantenradar, mit dem auch nur eine Verbesserung im Signal-zu-Rausch-Verhältnis um einen Faktor < 2 möglich ist

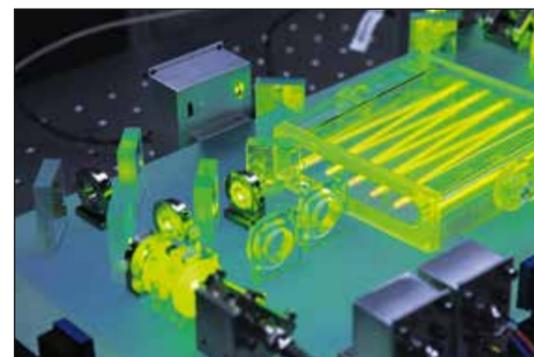


Abb. 2: Fotografie eines optischen Frequenzstandards

PD Dr. Christian Brand
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Quantentechnologien
Ulm

info-pds@dlr.de

Prof. Dr. Claus Braxmaier
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Quantentechnologien
Ulm

info-pds@dlr.de

bildende Überwachungs- und Aufklärungssensoren im Mikrowellenbereich (Radiometersysteme) von großem Interesse, weil damit der technische Aufwand ggf. drastisch reduziert werden könnte.

Das Institut für Quantentechnologien des DLR hat einen Quanten-Frequenzstandard entwickelt, der zur Weltspitze der optischen Uhren auf Dampfzellenbasis gehört. Das Team hat mit neuen Ideen zur bewegungsunempfindlichen Spektroskopie an Jod-Molekülen eine Voraussetzung für höchste Präzision beim Einsatz auf bewegten Plattformen gelegt. Die im Labor erzielte Frequenzstabilität übertrifft die besten kommerziellen Atomuhren im relevanten Bereich um zwei Größenordnungen und verspricht damit einen Durchbruch in der phasengenauen Synchronisation von räumlich weit verteilten Fernerkundungssystemen, der für deren Realisierung entscheidende Vorteile verspricht bzw. diese überhaupt erst ermöglicht. Zusätzlich wurde ein verbessertes Phasenrauschen im Vergleich zu typischen Radaroszillatoren demonstriert.

Dies eröffnet Perspektiven für ein erhöhtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei der Detektion und Identifikation von Objekten sowie bei hochqualitativen Abbildungen mit klassischer Radartechnik (kein Quantenradar).

Ferner werden aktuell Experimente zur Forschung an neu-

artigen Sensoren basierend auf sogenannten Rydberg-Atomen aufgebaut. Diese ebenfalls quantenbasierte Technologie verspricht in bestimmten Fällen eine gesteigerte Empfindlichkeit gegenüber klassischen Prinzipien, neben der Möglichkeit auch Absolutwerte mit höchster Genauigkeit zu bestimmen. Diese Vorteile könnten bei rein passiven mikrowellenbasierten Messsystemen wie abbildenden Radiometern oder sogenannten Passiv-Radaren neben gesteigerter Empfindlichkeit auch den schaltungstechnischen Aufwand reduzieren. Rein passive Systeme sind im Gegensatz zum Radar anhand der fehlenden Eigenemission nicht ortbar.

Nach mittlerweile mehr als hundert Jahren Existenz erfreut sich heute die Quantenmechanik in einem großen Umbruch von der reinen Theorie hin zur konkreten Anwendung. Ein breites Anwendungsfeld können mikrowellenbasierte Fernerkundungssysteme zur Detektion, Aufklärung und Überwachung sein, wofür die Potenziale im wehrtechnischen Kontext in den nächsten Jahren weiter ausgelotet werden sollen.



Abb. 3: Beispiel einer radiometrischen Abbildung im Frequenzbereich 80 – 100 GHz mittels klassischer Scanner- und Empfängertechnologie (links). Rydberg-Sensoren könnten hierfür zur deutlichen Performanzsteigerung Verwendung finden. Radiometrische Aufnahmen ähneln in der Interpretierbarkeit optischen Bildern (rechts) und sind auch bei widrigen Sichtverhältnissen möglich

Dr. Markus Peichl
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

Info-pds@dlr.de

Dr. Simon Anger
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

Info-pds@dlr.de

Synergie bewährter Technologien und zukunftsweisender Konzepte zur fortschrittlichen Weltraumlagebeobachtung

Der Weltraumlageerfassung wird zukünftig eine essentielle Aufgabe für die Sicherheit Deutschlands und Europas zukommen. Neue, deutlich leistungsfähigere Technologien sind dafür notwendig. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR betreibt hierzu exklusive Radarforschung, um mit innovativen Methoden Lösungen für die Zukunft bereitzustellen. Bewährte und neuartige Technologien werden vereint.

Die Nutzung des Weltraums, insbesondere im erdnahen Bereich bis ca. 2000 km Zenit-Abstand von der Erdoberfläche, hat in der letzten Dekade nahezu exponentiell zugenommen, Tendenz weiter steigend. Dieser Umstand erfordert deutlich erweiterte und verbesserte Fähigkeiten der Weltraumlageerfassung (engl. Space Situational Awareness – SSA) sowohl in der räumlichen als auch zeitlichen Dimension. Abbildende Radartechnologie stellt dafür einen essentiellen Grundbaustein dar. Weltweit gibt es dazu bereits seit Jahrzehnten einige wenige bodengebundene hoch performante Einzelsysteme mit sehr großen Antennen von etwa 30 – 40 m Durchmesser, um eine hohe Abbildungsqualität sicherzustellen.

Die SSA benötigt bereits heute und insbesondere auch in der fernerer Zukunft einen Quantensprung in ihren Fähigkeiten. Gründe hierfür sind vielfältig – zunächst die enorme Zunahme von Weltraumobjekten, sowohl aktiv betriebene Systeme wie z. B. Satelliten, als auch Weltraumschrott in Größen von Millimetern wie z. B. Explosionsrückstände oder auch viele Meter in Form von ausgebrannten Raketenstufen oder nicht mehr genutzten Satelliten. Ferner ist der Umstand, dass heutzutage



Abb. 1: IoSiS-Radaranlage am DLR-Standort Weilheim in Oberbayern. Die mittelgroße Antenne wird für das Senden, die beiden seitlich angebrachten kleinen Antennen werden für das Empfangen verwendet

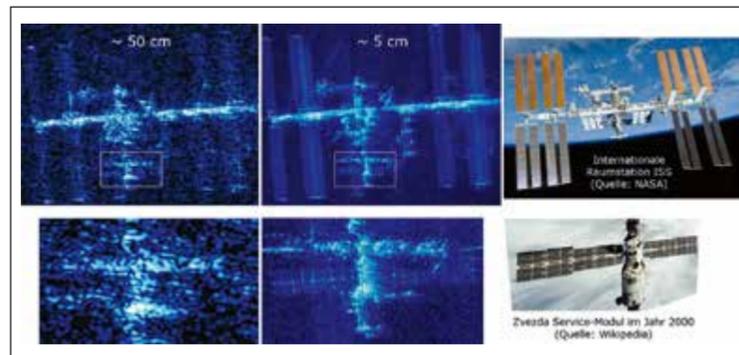


Abb. 2: IoSiS-Radarbilder der ISS aus dem Jahr 2021 für verschiedene räumliche Auflösungen. Untere Bilder zeigen vergrößerten weiß eingerahmten Ausschnitt

nahezu alle Nationen über Weltraumtechnologie verfügen und vielfach auch Verbringungs-fähigkeit haben, ein prägender Treiber. Die neue geopolitische Lage wird neue massive Bedrohungspotenziale entstehen lassen.

Das DLR erforscht Konzepte für eine neuartige hoch performante radarbasierte SSA-Fähigkeit und hat für experimentelle Zwecke in der vergangenen Dekade das abbildende X-Band-Radarsystem IoSiS (Engl. Imaging of Satellites in Space) bei 10 GHz aufgebaut und betrieben (Abb. 1). Mit einer räumlichen Auflösung von derzeit bis zu 5 cm ist gemäß bekannter Literatur ein weltweiter Spitzenwert in dieser Hinsicht erreicht worden (Abb. 2). Mit Hilfe solcher Bilder lassen sich z. B. funktionale Aspekte als auch kleinste Veränderungen eines Weltraumobjekts erkennen. Das zweidimensionale Radarbild zeigt in der oberen Bildhälfte der Vergrößerung eine waagrecht verlaufende Signatur, die in der Fotografie von 2000 noch nicht vorhanden ist. Ohne Kenntnis des ISS-Aufbaus könnte daraus aber keine dreidimensionale (3D) Bauform, wie sie real vorliegt, abgeleitet werden. Dafür wurde unter anderem das Konzept IoSiS-Fu (Future) entwickelt (Abb. 3).

Mit dieser neuartigen Technologie sind revolutionäre Neuerungen in der Radar-SSA mit exklusiven Vorteilen gegenüber der Großantennen-Lösung möglich: 3D- und multi-statische Signaturaufnahmen bei sehr kurzer Abbildungszeit und gleichzeitig ultrahoher räumlicher Auflösung bis 2 cm, kleine Einzelbaugrößen und dadurch Möglichkeit der kontinuierlichen Modernisierung und Performanzsteigerung, schwere Störbar- und Zerstörbarkeit, dynamische (auch mobile) Skalierung je nach Bedarf. Der dadurch generierte Informationsgehalt öffnet eine neue Dimension in der erdgebundenen radarbasierten SSA.

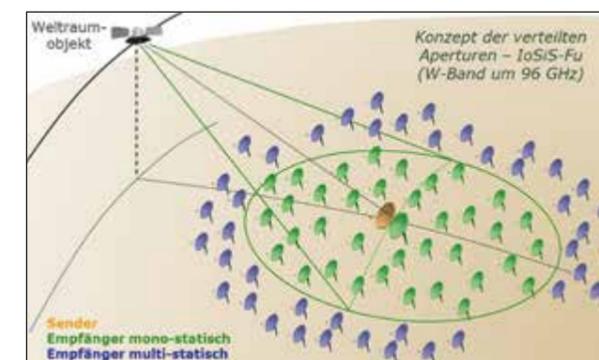


Abb. 3: Funktionsweise von IoSiS-Fu – ein mittelgroßer Sender und viele räumlich verteilte sehr kleine Empfänger erlauben mono-statische (wenige zehn Kilometer Durchmesser) und multi-statische (einige zehn Kilometer Durchmesser) 3D-Abbildungen. Der Übergang zwischen beiden Eigenschaften ist nicht scharf, sondern fließend zu verstehen

Untersuchungen zu weltraumbasierten SSA-Radarlösungen sind dabei natürlich auch in Betracht zu ziehen. Bei genauere Analyse jedoch zeigt sich, dass dieses Konzept in weltraumbasierter Form eine äußerst aufwändige Technologie und ein herausforderndes Betriebsmanagement benötigen wird. Je nach gewünschter Reichweite der einzelnen Systeme sind eine Vielzahl von Satelliten in z. B. Waschmaschinengröße notwendig, um eine brauchbare Performanz im Zugriff auf interessierende Objekte zu haben.

Eine hinreichend große Sendeleistung für hochqualitative Radare ist unabdingbar. Bestrebungen, hierfür Leistungen im zwei- bis dreistelligen Kilowatt-Bereich durch moderne Halbleitertechnologie zu realisieren, gestalten sich bei höheren Frequenzen sehr schwierig und nachteilig. Neue Entwicklungen basierend auf bewährter Röhrenverstärkertechnologie sind daher die Wahl. Forschung und Entwicklung für IoSiS-Fu sind eine Herausforderung, die aber lösbar ist. Eine neue Basis-Antennenanlage befindet sich gerade in der Planung.

Hptm Niclas Mägerlein, M.Sc.
Helmut-Schmidt-Universität,
Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

Christopher Lange, M.Sc.
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Marina Seidl, PhD
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Reaktive Strukturmaterialien (RSM) – Fortschritte in der Erforschung von Energiefreisetzung und Fragmentierungsverhalten

Reaktive Strukturmaterialien (RSM) kombinieren hohe mechanische Festigkeit mit der Fähigkeit, unter äußeren Einflüssen chemische Energie freizusetzen. Im Rahmen der Kooperation zwischen dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) und der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU/UniBw H) wurden Fortschritte bei der Erforschung von RSM erzielt. Experimente zeigen die Korrelation zwischen Fragmentierung, Energiefreisetzung und Geschwindigkeit.

Reaktive Strukturmaterialien umfassen ein breites Spektrum von Materialien, die unter externen Einflüssen, wie Temperatur oder Impakt, chemische Energie freisetzen und gleichzeitig eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen. Diese Eigenschaften bieten das Potenzial, den Kampfwert herkömmlicher Gefechtsköpfe, Munition oder Schutzsysteme signifikant zu steigern, indem inerte Materialien durch RSM ersetzt werden. Dennoch sind die genauen Mechanismen, die zur Energiefreigabe führen, bisher nicht vollständig geklärt. Eine fundierte Erforschung dieser Mechanismen ist essenziell, um das volle Potenzial von RSM auszuschöpfen und bestehende Kampfsysteme zu optimieren.

Durch die enge Kooperation zwischen dem ISL und der HSU/UniBw H wird eine umfassende Forschungsgrundlage geschaffen. Das ISL bringt seine Expertise in den Bereichen Ballistik und Materialverhalten bei hochdynamischen Prozessen ein. Die HSU ergänzt dies mit ihrer analytischen und theoretischen Kompetenz, insbesondere durch den Einsatz von Computertomographie und Simulationen und trägt so zum Verständnis der Reaktionsmechanismen auf unterschiedlichen Größenskalen bei.

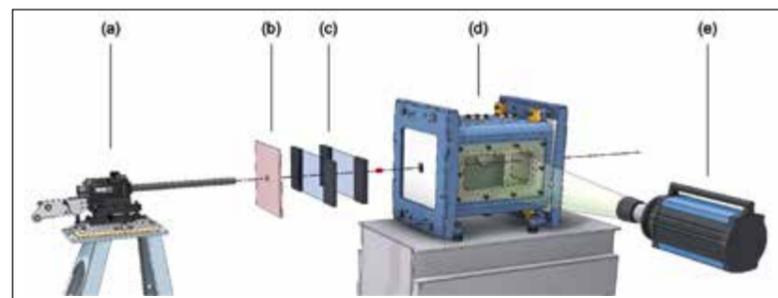


Abb. 1: Versuchsstand am ISL mit gleichzeitiger Messung von quantitativen Reaktionswerten mittels Druckkammer und Aufnahme von Flug- und Impaktbedingungen. Dargestellt sind die Pulverkanone (a), der Sabot-Stripper (b), die Lichtschranke (c), die Druckkammer (d) und die Hochgeschwindigkeitskamera (e)

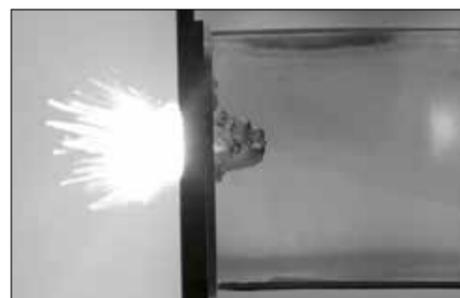


Abb. 2: Hochgeschwindigkeitsaufnahme vom Durchtritt eines Fragmentsurrogats durch eine Platte aus Aluminium von links nach rechts. Hinter der Zielplatte werden Fragmente von dem Soft-Catch Medium aufgefangen. Zu erkennen ist die Energiefreisetzung während der Perforation

Dr. rer. nat. Roman Wölbing
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Die ballistischen Labore des ISL ermöglichen die detaillierte Untersuchung des endballistischen Verhaltens von RSM unter kontrollierten Bedingungen. Mit Pulver-, Gas- und Schienenkanonen wird ein breites Geschwindigkeitsprofil abgedeckt, das unterschiedliche Einsatzszenarien simuliert. In ersten Versuchen konnte mithilfe einer eigens entwickelten Druckkammer die Geschwindigkeitsschwelle identifiziert werden, ab der die Energiefreigabe von RSM signifikant ansteigt (s. Abb. 1). Spektroskopische Analysen der entstehenden Reaktionsspezies liefern wertvolle Erkenntnisse über die chemischen Prozesse, die während des Impakts ablaufen.

Ein wesentlicher Anteil der freigesetzten Energie beruht auf Oxidationsprozessen während des Impakts. Um diesen Prozess genauer zu untersuchen, wurde das Fragmentierungsverhalten von RSM analysiert. Dazu wurden RSM-Fragmentsurrogate verwendet, um Zielmaterialien zu durchdringen (s. Abb. 2). Die resultierenden Fragmente wurden mithilfe eines Soft-Catch Mediums auf unterschiedlichen Distanzen aufgefangen. Dieser experimentelle Aufbau erlaubt es, die Größenverteilung der Fragmente in Abhängigkeit von der Verbrennung zu bestimmen.

Die Analyse der Fragmentverteilung erfolgte mit Computertomographie-Anlagen am Lehrstuhl für Computational Material Design (CMD) der HSU/UniBw H. Erste Ergebnisse deuten



Abb. 3: Resultierende 3D-Rekonstruktion nach Messung der Fragmente in der Computertomographie-Anlage. In Grau das Soft-Catch Medium und von Gelb nach Schwarz Fragmente mit zunehmendem Volumen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Denis Kramer
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

Forschungsbuero@hsu-hh.de

auf eine Korrelation zwischen dem Grad der Fragmentierung und der Energiefreigabe in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit hin (s. Abb. 3 und 4).

Am CMD-Lehrstuhl wurden mithilfe von quantenchemischen Modellierungen und Molekulardynamik-Simulationen die Reaktionsmechanismen auf atomarer Ebene untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass spezifische Dehnungszustände, die während eines Impakts auftreten, die Energiefreigabe begünstigen. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung von Modellen zur Beschreibung des Reaktionsverhaltens von RSM.

Die gewonnenen experimentellen und simulativen Ergebnisse sowie die entwickelten Methoden ermöglichen es, erste Mechanismen des Reaktionsverhaltens von RSM zu identifizieren. Diese Erkenntnisse tragen dazu bei, bestehende Modelle anzupassen und weiterzuentwickeln. Das langfristige Ziel besteht in einem ganzheitlichen Verständnis des Materialverhaltens, um eine signifikante Kampfwertsteigerung bestehender Systeme zu erreichen.

Die Arbeiten werden durch die Grundfinanzierung, amtsseitige Zusatzfinanzierung sowie nationale und internationale Kooperationen ermöglicht.

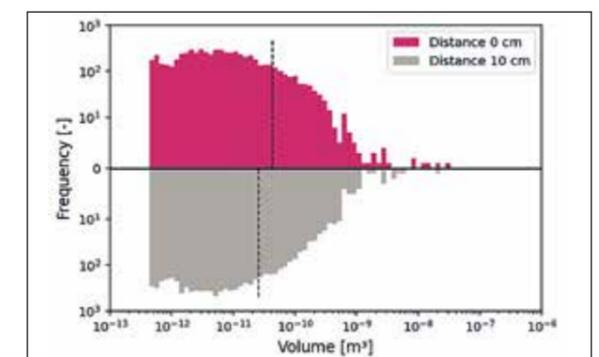


Abb. 4: Fragmentverteilung von Auermetall nach Impakt bei 1400 m/s. Die Fragmente wurden bei 0 cm und 10 cm hinter der Zielplatte aufgefangen

Armin Schneider
 Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
 Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr. Nabil Jardak
 Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
 Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Widerstandsfähiges und intelligentes GNSS – ein Praxistest

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) sind zunehmend gezielten Störungen ausgesetzt. Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, bedarf es einer umfassenden Evaluierung von Anti-Jamming-Technologien unter realitätsnahen Bedingungen. Jammertest 2024 in Norwegen war eine ausgezeichnete Gelegenheit, um zwei GNSS-Störerschutzsysteme für Lenkflugkörper in einer kontrollierten Außenumgebung zu testen.

Jammertests 2024 in Norwegen bot die Gelegenheit, die Resilienz von GNSS-Systemen gegenüber diversen Störungsbedrohungen, wie etwa Jamming, Meaconing und Spoofing, zu evaluieren. Im Rahmen dieses Feldtests, der unter realen Bedingungen im Freien durchgeführt wurde, wurden zwei Anti-Jamming-Systeme untersucht, die zur Reduzierung von Signalstörungen in den oberen GNSS-Bändern (L1, E1, B1 und G1) konzipiert wurden. Der erste Ansatz verwendet ein Echtzeit-Signalverarbeitungssystem (FPGA) mit digitalen Filtern zur Unterdrückung von Schmalband-Interferenzen. Der zweite Ansatz nutzt die räumliche Filterung durch ein adaptives Antennensystem, wobei Null-Steuerungstechniken eingesetzt werden, um Störungen aus beliebigen Richtungen zu unterbinden, während die echten GNSS-Signale erhalten bleiben.

Die Tests wurden in einem speziell dafür vorgesehenen Gebiet durchgeführt, in dem Störungen der GNSS-Signale gezielt erzeugt wurden, um kontrollierte und wiederholbare Bedingungen sicherzustellen. Bei den Tests wurden GNSS-Empfänger, sowohl mit als auch ohne Anti-Jamming-System, unter iden-



Abb. 1: Die beiden ISL GNSS-Systeme auf dem Versuchsgelände. Die high-power Jammer befinden sich auf der Bergkette in 1,5 km Entfernung

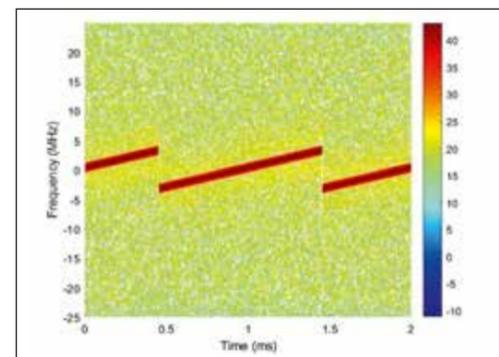


Abb. 2: Spektrogramm eines aufgezeichneten Signals: Jammer und GNSS L1

Quentin Jault
 Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
 Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Faisal Saada
 Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
 Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

tischen Bedingungen evaluiert. Eine Referenz-GNSS-Antenne wurde von den Organisatoren bereitgestellt. (Abb. 1).

Gemessen wurden unter anderem das Signal-Rauschverhältnis (SNR), die Positionsgenauigkeit sowie die Anzahl der verfügbaren Satelliten. Es wurden Jamming-Systeme mit einer Leistung von 10 mW bis 100 W eingesetzt, die sowohl Continuous-Wave (CW-) als auch Chirp-Signale emittierten (Abb. 2). Zusätzlich wurden mit einem Software-Defined Radio (SDR) die Stör-signale aufgezeichnet, um sie anschließend im Labor zu analysieren.

Das digitale Filtersystem hat sich in den Tests als überaus leistungsfähig gegen Schmalband-Störungen erwiesen. Es hat CW- und Chirp-Jammer effektiv unterdrückt, das Signal-Rauschverhältnis war hoch genug, um die GNSS-Signale auswerten zu können. Die Positionsfehler lagen bei weniger als einem Meter, was die Zuverlässigkeit des Systems gegenüber schmalbandigen Störungen unterstreicht (Abb. 3). Aufgrund seiner geringen Komplexität ist es eine wertvolle Lösung für spezifische operative Anforderungen.

Demgegenüber zeigte das System zur räumlichen Filterung eine bemerkenswerte Vielseitigkeit und trug effektiv zur Reduzierung sowohl von schmal- als auch breitbandigen

Störungen bei. Seine adaptiven Null-Steuerungs-Fähigkeiten bewahrten die Signalintegrität und die Positionsgenauigkeit auch unter schwerwiegenden Störbedingungen. Seine Anpassungsfähigkeit positioniert das System als eine robuste Lösung für dynamische und nicht vorhersehbare Störumgebungen.

Die Resultate unterstreichen die Stärken beider Lösungen. Das digitale System bietet eine präzise und effiziente Abwehr gegen Schmalband-Interferenzen, während das räumliche System umfassende Schutzwirkung gegen ein breiteres Spektrum an Interferenzarten aufweist. Ihre kombinierte Nutzung kann die Resilienz von GNSS erheblich steigern und Schutz gegen variable Jamming-Bedrohungen ermöglichen.

Zukünftige Entwicklungen werden darauf abzielen, die Systeme dahingehend zu erweitern, dass sie auch die unteren GNSS-Bänder (L2, L5 und E5ab) abdecken. Dies wird dazu beitragen, den Schutz des gesamten GNSS-Frequenzspektrums zu verbessern und somit die Resilienz von Lösungen gegen Jamming in kritischen Anwendungen der Navigation und Positionierung zu erhöhen.

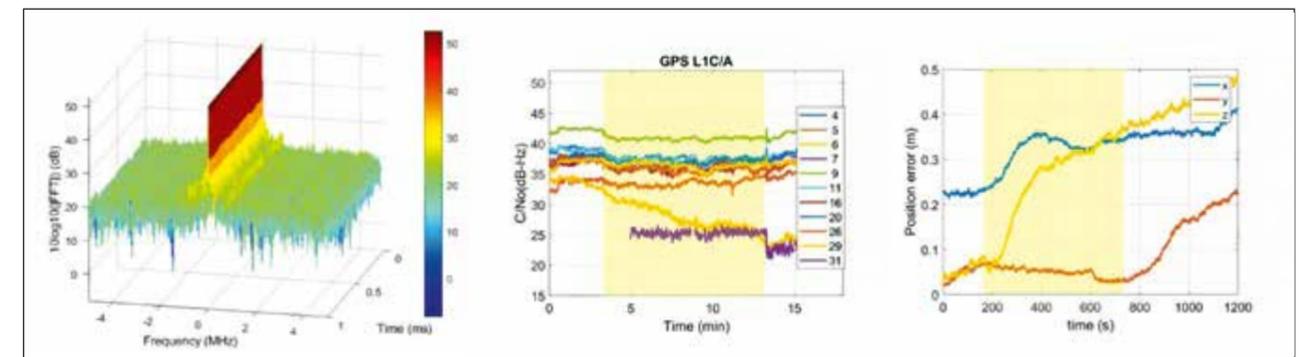


Abb. 3: (a): Spektrogramm eines CW Jammers auf L1 (EIRP: 50 W), (b): Carrier to noise density ratio der getrackten Satelliten, (c): Positionsfehler in WGS-84. Die Zeit, in der Jammeraktiv ist, ist gelb hervorgehoben

Gerardo Martino
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Christoph Petroll
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

WIWeBposteingang@bundeswehr.org

Schnellerer Einsatz neuer UAV-UGV Systeme durch Nutzung innovativer Simulationsansätze

Der Einsatz von UxVs (also von unbemannten Systemen) im militärischen Kontext entwickelt sich extrem schnell. Die simulationsgestützte Entwicklung beschleunigt den Einsatz von UxV-Systemen erheblich, da sie die Validierung von Kommunikationsprotokollen, Sensorintegration und Algorithmen in kontrollierten Umgebungen ermöglicht. Dieser Ansatz unterstützt somit ein schnelles Prototyping und eine nahtlose Integration.

Die aktuellen militärischen Konflikte zeigen, dass der Einsatz von UxVs nicht nur immer mehr an Bedeutung gewinnt, sondern auch neue Innovationszyklen in extrem kurzen Zeiträumen zu beobachten sind. Mit herkömmlichen Entwicklungs- und Testverfahren ist es nahezu unmöglich, das Tempo beizubehalten. Daher ist es wichtig, neue Prototypen, neue Algorithmen oder neue Sensoren, die zum Einsatz kommen, in einer realitätsnahen Simulationsumgebung testen zu können.

Diese Forschung nutzt Cyber-Physical Systems (CPS) und Internet of Robotic Things (IoRT) Methoden, um Themen durch den OODA-Loop Rahmen zu behandeln: Beobachten, Orientieren, Entscheiden, Handeln. CPS sorgen für eine nahtlose Integration von physischen Systemen und Rechenalgorithmen, während IoRT Konnektivität und Datenaustausch in Echtzeit ermöglicht. Es handelt sich um ein sich entwickelndes System, das leicht neu definiert und an spezifische Forschungskontexte angepasst werden kann.

Das mit Docker containerisierte Simulationsframework verbessert die Benutzerfreundlichkeit und Übertragbarkeit, indem es

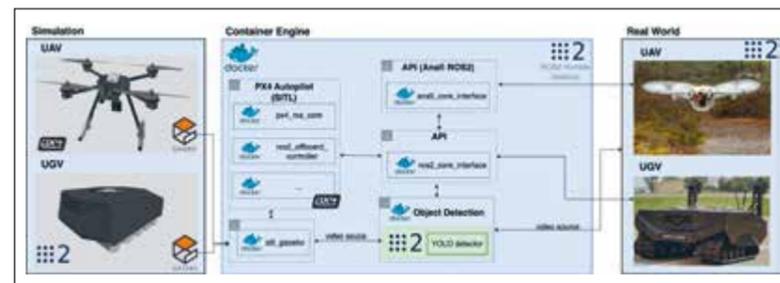


Abb. 1: Containerized Architecture (screenshot)



Abb. 2: Simulierte Architektur

Daniel Rossow
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

Prof. Dr. Antje Neve
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

die nahtlose Integration von UAV- und UGV-Modellen mit minimalen Änderungen ermöglicht (Abb. 1). Es bietet eine kostengünstige Umgebung für das Testen komplexer Interaktionen, reduziert den Bedarf an physischen Prototypen und ermöglicht eine schnelle Iteration. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Szenarien testen, Steuerungsalgorithmen feinabstimmen und das Systemverhalten unter verschiedenen Bedingungen bewerten, was die Entwicklungszyklen erheblich beschleunigt. Diese Flexibilität zeigt sich in der Fähigkeit, Erkennungs- und Kontrollalgorithmen einzusetzen, die robuste Tests und Anpassungen in verschiedenen Szenarien unterstützen.

Ein Waldszenario (Abb. 2) wurde mit 3D-Modellen einer Mine, eines UAVs und eines UGVs simuliert, wobei sowohl UAVs als auch UGVs gemeinsam navigierten, um Minen zu erkennen.

Dabei wurden reale Herausforderungen nachgebildet und die Kontrollsysteme vor dem Einsatz verfeinert. Der Rahmen unterstützt Aufgaben wie Objekterkennung, Klassifizierung und kollaborative Missionen. Seine Software-in-the-Loop-Architektur nutzt die aktuell gängigen Tools. Das Simulationstool Gazebo erweitert das Framework durch die Simulation komplexer Szenarien mit mehreren UAVs, UGVs und anpassbaren Umgebungen.

Zur Identifizierung von Minen wurde eine Technologie zur Objekterkennung in die Simulation integriert. Es wurde ein Datensatz aus Videos verschiedener Minenkategorien erstellt, die mit einer UAV-Plattform auf unterschiedlichem Terrain und bei verschiedenen Lichtverhältnissen sowohl in Innenräumen als auch im Freien aufgenommen wurden. Hochauflösende Bilder wurden extrahiert, mit speziellen Tools verarbeitet und zum Trainieren des Erkennungsmodells für eine Klassifizierung verwendet. Das trainierte Modell wurde dann in den Simulationsrahmen integriert, so dass UAV- und UGV-Modelle gemeinsam Minen in simulierten Umgebungen erkennen können.

Die simulierten Tests bestätigten die Integration und Effizienz des Moduls zur Objekterkennung, was darauf hindeutet, dass es mit geringfügigen Anpassungen auch in der realen Welt eingesetzt werden kann (Abb. 3).

Simulationen sind für den Einsatz in der realen Welt unerlässlich, da sie die Herausforderungen in den Bereichen Integration, Kommunikation und Tests bewältigen. Sie verfeinern Algorithmen und Hardware und beschleunigen die Entwicklung bei gleichzeitiger Verringerung von Risiken und Hardware-Abhängigkeit.



Abb. 3: Simuliert (links) und real (rechts)

Dr. Oliver Liebfried
 Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
 Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Fabian Albrecht M.Sc.
 Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
 Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Forschung an einer kompakten Energieversorgung für Pulslasten elektrischer Waffen

Eine Schlüsselkomponente elektrischer Waffen ist eine kompakte Energieversorgung. Im Fokus der Forschung stehen die Untersuchung von Superkondensatoren sowie die Entwicklung eines kompakten Hochspannungsladegeräts. Diese Forschungsarbeiten erfolgen im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) und der Professur für Leistungselektronik der Helmut-Schmidt-Universität (HSU).

Am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) wird intensiv an Schienenkanonen (Railguns) und der dazugehörigen Energieversorgung geforscht. Mit seinen Versuchsanlagen nimmt das ISL nicht nur im Rahmen des EU-Projekts „THEMA“, sondern auch darüber hinaus eine Schlüsselrolle bei der Weiterentwicklung dieser Technologie in Europa ein (Abb. 1). Auch auf dem Gebiet der Energieversorgung konnte durch die Entwicklung des XRAM-Generators (Abb. 2), eines Pulsgenerators auf Basis induktiver Energiespeicher mit hoher Energiedichte anstelle konventioneller Kondensatorbänke, weltweite Aufmerksamkeit erzielt werden. Durch neueste Entwicklungen wurde mit einem 2-MJ-Prototypen zur Versorgung eines mittelgroßen Schienenbeschleunigers eine induktive Energiedichte von 9 MJ/m^3 erreicht. Ebenso konnte eine Wiederholungsrate von 13 Hz in Zusammenhang mit einer batteriebasierten Energieversorgung demonstriert werden.

Im Fokus der Zusammenarbeit zwischen dem ISL und der HSU steht die Entwicklung einer platzsparenden primären Energiequelle sowie eines kompakten Hochspannungsladegeräts.



Abb. 1: Schienenkanone NGL 60 „PEGASUS“ und kondensatorbasierte Versorgungsanlage

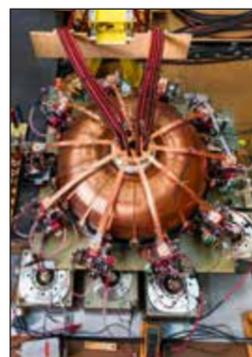


Abb. 2: XRAM - induktiver Pulsgenerator für Schienenkanone



Abb. 3: Prototyp eines Wechselrichters für ein 250-kW-Kondensator-Ladegerät

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus F. Hoffmann
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg

pressestelle@hsu-hh.de

Felix Haag M.Sc.
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg

pressestelle@hsu-hh.de

räts. Beides sind Teilkomponenten der Energieumwandlungskette und sind für die Funktion des Systems unerlässlich.

Da Hochspannungsladegeräte im Kontext einer Schienenkanone nur gepulst zum Einsatz kommen, ist die Leistungsdichte von aktuellen Geräten aus Forschung und Industrie deutlich zu gering. Durch den Einsatz einer hierfür optimierten Topologie wurden durch diese Kooperation bereits 2021 neue Maßstäbe in Bezug auf die Leistungsdichte gesetzt. Weiterführende Forschung legt nahe, dass durch die zusätzliche Verwendung der neuesten Siliziumkarbid-Leistungshalbleiter in einer resonanten Schaltungstopologie Leistungsdichten von über 10 kW/L erreicht werden können. Dieser Wert ist ca. 20-mal höher als bei kommerziell erhältlichen Systemen. In Abb. 3 sieht man mit dem Wechselrichter eine wesentliche Hauptkomponente dieses Ladegeräts.

Der primäre Energiespeicher, der zum Laden des induktiven Pulsgenerators dient, trägt signifikant zur Größe des Gesamtsystems bei. Um den Energiespeicher so kompakt wie möglich zu halten, ist es entscheidend, aus jeder verbauten Zelle die maximale Leistung zu beziehen. Speziell hierfür wurde in HSU-ISL-Kooperation ein Puls-Teststand (genannt „Power Flower“) entwickelt, der es ermöglicht, einzelne Zellen durch Pulsentladungen in sogenannter Leistungsanpassung an die

Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit zu bringen (Abb. 4). Dieser weltweit einzigartige Teststand kann einzelnen Zellen Spitzenströme von über 16 kA entnehmen. Mit einer Pulsdauer von 0,5 Sekunden erfahren die Zellen einen Puls, der aus zeitlicher Sicht dem Ladevorgang des aktuellen XRAM-Generators entspricht und ihn hinsichtlich der Stromstärke sogar übertrifft. Erstmals ist es dadurch möglich, Zellen nicht nur in großen Modulen, sondern auch kostengünstig einzeln auf ihre maximale Leistungsfähigkeit zu prüfen und ihr Alterungsverhalten zu untersuchen. In einer Vielzahl von Tests mit unterschiedlichen Energiespeichern (Batterien, Hybrid- und Superkondensatoren) zeigte einer der getesteten Superkondensatoren die größte Leistungsdichte. Nach über 615 Lastpulsen, mit Strömen viermal höher als die vom Hersteller spezifizierten Werte, zeigte die Zelle nur einen geringen Alterungseffekt (Abb. 5). Ein Kapazitätsrückgang von 5 % und eine Erhöhung des Innenwiderstands um 7 % sind sehr beeindruckende Ergebnisse und unterstreichen das Potenzial von Superkondensatoren in diesem Einsatzgebiet.

Diese wissenschaftlichen Fortschritte sind ein Beleg dafür, dass die Kooperation zwischen dem ISL und der HSU schrittweise dazu beiträgt, Herausforderungen der Energieversorgung elektrisch betriebener Waffen zu überwinden und deren potenziellen Einsatz in greifbare Nähe zu rücken.

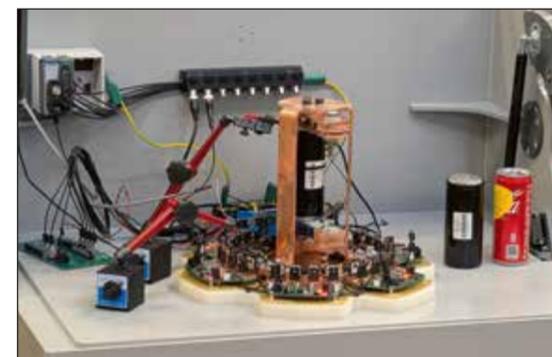


Abb. 4: „Power Flower“-Pulsteststand neben Superkondensator-Zelle

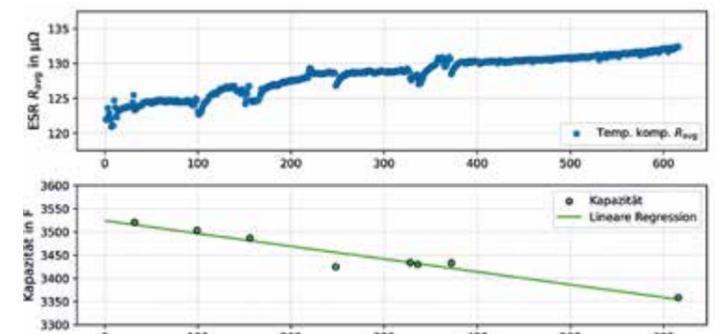


Abb. 5: Degradation von Innenwiderstand und Kapazität einer SCH3400 Superkondensatorzelle über 615 Pulsentladungen

Prof. Dr.-Ing. Klaus F. Hoffmann
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

pressestelle@hsu-hh.de

Martin Rasch
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

pressestelle@hsu-hh.de

Forschung zu robusten und resilienten leistungselektronischen Systemen für kritische Infrastruktur und den wehrtechnischen Bereich

Die Professur für Leistungselektronik der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) führt in enger Kooperation mit dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien (WIS) Versuche und Analysen zur Härtung leistungselektronischer Systeme gegenüber Degradationseffekten, verursacht von ionisierender Strahlung, durch. Insbesondere im Hinblick auf die Verwendung in kritischer Infrastruktur werden hier wichtige Erkenntnisse gewonnen.

Im Rahmen der dtec.bw-Projekte an den Universitäten der Bundeswehr wurde in den Jahren 2021 bis 2024 federführend an der Professur für Leistungselektronik (LEK) der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) der erste Projektabschnitt des Forschungsprojektes „Digitales Lebenszyklus-Monitoring, Härtung und Optimierung der Resilienz von Leistungselektronik in kritischer Infrastruktur“ (DiMoLEK) erfolgreich durchgeführt.

Das DiMoLEK-Konsortium besteht aus mehreren Professuren der HSU und aus in der Metropolregion Hamburg ansässigen Industriepartnern, welche alle über leistungsstarke Forschungs- und Entwicklungsabteilungen verfügen. Als weiterer wichtiger Forschungspartner ist das Wehrwissenschaftliche Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz (WIS) in Munster beteiligt. Das vom Wissenschaftsrat in seinem Evaluationsbericht vom 7. Juli 2023 als strategisch sehr gut aufgestellt beschriebene Kooperationsnetzwerk zeichnet sich durch eine besonders hohe wissenschaftliche Breite aus. Ferner ermöglicht die Zusammenstellung des Konsortiums die zielgerichtete Umsetzung des Dual-Use-Aspektes von DiMoLEK. Begünstigt

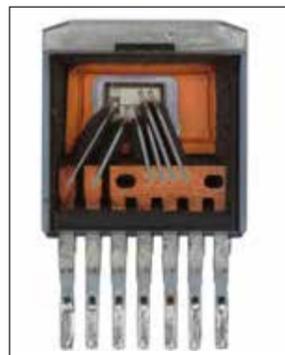


Abb. 1: Per Laser geöffneter SiC-MOSFET

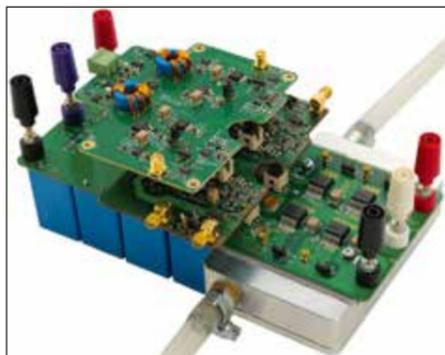


Abb. 2: DiMoLEK-Referenzdesign mit modularem Treiber und Leistungsplatine

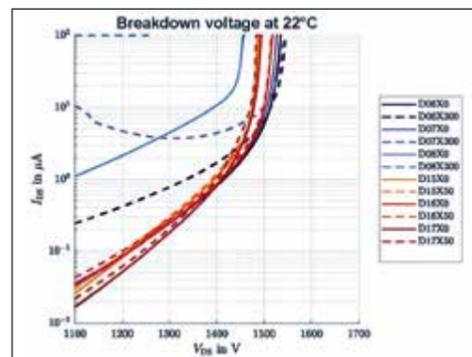


Abb. 3: Degradation der Durchbruchspannung nach Gammabestrahlung

LRDir Dr. Ronald Rambousky
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz
Munster

WISposteingang@bundeswehr.org

Dr. Alexander Müller
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz
Munster

WISposteingang@bundeswehr.org

wird dies insbesondere durch die herausragende Infrastruktur und Ausstattung des WIS für Analysen zu High-Power-Electromagnetics (HPEM) und Degradationseffekten durch ionisierende Strahlung.

Derzeit erlebt die Leistungselektronik zukunftsweisende Weiterentwicklungen durch die breite Einführung von Leistungshalbleitern auf Basis von Wide-Bandgap-Materialien, deren Vorteile sich eindeutig durch geringere Leit- und Schaltverluste und dadurch realisierbare höhere Schaltfrequenzen und Leistungsdichten auszeichnen. Mit der Einführung dieser neuen Halbleiter sind jedoch auch technische Herausforderungen verbunden. Diese liegen u. a. in komplexen Aufbau- und Verbindungstechniken oder der elektromagnetischen Verträglichkeit. Die Forschungsarbeiten im Rahmen von DiMoLEK konzentrieren sich schwerpunktmäßig auf Siliziumkarbid (SiC)-Bauelemente, an denen komplexe und mit vielen Einflussfaktoren verbundene Fehlermechanismen aufgezeigt werden konnten. Im Rahmen der Untersuchungen werden sowohl einzelne, diskrete Leistungshalbleiter (Abb. 1) als auch die anwendungsnahe Interaktion mehrerer Komponenten, wie beispielsweise in einer Parallelschaltung (Abb. 2), detailliert analysiert.

Ein wichtiger Aspekt ist ferner die Robustheit von leistungselektronischen Gesamtsystemen gegenüber ionisierender

Strahlung. Besonders in der Luft- und Raumfahrt, welche zunehmend elektrifiziert wird, gilt es, kritische Ausfälle auszuschließen und die Resilienz gegenüber ionisierender Strahlung zu gewährleisten. Beim Forschungspartner WIS können hierzu konkret die Auswirkung von Gamma- und Neutronenstrahlung auf Leistungselektroniken untersucht werden. Analysen nach der Belastung diskreter Leistungshalbleiter mit Gammastrahlung haben dabei kritische Degradationen von bspw. der Durchbruchspannung gezeigt, siehe Abb. 3. Neben der Untersuchung von diskreten Halbleitern werden bei DiMoLEK in der Zukunft auch gesamte Baugruppen und Systeme selektiv gegenüber Strahlungsereignissen analysiert. Speziell für die Untersuchungen im Zusammenhang mit Neutronenbestrahlung wurde eine komplexe Abschirmbox entwickelt und deren Funktionsweise simulativ verifiziert, dargestellt in Abb. 4 und 5. Im Jahre 2024 wurden in der Neutronenstrahlenkammer am WIS (Abb. 6) die ersten Versuche mit diskreten SiC-Halbleitern verschiedener Hersteller und unterschiedlicher Technologien durchgeführt.



Abb. 4: Abschirmbox für selektive Neutronenbestrahlung

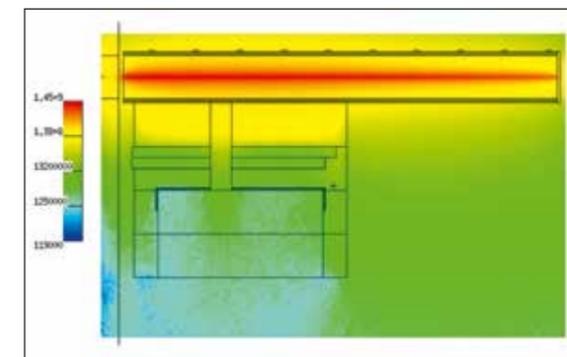


Abb. 5: Simulation der Strahlungsexposition innerhalb der Neutronenkammer bei Verwendung der Abschirmbox



Abb. 6: Neutronenstrahlen-Testkammer am WIS mit Abschirmung

Dr. Ronald Rambousky
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz
Munster

WISPosteingang@bundeswehr.org

Dr. Simon Holz
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach Institut EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Numerische Simulation von Kernwaffenwirkungen für den Nuklearschutz

Die Härte von Wehrmaterial gegenüber den direkten Wirkungen einer Nuklearexplosion kann mit modernen numerischen Simulationsverfahren bereits in der Design- und Entwicklungsphase beurteilt und verbessert werden. Das WIS erarbeitet dazu zusammen mit den Fraunhofer Instituten EMI und INT eine Simulationskette für alle relevanten Kernwaffenwirkungen auf Wehrmaterial.

Durch die aktuelle geopolitische Situation ist das Thema Nuklearwaffen wieder präsent geworden. Der Einsatz, besonders von nicht-strategischen Nuklearwaffen, kann in Konflikten nicht mehr ausgeschlossen werden. In gewissen Bereichen kann Wehrmaterial die direkten Wirkungen von nicht-strategischen Kernwaffeneinsätzen überstehen. Ein ausgewogener Nuklearschutz versucht diesen Bereich zu maximieren. Da Testmöglichkeiten begrenzt sind und konstruktive Maßnahmen bereits während der Planung und Projektierung einfließen müssen, ist die numerische Simulation der direkten Kernwaffenwirkungen (Initialstrahlung, Hitzeblitz und Druckwelle) und deren Einwirkung auf das Wehrmaterial dringend notwendig. Im Forschungsvorhaben „Initiative Nuklearschutz“ haben sich das WIS und die Fraunhofer-Institute EMI und INT zusammengeschlossen um eine moderne Simulationskette aller relevanten Kernwaffenwirkungen auf Wehrmaterial zu etablieren und somit eine frühzeitige Nuklearschutzanalyse zu ermöglichen.

Für die Simulation der thermischen Effekte (Hitzeblitz) wurde ein numerischer Löser entwickelt, der die Strahlungspropagation durch die erdnahe Atmosphäre numerisch berechnet. Hierbei

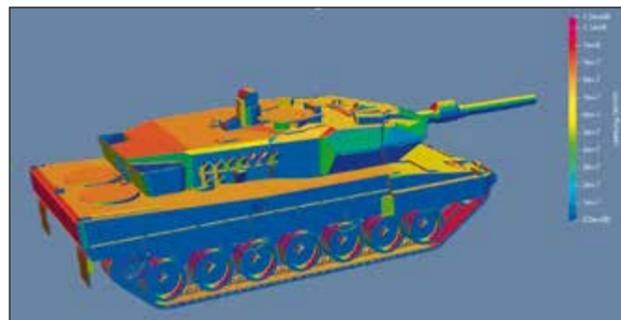


Abb. 1: Auf ein Kampfpanzer-Modell beaufschlagte thermische Leistung während einer Nuklearexplosion (Quelle: FhG EMI)

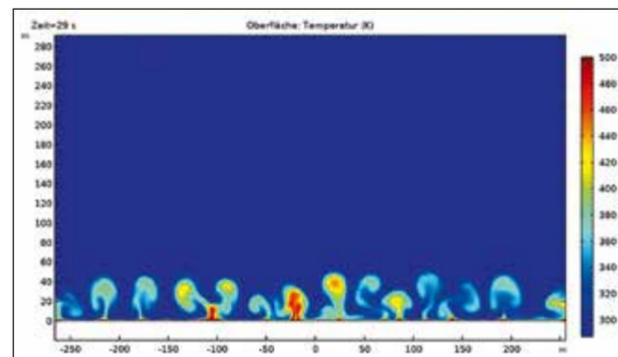


Abb. 2: Bodennahes Temperaturfeld der Luft über einem vom Hitzeblitz erwärmten Boden (Quelle: FhG EMI)

wird das Discontinueous-Galerkin-Verfahren (DG-FEM) verwendet. Die Visualisierung der Simulationsergebnisse ermöglicht eine umfassende Analyse der bestrahlten Objekte (Abb. 1). Dadurch können am Wehrmaterial Hotspots identifiziert werden, die durch den Hitzeblitz besonders stark betroffen sind. Solche Analysen sind entscheidend, um kritische Stellen am Objekt schnell zu erkennen. Die gewonnenen Daten können später an strukturmechanische Simulationsmodule übergeben werden. So wird es möglich, die Auswirkungen der Erwärmung durch den Hitzeblitz auf die mechanische Stabilität bei den Druckbelastungen zu analysieren (kombinierte Effekte). Durch ein weiteres Simulationsverfahren ist es nun möglich die Erwärmung des Erdbodens infolge des Hitzeblitzes zu simulieren. Dadurch können in weiteren Schritten der Simulationskette die Auswirkungen der thermischen Erwärmung des Bodens auf die Druckstoßwelle berücksichtigt werden (Abb. 2).

Für die Simulation der Druckausbreitung wurde ein Quellenmodell für Nuklearexplosionen entwickelt und in den hauseigenen CFD-Code (FhG-EMI) Apollo-Blastsimulator (<https://apollo-blastsimulator.de/>) integriert. Weiterhin wurde eine Gebietskopplung eingeführt, die eine effiziente 2D-Simulation der Druckwelle vom Explosionsort zum Zielort (dort befindet sich das zu untersuchende Wehrmaterial) mit der 3D-Simulation im Gebiet des zu untersuchenden Objekts verbindet. Damit können Druckbelastungen an Starrkörpermodellen berechnet werden. Die Tauglichkeit wurde an den Testmodellen 20-Fuß-Container, Lastwagen und Kampfpanzer demonstriert. Mit dem entwickelten Verfahren ist nun auch die Berücksichtigung von topologischen Höhenstrukturen des Geländes möglich (Abb. 3). Es zeigt sich, dass steile Flanken im Terrain durch Reflexion der Druckwelle zu signifikanten



Abb. 3: Verteilung des maximalen Druckimpulses einer Nuklearexplosion unter Berücksichtigung einer Tal-Berg-Kombination (Quelle: FhG EMI)

Anstiegen des Spitzenüberdrucks im Vergleich zur Ausbreitung über ebenem Grund führen. Allgemein führt der zuerst wirkende Hitzeblitz zu einer Erwärmung der bodennahen Luftschicht. Diese führt bei der zeitlich verzögert eintreffenden Druckwelle zu einer bodennahen vertikalen dynamischen Druckkomponente (Abb. 4), die das Umkippen von Fahrzeugen begünstigt. Erste Simulationen an einem Kampfpanzer-Modell ergaben ein signifikant größeres Umkipp-Moment gegenüber einer Simulation ohne Berücksichtigung der Bodenerwärmung.

Mit den aufgezeigten Ergebnissen im Bereich Hitzeblitz und Druckstoß sind die Voraussetzungen geschaffen, in weiterführenden Arbeiten die Einwirkung der Kernwaffeneffekte auf das Wehrmaterial, wie Verformungen, Stauchungen und Aufreißen numerisch zu simulieren. Dazu ist der Aufbau von strukturmechanischen Simulationsmodellen mit temperaturabhängigen Materialmodellen geplant, die wesentlich komplexer sind als Starrkörpermodelle.

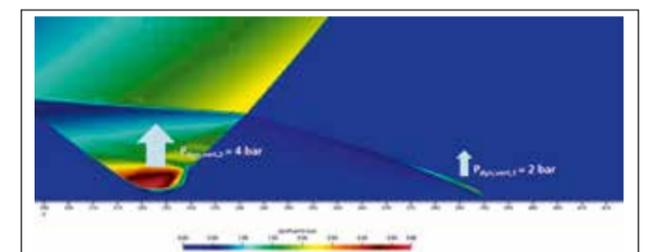


Abb. 3: Vertikaler Dynamischer Druck in der bodennahen Druckfront, bedingt durch die bodennahe Temperaturschichtung aufgrund des Hitzeblitzes (Quelle: FhG EMI)

Dr. Max Mörtel
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz
Munster

wisposteingang@bundeswehr.org

Dr. Maria Allers
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz
Munster

wisposteingang@bundeswehr.org

Selektive Detektion von chemischen Kampf- und Gefahrstoffen mittels Hochenergie-Ionenmobilitätsspektrometrie

Hochenergie-Ionenmobilitätsspektrometer (HiKE-IMS) arbeiten bei verringertem Druck mit erhöhten reduzierten elektrischen Feldstärken. Durch die verbesserte analytische Auflösung werden falsch-positive Ergebnisse bei der Detektion von toxischen Gasen minimiert. Die optionale feldabhängige Fragmentierung liefert weitere spezifische Informationen zur Reduktion von Querempfindlichkeiten.

Die Mehrzahl der heute eingesetzten mobilen Gasmessgeräte zur Detektion von chemischen Kampf- und Gefahrstoffen beruhen auf dem Prinzip der Ionenmobilitätsspektrometrie. Die Technologie arbeitet bei Umgebungsdruck und basiert auf der individuellen Geschwindigkeit von Ionen in einem elektrischen Feld entgegen der Flussrichtung eines Driftgases. Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) lassen sich bei geringem instrumentellen Aufwand sehr kompakt bauen und ermöglichen eine Detektion von Spurengasen in extrem geringen Konzentrationen (ppb_v-Bereich) bei Messzeiten von wenigen Sekunden. Allerdings treten aufgrund des technisch begrenzten Auflösungsvermögens bei der Analyse komplexer Gasgemische häufiger falsch-positive Ergebnisse auf. Weiterhin können konkurrierende Ionen-Molekül-Reaktionen, z. B. mit Restfeuchtigkeit aus dem System, charakteristische Signale unterdrücken und zu falsch-negativen Ergebnissen führen.

Beim HiKE-IMS wurde das technologische Prinzip traditioneller IMS hinsichtlich der erreichbaren Selektivität weiterentwickelt. Diese Geräte arbeiten bei einem Druck von 20 bis 60 mbar und einer hohen reduzierten elektrischen Feldstärke E/N von bis

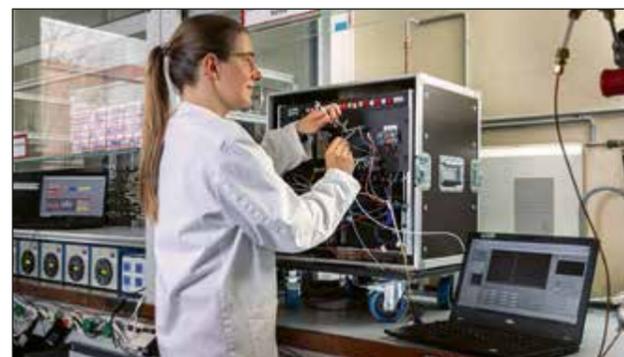


Abb. 1: Für die umfassende Charakterisierung des HiKE-IMS Technologie-demonstrators wurde das Gerät an einer Prüfgasanlage zur quantitativen Bereitstellung von chemischen Kampfstoffen betrieben

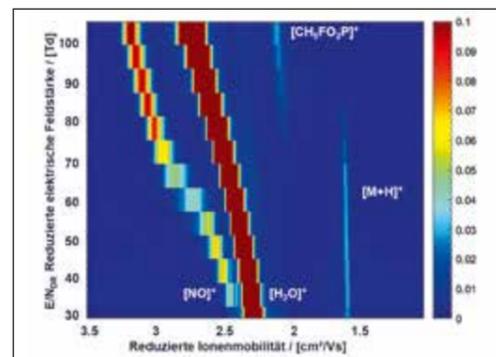


Abb. 2: Heatmap-Darstellung der feldabhängigen Ionenmobilität von Cyclosarin (GF) im HiKE-IMS. Bei höherer Feldstärke im Drifttraum E_{DR}/N wird das Quasi-Molekülion $[M+H]^+$ vermehrt fragmentiert

Dr. Arne Ficks
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz
Munster

wisposteingang@bundeswehr.org

zu 120 Td. Die Messbedingungen begünstigen die Dissoziation von Wasserclustern, wodurch sich die substanzspezifischen Ionenmobilitäten bei einer gleichzeitigen Verringerung der Feuchteabhängigkeit besser differenzieren lassen. Der Einfluss von konkurrierenden Ionen-Molekül-Reaktionen auf die vorherrschende Ionenpopulation ist zudem weniger stark ausgeprägt. Zusätzliche Effekte wie die Fragmentierung von Ionen bei höheren Feldstärken oder die feldabhängige Ionenmobilität lassen sich nutzen, um falsch-positive Ereignisse weiter zu reduzieren.

Das Leistungsvermögen des HiKE-IMS wurde in umfangreichen Laborversuchen mit den chemischen Kampfstoffen Tabun (GA), Sarin (GB), Soman (GD), Cyclosarin (GF) und S-Lost (HD), sowie mit ausgewählten toxischen Industriechemikalien (TICs) evaluiert (Abb. 1). Die charakteristischen Signale der Zielsubstanzen wurden dabei in Abhängigkeit der Feldstärke aufgenommen. Durch die kombinierten Informationen aus den jeweiligen Messreihen konnten hierbei individuelle analytische Fingerabdrücke gewonnen werden (Abb. 2). Im Resultat lassen sich selbst strukturell sehr ähnliche Verbindungen, wie die Nervenkampfstoffe GB, GD und GF, deutlich voneinander abgrenzen, und von den ansonsten typischen Querempfindlichkeiten unterscheiden (Abb. 3). Alle vermessenen TICs konnten insbesondere aufgrund der unterdrückten Clusterbildung eindeutig

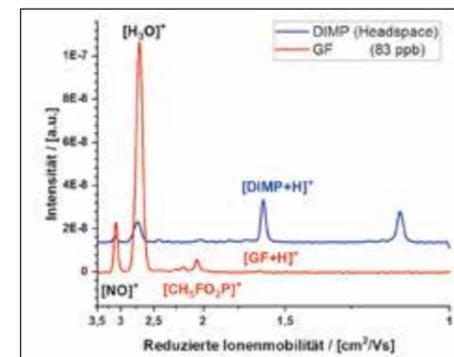


Abb. 3: Zwischen der Simulationssubstanz Diisopropylmethylphosphonat (DIMP) und Cyclosarin (GF) ist mit dem HiKE-IMS eine spektrale Differenzierung aufgrund der Fragmentierung bei hohen Feldstärken möglich. Konventionelle IMS tendieren dagegen zu einer falsch-positiven Identifikation von DIMP als GF

detektiert werden. Die aufgenommenen Signalintensitäten waren dabei weitestgehend unabhängig von der gewählten Luftfeuchtigkeit. Zur Erweiterung der Anwendungsbreite wurde ein Aufbau zur Vermessung von handelsüblichen Thermodesorptionsröhrchen realisiert. Hiermit kann das HiKE-IMS neben Online-Messungen auch für die Bestimmung von extern gesammelten Gasproben genutzt werden.

Die beschriebenen Vorteile machen das HiKE-IMS zu einem leistungsstarken Instrument bei der selektiven Detektion von toxischen Gasen. Aufgrund der koffergrößen Peripherie ist eine Anwendung auf mobilen Plattformen oder im mobilen Labor der ABC-Aufklärung denkbar. Als ausdrücklicher Nachteil ist derzeit die verringerte Sensitivität im Vergleich zum traditionellen IMS anzusehen, wobei trotz ausstehender Optimierung die NATO-Zielvorgaben von Konzentrationen im ppbv-Bereich im Regelfall bereits erreicht werden (Abb. 4).

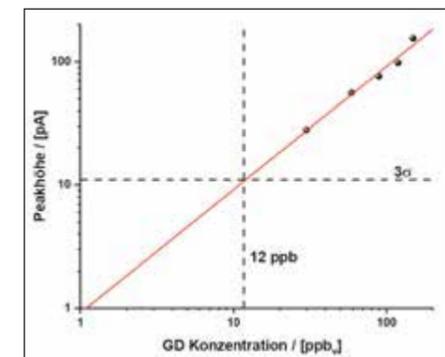


Abb. 4: Kalibrierkurve für Soman (GD) zur Bestimmung der Sensitivität bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit. Im 3 σ -Konfidenzintervall wird eine Nachweisgrenze von 12 ppb, erreicht, die den NATO-Zielvorgaben entspricht

TRAmtr Evy Reiske
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Wehrtechnisches Innovationspotenzial in der Rettungskette

Aktuelle Bedrohungsszenarien, welche sich im Kontext der Landes- und Bündnisverteidigung ergeben, bringen Herausforderungen in der Verwundetenversorgung. Neue Technologien werden untersucht, um die Rettung und Gesundheitsversorgung zu verbessern. Die dafür zur Verfügung stehenden Einzeltechnologien sind vielfältig.

Aktuelle Forschungsaktivitäten im Innovationslabor System Soldat des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Werk- und Betriebsstoffe WIWeB beschäftigen sich mit dem Potential und der Nutzbarkeit neuer Technologien, wie z. B. Wearables und Smart Textiles, im Kontext eines zukunftsorientierten Soldatensystems, die auch für die sanitätsdienstliche Versorgung relevant sind.

Sie erlauben prinzipiell Verbesserungen im Zuge einer Digitalisierung der Rettungskette bzw. eine allgemeine Verbesserung der Gesunderhaltung Bundeswehr-Angehöriger. Die Aktivitäten der wehrtechnischen Forschung ergänzen hier die wehrmedizinische Forschung und deren Anstrengungen zur Digitalisierung der Gesundheitsversorgung der Bundeswehr.

Von hoher Bedeutung war daher eine umfassende Sichtung und Analyse der Vorschriftenlage sowie die systematische Untersuchung der praktischen Abläufe innerhalb der Rettungskette. Die dabei erlangten Erkenntnisse wurden unter Einbeziehung von entsprechenden Experten aus dem zentralen Sanitätsdienst der Bundeswehr konsolidiert. Durch dieses

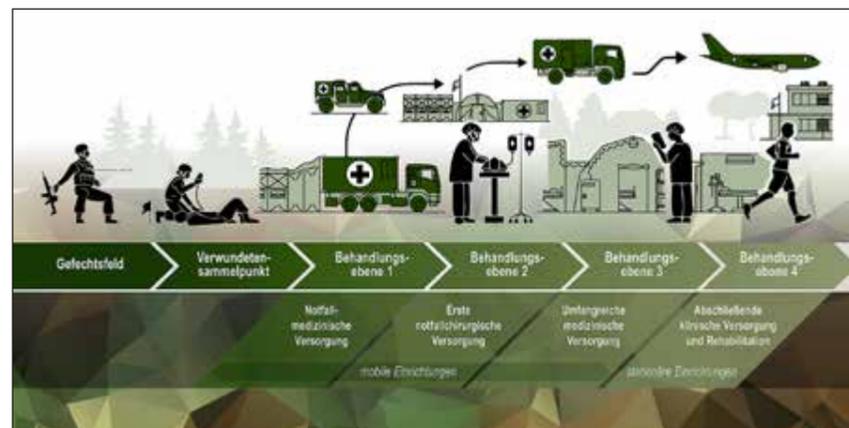


Abb. 1: Grafische Darstellung der Rettungskette der Bundeswehr

kooperative Vorgehen konnten praxisrelevante Herausforderungen identifiziert werden.

Ein wesentlicher Projektbestandteil war die Untersuchung und Weiterentwicklung von Technologien zur technischen Unterstützung der Rettungskette. In diesem Rahmen wurde neben grundlegenden Arbeiten zur Integration unterschiedlicher Sensoren in textile Produkte eine digitale Feldkrankenkarte unter Nutzung einer intelligenten Erkennungsmarke als Speichermedium prototypisch realisiert, welche die Grundlage für die weiteren Entwicklungsschritte bildet.

Bei der Erstversorgung von Verwundeten können perspektivisch dank der funktionalen Erweiterung der Erkennungsmarke auch zusätzliche, für die Versorgung relevante Daten verarbeitet und gespeichert werden. Sensoren, wie Geopositionierungssysteme (GPS) oder auch Beschleunigungssensoren, in Kombination mit den durch Wearables erfassten Vitalparametern, ermöglichen eine gezielte Unterstützung der aktuellen Formate der Datenerfassung für die Feldkrankenkarte. Ergänzt wird dies durch die intuitive Benutzeroberfläche und zusätzliche Hinweisfunktionen der digitalen Feldkrankenkarte, die speziell auf die Anforderungen von Hochstresssituationen ausgelegt sind. Dank der digitalen Verarbeitung der Informationen ist, bei gegebenen Rahmenparametern, eine nahezu Echtzeit-Datenübertragung an die nachgeordneten Instanzen der Rettungskette und beispielsweise Logistik möglich.

Auch die Datenübertragung der Informationen mittels Nahfeldkommunikation (NFC) im Zuge von Patientenübergaben kann ohne Informationsverlust beschleunigt werden.

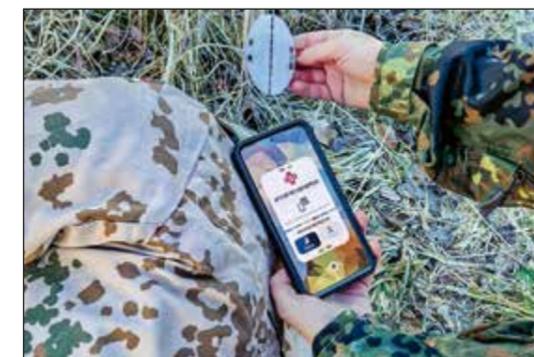


Abb. 2: Erfassen der relevanten Daten des Verwundeten mittels „intelligenter Erkennungsmarke“ mit eingebautem NFC-Tag. Diese Informationen können auf einem beliebigen Handheld (hier Smartphone) dargestellt werden

Weitere Analysen im Zuge des Projektes haben gezeigt, dass die marktverfügbaren Wearables bereits ein großes Potenzial für die militärische Nutzung beispielsweise in der Rettungskette aufweisen. Dennoch sind finale Optimierungen hinsichtlich der Anforderungen der militärischen Nutzung erforderlich. Hier spielen insbesondere Aspekte des elektronischen Kampfes, der Tarnung und des Datenschutzes eine wichtige Rolle.

Die angestrebte Symbiose von Technologien soll eine optimierte sowie beschleunigte Verwundetenversorgung sicherstellen, um auch knappe Ressourcen effizienter zu steuern. Zusätzliche Unterstützung kann unter anderem eine technisch-assistierte Triage bieten oder auch die Analyse von Vitalparametern bereits vor einer Verwundung, mit dem Ziel die Durchhaltefähigkeit abzuschätzen.

Die im Zuge des Projektes betrachtete Technologien und Konzepte weisen ein hohes Potenzial für die militärische Nutzung in verschiedenen Szenarien (Rettungskette, Überlastungsprävention, Mensch-Maschine Interaktion) auf und bilden den technischen Grundstein für eine Weiterentwicklung des komplexen Systems der Rettungskette. Besondere Herausforderungen ergeben sich aktuell in Bezug auf die ethischen und datenschutzrechtlichen Fragestellungen.



Abb. 3: Eingeführte Feldkrankenkarte (Papierlösung) und digitaler Demonstrator, der u. a. zusätzlich auch die Vitaldaten der Person anzeigt

Till Tetzlaff
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Dr. Christine Baumgart
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Tiefsttemperaturbehandlung für additiv gefertigten Stahl – flexibel und effizient

Durch Tiefsttemperaturbehandlung (DCT) können die Verschleißfestigkeit eines additiv gefertigten Werkzeugstahls ohne erneutes Austenitisieren verdreifacht und gleichzeitig die prozessinduzierten Eigenspannungen reduziert werden. Dies stellt eine vielversprechende Möglichkeit für die Fertigung, Instandhaltung und Lebensdauersteigerung belasteter Komponenten in der Bundeswehr dar.

Die additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM) ermöglicht die Herstellung komplexer Metallbauteile und erlaubt Streitkräften, Ersatzteile und Übergangslösungen direkt vor Ort oder in dezentralen Fertigungszentren herzustellen. Dies reduziert logistische Abhängigkeiten, verkürzt Reparaturzeiten und erhöht die Einsatzbereitschaft. Besonders das drahtbasierte Laser Metal Deposition (w-LMD) Verfahren bietet hier entscheidende Vorteile (Abb. 1): Es erlaubt das gezielte Aufbauen auf Halbzeuge oder das Wiederaufbauen verschlissener Bauteile, wodurch Ressourcen und Kosten gespart werden. Zusätzlich entfällt das herausfordernde Metallpulverhandling anderer AM-Technologien. Trotz dieser Vorteile bleibt die mechanische Belastbarkeit additiv gefertigter Metalle ein zentraler Optimierungsfaktor. Die Eigenschaften direkt nach der additiven Fertigung entsprechen meist nicht den Anforderungen und müssen über die Wärmebehandlung eingestellt werden. Gerade für auf Verschleiß belastete Bauteile sind diese häufig kompliziert und beinhalten aufwendige Randschicht- oder Oberflächenbehandlungen – hier ist die Tiefsttemperaturbehandlung (DCT) eine vielversprechende Möglichkeit zur Potentialsteigerung additiv gefertigter Bauteile.

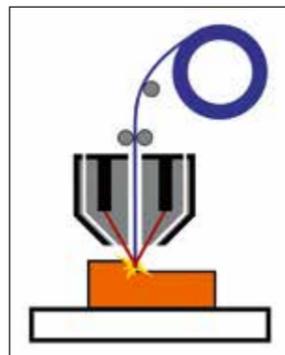


Abb. 1: Schematische Darstellung des w-LMD Prozess. Ein Draht (blau) wird konzentrisch in den Auftragskopf (grau) gefördert und mittels Laser (rot) aufgeschmolzen. Durch das lagenweise Verfahren des Auftragskopfes wird das Bauteil (orange) erzeugt

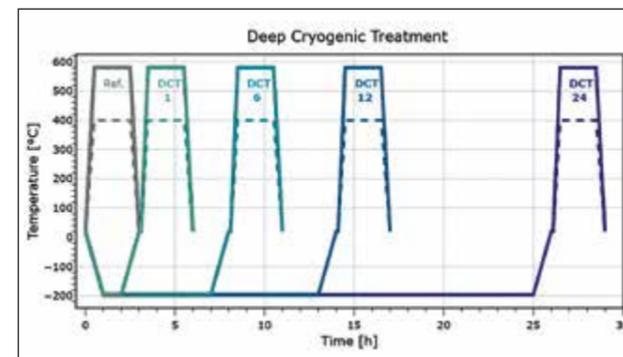


Abb. 2: Temperaturprofil der untersuchten Tiefsttemperaturbehandlung

Dr. Felix Zimmer
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Bisher wird DCT im industriellen Maßstab hauptsächlich für Stähle verwendet und dient der Steigerung der Verschleißfestigkeit von Getriebeteilen, Schneid- und Formwerkzeugen. Der DCT-Prozess umfasst eine langsame Abkühlung der Bauteile auf Temperaturen unter $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$, ein Halten auf dieser Temperatur für mehrere Stunden und ein anschließendes Auftauen mit zusätzlichen Anlasszyklen (Abb. 2). Durch das DCT wird der Restaustenitgehalt reduziert und die Karbidausscheidung verstärkt. Je nach Bauteil und Werkstoff kann hierdurch eine Vervielfachung der Lebensdauer erzielt werden. Da der genaue Mechanismus hinter der DCT bisher nicht vollständig geklärt und Inhalt aktueller Forschung ist, ist dieses Thema auch aus einer wissenschaftlichen Perspektive interessant.

In Untersuchungen des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) und des 3D-Druckzentrums der Bundeswehr konnten die Verschleißfestigkeit von w-LMD-gefertigtem Werkzeugstahl durch DCT um ca. 190 % gesteigert und zeitgleich prozessinduzierte Eigenspannungen reduziert werden (Abb. 3 und 4). Dies zeigt, dass die vielversprechenden Vorteile der DCT auch auf additiv gefertigte Bauteile übertragbar sind. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Fertigungsparameter und Haltezeiten auf Tiefsttemperatur (soaking time) sowie die Anlasstemperatur auf ihre Auswirkun-

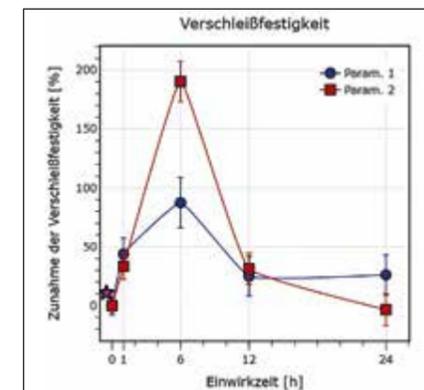


Abb. 3: Prozentuale Änderung der Verschleißfestigkeit bezogen auf die nicht DCT-behandelte Probe. Der magenta-farbende Stern zeigt die Verschleißfestigkeit des konventionell gefertigten Werkstoffes an

Prof. Dr. Eric A. Jägler
Universität der Bundeswehr München
Neuiberg

info@unibw.de

gen auf die Eigenschaften hin untersucht. Die Vergleichsgruppe stellen nicht kältebehandelte Proben und konventionell wärmebehandeltes Stangenmaterial des gleichen Werkstoffs dar.

Übertragen auf einen Nutzen für die Streitkräfte, verspricht die Kombination von DCT und additiven Fertigungsverfahren wie dem w-LMD mehrere Vorteile. Das vergleichsweise robuste und kostengünstige w-LMD kann eine flexible Fertigung sowie die Reparatur metallischer Bauteile ermöglichen. Durch die verbesserte Verschleißfestigkeit kann die Lebensdauer belasteter Bauteile verlängert und Instandsetzungen eingespart werden. Da das DCT ohne erneutes Austenitisieren durchgeführt werden kann, bleibt der ursprüngliche Wärmebehandlungszustand eines reparierten Bauteils weitestgehend erhalten – ein entscheidender Vorteil insbesondere für den mobilen oder dezentralen Einsatz.

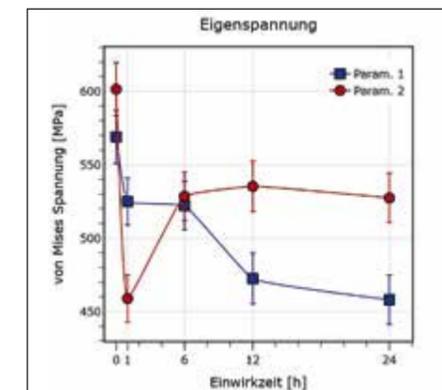


Abb. 4: Eigenspannungen der Proben in Abhängigkeit der soaking time des DCT

TORR Dominik Müller
Wehrtechnische Dienststelle für Schutz und Sondertechnik (WTD 52)
Schneizlreuth

wtd52posteingang@bundeswehr.org

TRDir Simon Reindl
Wehrtechnische Dienststelle für Schutz und Sondertechnik (WTD 52)
Schneizlreuth

wtd52posteingang@bundeswehr.org

Abstandsfähige Kampfmitteldetektion mit UAV-getragener Sensorik

Mit dem Fokus auf Landes- und Bündnisverteidigung gewinnt die Aufklärung von großflächig verlegten Minensperren an Bedeutung. Auf Basis der Initiative „Abstandsfähige Kampfmitteldetektion“ wurde das Konzept eines UAV-getragenen Multisensorsystems (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) zur Detektion von auf der Oberfläche verlegten und vergrabenen Kampfmitteln entworfen. Mit Messkampagnen wird der Nutzen verschiedener Sensorik erforscht.

Aktuell erfolgt die Detektion von Kampfmitteln in der Bundeswehr durch Sondengänger mit handgehaltenen Detektoren. Die großen Fortschritte bei der Weiterentwicklung unbemannter Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) als Sensorträger bieten ein erhebliches technologisches Potential für neue operative Ansätze zur abstandsfähigen Kampfmitteldetektion. Diese Möglichkeiten wurden durch den militärischen Nutzer identifiziert und im Rahmen einer Initiative mit funktionalen Forderungen hinterlegt. Diese bilden die Grundlage für ein durch die Wehrtechnische Dienststelle für Schutz und Sondertechnik WTD 52 entworfenes Konzept zur Detektion von vergrabenen Kampfmitteln mit einem UAV-getragenen Multisensorverbund (Abb. 1).

Daraus leitet sich wehrwissenschaftlicher Forschungsbedarf hinsichtlich geeigneter auf UAV integrierbarer Sensorik insbesondere unter dem Gesichtspunkt von automatisierten Auswertelgorithmen ab. Das Spektrum möglicher Sensorsysteme reicht von Kamerasystemen im sichtbaren und infraroten Spektralbereich über Magnetometer bis hin zu bodendurchdringenden Radarsystemen (Ground Penetrating

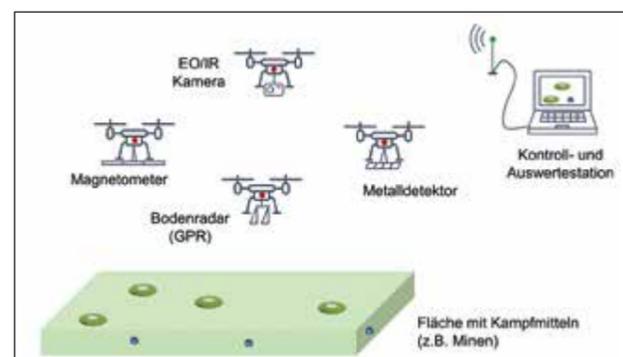


Abb. 1: Konzept eines UAV-getragenen Multisensorsystems zur abstandsfähigen Kampfmitteldetektion

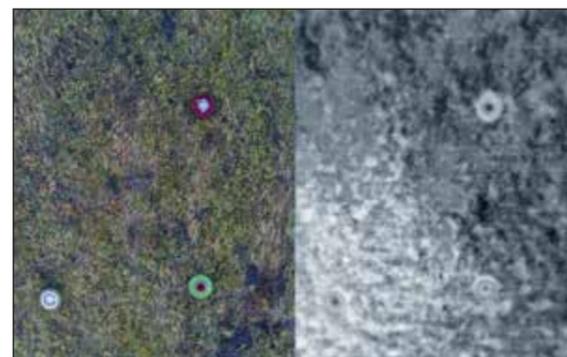


Abb. 2: Aufnahme von auf der Oberfläche verlegten Panzerabwehrminen im Optischen (links) und Infrarotspektrum (rechts)

Radar, GPR). Da kein einzelner Sensor alleine dazu fähig ist, das vollständige Spektrum an Kampfmitteln zuverlässig zu detektieren, ist es zwingend notwendig mehrere Sensoren in einem Verbund zu betreiben.

Ziel der wehrwissenschaftlichen Forschung an der WTD 52 ist die Bewertung und Weiterentwicklung von Auswertelgorithmen basierend auf der Akquise von reproduzierbaren Messdaten. Dazu sind an der WTD 52 Testszenarien auf Freifeldflächen mit unterschiedlichen vergrabenen Kampfmitteln, die ein breites Bedrohungsspektrum nachbilden, konzipiert. Dabei werden mit unterschiedlichen Bodenarten (u. a. Sand, Basalt, Humus) verschiedene physikalische Bodeneigenschaften abgedeckt, die unterschiedliche Herausforderungen für die eingesetzte Sensorik darstellen.

UAVs mit Kameras im optischen Bereich sind in einer Vielzahl von Varianten marktverfügbar. Automatisierte Detektionsalgorithmen wurden im Rahmen von internationalen Messkampagnen untersucht und ihre Funktion bei oberflächlich verlegten Testobjekten nachgewiesen. Im Infraroten erfordert die große Abhängigkeit von Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Bodentemperatur und Sonneneinstrahlung, eine höhere Komplexität der automatisierten Datenauswertung. Unter geeigneten Umweltbedingungen können jedoch auch vergrabene Objekte detektiert werden. Dazu haben erste Testmessungen an der WTD 52 mit dem Ergebnis stattgefunden (Abb. 2), dass Langzeitmessungen zur Bestimmung von Zeitfenstern und Umgebungsbedingungen für eine zuverlässigere Detektion notwendig sind.

Enthalten Kampfmittel ferromagnetische Materialien, ist eine Detektion mit Magnetometer möglich. Zu diesem Zweck wur-

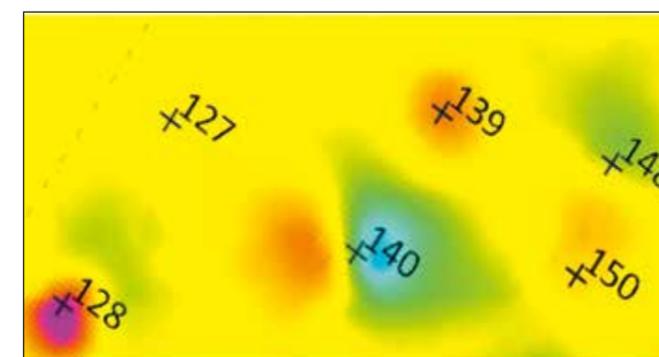


Abb. 3: Aufnahme eines Magnetometer-UAV mit automatisch markierten und nummerierten Verdachtsobjekten

de der Prototyp eines UAV-getragenen Magnetometersystems in einer Messkampagne an der WTD 52 untersucht. Die ausgetragenen Testobjekte konnten dabei automatisiert und positionsreferenziert detektiert werden (Abb. 3).

Um metallfreie Kampfmittel zu detektieren, müssen komplexere Technologien wie das GPR eingesetzt werden. Hierzu wird im Rahmen eines Studienvertrags mit dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein F&T-Demonstrator eines UAV-getragenen GPR-Systems entwickelt (Abb. 4). Messkampagnen auf den Testflächen der WTD 52 zeigen das Potential der Technologie bei der Detektion im Boden vergrabener Objekte. Die aufgezeichneten Messdaten bilden die Grundlage für die Entwicklung neuer Auswertelgorithmen zur Objekterkennung.

Diese grundlegenden Untersuchungen und das Verständnis der einzelnen Sensortechnologien sollen letztlich in ein einsetzfähiges Multisensorsystem münden. Die Erforschung von Konzepten zur Steuerung von Flugformationen mehrerer UAVs sowie die automatisierte Fusion verschiedener Sensordaten zu einem Gesamtbild für die Kampfmitteldetektion ist Gegenstand weiterer F&T-Vorhaben.



Abb. 4: F&T-Demonstrator eines UAV-getragenen Bodensensordaten (GPR) Systems zur Kampfmitteldetektion

Fluidische Schubvektorsteuerung: Auslegung, Charakterisierung und Einfluss auf Triebwerk und Mission

Bei der Konzeptionierung zukünftiger Luftfahrzeuge spielt neben der Implementierung leistungsfähiger Elektronik und Subsysteme die Verbesserung der aerodynamischen und Stealth-Eigenschaften eine essenzielle Rolle. Eine Entwicklung, welche sowohl die Effizienz, die Agilität als auch die Detektierbarkeit des Luftfahrzeuges positiv beeinflussen kann, ist die fluidische Schubvektorsteuerung.

Zur Verbesserung der Effizienz, der Agilität und der Signatur (sowohl Radar als auch Infrarot) von unbemannten Luftfahrzeugen untersucht das Institut für Strahltriebwerke (ISA) der Universität der Bundeswehr München im Auftrag der WTD 61 die in der Raumfahrt erstmals angewendete, jedoch in der Luftfahrt noch größtenteils ungenutzte fluidische Schubvektorsteuerung (FTV). Sie bietet gegenüber der rein mechanischen Schubvektorsteuerung zahlreiche potenzielle Vorteile, wie z. B. eine geringere Masse und mechanische Komplexität, eine Verringerung des aerodynamischen Widerstands sowie einer Verbesserung der Radarsignatur durch weniger externe bewegliche Komponenten.

Bisherige numerische Untersuchungen am ISA befassen sich vornehmlich mit der Integration der FTV-Methodik an dem Turbojet-Kleintriebwerk B300 des Herstellers AeroDesignWorks. Das Konzept zur Umlenkung des Schubstrahls basiert auf dem Coanda-Effekt. Dessen Funktionsprinzip ist in Abb. 1 dargestellt. Neben dem klassischen Primärabgasstrahl (rot), wird ein zusätzlicher Coanda-Massenstrom (blau) je nach Bedarf in die Düse zwischen Primärstrahl und Wand eingepulst. Durch die

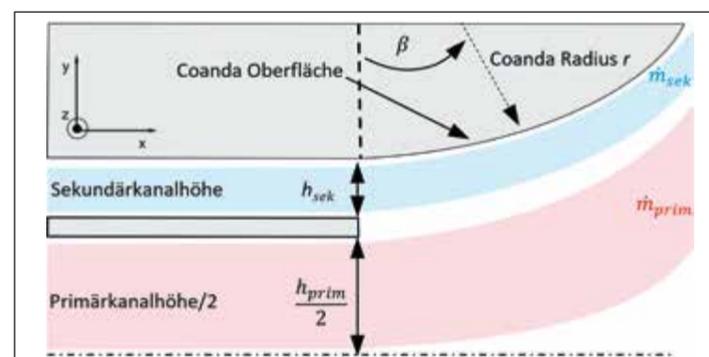


Abb. 1: Funktionsprinzip fluidische Schubvektorsteuerung basierend auf dem Coanda-Effekt

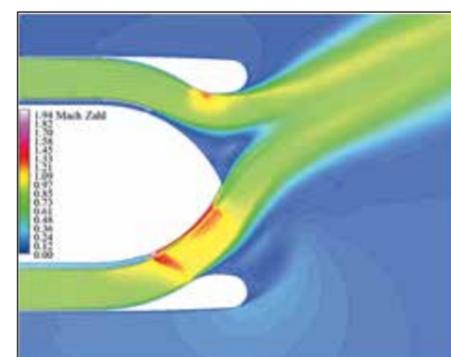


Abb. 2: CFD-Simulation einer Coanda-Coflow-Schubvektordüse

hohe Geschwindigkeit und den dadurch im Coanda-Strahl vorherrschenden geringen Druck, schmiegt sich dieser an die konvexe Oberfläche an und erfährt infolgedessen eine Umlenkung in Richtung dieser Oberfläche. Zwischen Coanda- und Primärstrahl findet ein Impulsaustausch statt und der Primärstrahl erfährt ebenfalls eine Umlenkung in die gewünschte Richtung. Mit der am ISA untersuchten Düse können, je nach geometrischer Ausführung, maximale Schubumlenkwinkel von bis zu $\beta > 30^\circ$ erreicht werden (Abb. 2). Diese Werte sind vergleichbar mit ausgeführten konventionellen Systemen, wie sie z. B. mit der Lockheed Martin F-22 ($\beta_{\max} \approx 20^\circ$) erreicht werden. Zusätzlich weist die untersuchte FTV-Methodik ein betriebspunktunabhängiges Verhalten auf. Am ISA untersuchte FTV-Konzepte sind zweidimensionale Schubvektordüsen, was heißt, dass sie eine zusätzliche Schubkraftkomponente in y-Richtung (F_y) erzeugen können.

Neben dem Verhalten der Schubvektordüse im stationären Bodenstandfall wird ebenfalls das instationäre Verhalten der Düse bewertet sowie die Performance über eine generische Flugmission eines am ISA konzipierten Flugkörpers (Abb. 3) mit integrierter FTV-Düse ausgewertet. Es zeigt sich, dass die fluidische Schubvektordüse ein sehr gutes Ansprechverhalten aufweist und keine Hystereseffekte erkennbar sind, was für die Implementierung in eine Flugsteuerung eminent wichtig ist.

Des Weiteren wird der Einfluss der fluidischen Schubvektordüse auf das Triebwerk und die Missionsdurchführung untersucht. Der Coanda-Massenstrom kann beispielsweise in Form von Zapfluft vom Triebwerks-Verdichter oder durch einen zusätzlichen, externen Verdichter bereitgestellt werden. Beide Varianten zeigen einen unterschiedlichen Einfluss auf den Triebwerkskreisprozess. Zudem wurde der Einfluss der fluidischen Schubvektorsteuerung auf eine mögliche Verringerung der Höhenruderfläche untersucht. In einem ersten Entwurf konnte die Höhenruderfläche um 21 % verringert werden, was auch zu einer Verringerung des aerodynamischen Widerstands führt. Das ISA hat im Rahmen seiner Arbeiten zu diesem Thema begonnen, Auslegungswerkzeuge für solche Düsen zu entwickeln und zu validieren und wird die Untersuchungen auch mit Hinblick auf die Skalierbarkeit auf Großanwendungen wie z. B. Kampfflugzeuge erweitern.

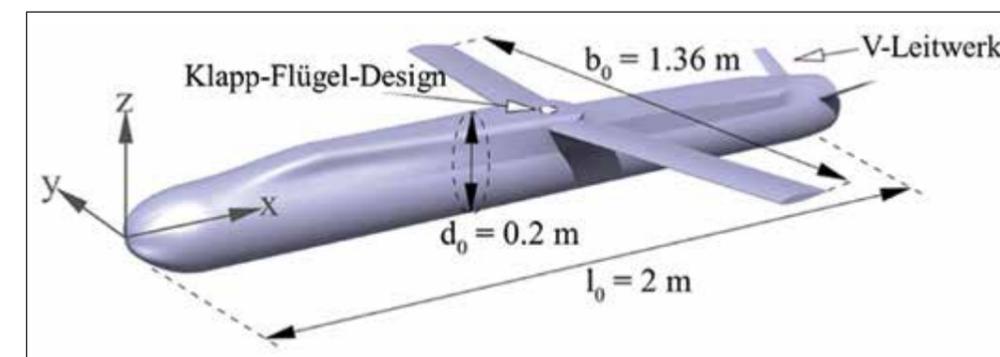


Abb. 3: Generischer Referenzflugkörper angewandt zur FTV-Düsenintegration

Niclas Bähr
Avilus GmbH
Ismaning

info@avilus.com

Max Söpper
Avilus GmbH
Ismaning

info@avilus.com

Das Projekt ALFACaD (Automated Low-Flying Aerial Cargo Delivery)

Das Projekt ALFACaD untersucht eine Drohne für den sicheren, autonomen Transport schwerer Lasten in unwegsamem Gelände. Ziel ist ein kosteneffizientes System mit bis zu 125 kg Nutzlast und 250 km Reichweite. In der ersten Phase 2024 wurden Flugfähigkeit, Sensorik und Integration in das Bundeswehr-Führungssystem erfolgreich demonstriert. Zukünftige Updates verbessern die Einsatzfähigkeit und Effizienz.

Das Projekt ALFACaD hat das Ziel, eine moderne Lösung für den Transport schwerer Lasten in schwierigen Einsatzgebieten zu untersuchen. Moderne militärische Einsätze erfordern schnelle und zuverlässige Logistik, insbesondere in unwegsamem Gelände. Hierbei liegt der Fokus auf Lasten über 100 kg, die effizient und sicher an schwer zugängliche Orte transportiert werden können, die mit Fahrzeugen nur schwer oder gar nicht erreicht werden.

Hierzu wird eine Drohne untersucht, die ohne spezielles Personal oder Infrastruktur vor Ort eingesetzt werden kann. Durch den Einsatz von Drohnen soll das Risiko für menschliche Besatzungen in gefährlichen Missionen reduziert und bemannte Lufttransportsysteme entlastet werden. Die Drohnen müssen außerdem kosteneffizient sein, um den Einsatz in großer Stückzahl zu ermöglichen.

Technologisch konzentriert sich das Projekt darauf, eine unbemannte Hubschrauberdrohne mit senkrechtstart- und landfähigen Eigenschaften in einer Flugerprobung zu untersuchen. Die Drohne soll hochautomatisiert arbeiten und Lasten präzise



Abb. 1: Drohne im Schwebeflug



Abb. 2: Integration ins digitale Führungsinformationssystem der Bundeswehr

LTRDir Jürgen Stegmeir
Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät (WTD 61)
Manching

wtd61470uasfut@bundeswehr.org

aus dem Schwebeflug mithilfe einer Winde absetzen können. Dabei wird eine Reichweite von bis zu 250 Kilometern und eine Nutzlast von bis zu 125 Kilogramm angestrebt. In realitätsnahen Szenarien werden die notwendigen Technologien erprobt, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Kosten zu gewährleisten.

In der ersten Projektphase im Jahr 2024 wurden bedeutende Fortschritte erzielt. Zunächst wurde die Flugfähigkeit der Basis-konfiguration der Drohne erfolgreich nachgewiesen (Abb. 1). Dies umfasste eine Betriebsgenehmigung für den deutschen Luftraum sowie die Demonstration einer Schwebzeit von einer Stunde. Darüber hinaus wurden wichtige Sensoren integriert, um zukünftige Funktionen wie Gestensteuerung und Tiefflug zu ermöglichen. Die während der Tests gewonnenen Daten werden zur Optimierung der Sensorik genutzt. Schließlich wurde die Drohne in ein digitales Führungssystem der Bundeswehr integriert (Abb. 2) und erfolgreich in realistischen Logistikszenerarien eingesetzt (Abb. 3).

Das in ALFACaD erprobte System bietet eine Vielzahl von Vorteilen für die Soldatinnen und Soldaten der Bundeswehr. Es ermöglicht eine schnelle Versorgung mit Material und Nachschub, selbst in schwer zugänglichem Gelände, und kann ohne zusätzliche Infrastruktur vor Ort eingesetzt werden. Die Drohne

trägt dazu bei, das Risiko für Personal in gefährlichen Missionen zu verringern und bemannte Lufttransportsysteme zu entlasten. Dies schafft Flexibilität für kritische Einsätze.

In der nächsten Phase des Projekts sollen weiterentwickelte Konfigurationen getestet werden. Durch ein Avionikupdate wird die Drohne auch bei gestörten Bedingungen, wie etwa bei einem gestörten GPS-Signal, zuverlässig einsatzfähig sein. Das Update umfasst außerdem Funktionen wie automatischen Start, automatisches Abschalten des Rotors und vollständig automatisierte Flugmissionen. Diese Weiterentwicklungen sollen die Effizienz und Einsatzfähigkeit der Drohne noch weiter verbessern.

Die Ergebnisse aus der ersten Projektphase bilden eine solide Grundlage für weitere Untersuchungen. Die mit ALFACaD gewonnenen Erfahrungen werden maßgeblich dazu beitragen, zukünftige Beschaffungen im Bereich von CargoUAS zielgerichtet und effizient durchzuführen. Diese neue Klasse von unbemannten Luftfahrzeugen wird die Einsatzfähigkeit als auch die Sicherheit der Soldatinnen und Soldaten in Zukunft wesentlich verbessern.



Abb. 3: Drohne in einem Logistikszenerario

Dr.-Ing. Alexander Kopp
POLARIS Raumflugzeuge GmbH
Bremen

info@polaris-rfz.de

LTRDir Jürgen Stegmeir
Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät (WTD 61)
Manching
wtd61470uasfut@bundeswehr.org

Flugerprobung eines Aerospike-Raketentriebwerks im Projekt RDRS

Das Projekt Rapid Deployable Reconnaissance System (RDRS) ist ein Innovationsprojekt des Drone Innovation Hub (DIH) der Bundeswehr mit der Firma Polaris Raumflugzeuge GmbH, in Kooperation mit dem Geschäftsfeld 470 „UAS-Gesamtsysteme & Nationales Kompetenzzentrum UAS“ an der WTD 61. Im Rahmen des Projektes werden Technologien für zukünftige Raumflugzeuge und Hyperschallsysteme entwickelt.

Horizontal startende Raumflugzeuge stellen eine neuartige Kategorie von Raumtransportsystemen für den Zugang zum Weltraum dar, die wie ein Flugzeug von konventionellen Start- und Landebahnen operieren und keine spezialisierte Bodeninfrastruktur in Form eines Weltraumbahnhofes mehr benötigen. Aufgrund des potentiell hohen Mehrwerts für militärische Anwendungen führt das Projekt RDRS eine Untersuchung und Bewertung des Raumflugzeugs Aurora (Abb. 1) der Firma Polaris für die Verwendung als flexibles und weltweit einsetzbares Weltraum-basiertes und Hyperschall-Aufklärungsmittel durch. Das System wird dabei von einer Kombination aus Turbostrahl-Triebwerken und Raketentriebwerken angetrieben, wobei die Turbostrahl-Triebwerke für Start, Landung und Reiseflug genutzt werden, während der Raketenantrieb zur Ausführung der Beschleunigungsmission erst in der Luft gezündet wird.

In einem Teilarbeitspaket des Projektes wurden in 2024 Flugversuche mit verschiedenen, skalierten Demonstratoren durchgeführt (Abb. 2). Eine der Zielstellungen war dabei die Flugerprobung eines neuartigen Antriebssystems, eines



Abb. 1: Raumflugzeug Aurora



Abb. 2: MIRA II Flugvorbereitung

sogenannten Linearen Aerospike-Raketentriebwerkes. Ein Proof-of-Concept Demonstrator-Triebwerk mit einem Auslegungsschub von 1 kN wurde ebenfalls im Rahmen des Projektes RDRS entwickelt und gefertigt.

Lineare Aerospike-Raketentriebwerke versprechen Effizienzsteigerungen von bis zu 30 % gegenüber konventionellen Raketentriebwerken und können zudem kompakter gebaut werden. Bisherige Arbeiten zu Linearen Aerospikes, etwa in den USA durch die NASA, beschränkten sich bisher auf Bodentests.

Am 29. Oktober jedoch konnte der 5 m lange Flugdemonstrator MIRA II erstmals ein solches Raketentriebwerk erfolgreich in der Luft zünden – eine Weltpremiere (Abb. 3). Der rund 4 Minuten lange Flug mit einer auf zunächst 3 Sekunden begrenzten Aerospike-Brennzeit fand vom Flugplatz Peenemünde aus über der Ostsee in gesperrtem Luftraum statt. Als Treibstoffe wurden Kerosin und flüssiger Sauerstoff (LOX) verwendet. Nach Abschluss der Mission landete MIRA II wieder sicher auf dem Flugplatz. Trotz aus Sicherheitsgründen verringertem Brennkammerdruck konnte während des Aerospike-Betriebs ein Schub von ca. 900 N ermittelt werden. Damit konnte zugleich erstmals der sichere Betrieb eines Schub-generierenden Linearen Aerospikes in einem Luftfahrzeug nachgewiesen werden.

Als weiterer Baustein zur weltweiten Einsatzfähigkeit von Raumflugzeugen wurde auch das Thema automatische Luftbetankung untersucht. Parallel zu den Aerospike-Aktivitäten fanden dazu vielversprechende erste Flugversuche statt, welche die automatische Annäherung und automatische Formations-

flüge von zwei Fluggeräten zum Ziel hatten (Abb. 4). Sowohl die Aerospike-Flugerprobungen als auch die Flugerprobungen zur automatischen Luftbetankung werden im Laufe des Jahres 2025 fortgeführt.

Die nächsten Entwicklungsschritte auf dem Weg zum Raumflugzeug umfassen die Entwicklung eines Überschall-Demonstrators, der bereits Ende 2025 flugbereit sein soll. Der Erstflug des ersten Full-Size-Raumflugzeuges ist schon für 2028 geplant, sofern die notwendigen Mittel zügig genug bereitgestellt werden können. Die Finanzierung des Projektes ist dabei weitgehend über privatwirtschaftliche Investitionen vorgesehen. Die Bundeswehr kann in der Funktion des möglichen Ankercunden maßgeblich zur Realisierung des Vorhabens beitragen.

Hyperschall-Raumflugzeuge nutzen als Dual-Use-Systeme die Synergien zwischen kommerzieller Raumfahrt und militärischen Anwendungsszenarien maximal aus. Als intrinsische Mehrzweckplattformen bieten sie der Bundeswehr und den Bündnispartnern das Potential, völlig neue Fähigkeiten im Bereich Satellitentransport, Hochgeschwindigkeits-Luftaufklärung und Verbringung von Effektoren bereitzustellen.



Abb. 3: Aerospike Zündung

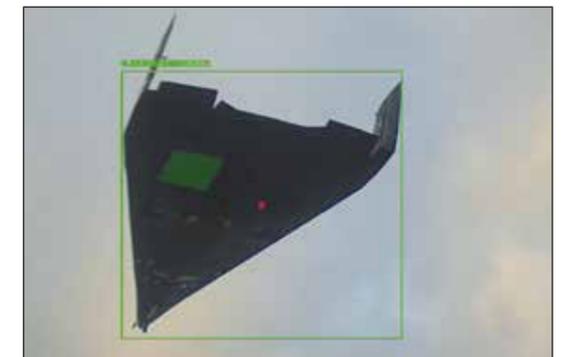


Abb. 4: Annäherung an den simulierten Tanker

ORR Dr. Andreas Funk
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)
Kiel

WTD71Posteingang@bundeswehr.org

RDir Dr. Frank Gerdes
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)
Kiel

WTD71Posteingang@bundeswehr.org

Unterwasser-Glider für den militärischen Einsatz

In ihrem Zielbild 2035+ verlangt die Deutsche Marine einen energischen Einstieg in die Nutzung von unbemannten Fahrzeugen und Plattformen. In diesem Zusammenhang untersucht die Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) das militärische Potential von Unterwassergleitern. Im Rahmen der von Portugal geführten NATO-Übung REPMUS 24 wurden Unterwassergleiter als Mittel zur akustischen Unterwasserüberwachung untersucht.

Unbemannte Unterwasserfahrzeuge (UUV) vom Typ Unterwassergleiter, üblicherweise einfach als Glider bezeichnet, sind ein im zivilen und teilweise auch im militärischen Bereich etabliertes ozeanografisches Messmittel. Aufgrund ihres sehr energieeffizienten Antriebssystems erreichen sie je nach Sensorausstattung Einsatzzeiten von Wochen bis Monaten. Spektakuläre zivile Einsätze gab es etwa mit einer Atlantiküberquerung oder bei Vermessungen unter dem polaren Meereis. An die Meeresoberfläche tauchen Glider nur auf, wenn sie mittels Satellitentelemetrie ihre Daten an die Operationszentrale senden bzw. von dort neue Missionsparameter empfangen müssen. Insofern können sie nahezu verdeckt operieren. Ein Nachteil von Glidern ist ihre geringe Mobilität.

Die WTD 71 untersucht zwei mögliche militärische Anwendungen von Glidern. Beide resultieren aus der Tatsache, dass Glider einen sehr vibrations- und geräuscharmen Antrieb verwenden. Ersteres bietet das Potential, Glider als Träger von Mikrostruktursensorik zur Detektion von Unterwasserturbulenzen, z. B. des turbulenten Kielwassers von UUVs oder Ubooten, zu verwenden. Aufgrund von Letzterem bietet es



Abb. 1: Der Slocum Glider der WTD 71 während eines auf See durchgeführten Tauschs von Hydrofonen. Bei diesem Glider ist das akustische Aufzeichnungssystem OceanObserver in den Glider integriert. Im Bild eingebettet ist das offizielle REPMUS24-Logo



Abb. 2: Einer der beiden Glider von TWR. Bei beiden TWR-Glidern war der OceanObserver auf dem Glider montiert. Im Rahmen der Auswertung werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Konfigurationen untersucht (z. B. Strömungswiderstand, akustisches Eigengeräusch, Wartungsfreundlichkeit)

sich an, Glider mit empfindlicher akustischer Sensorik auszustatten, d. h. als Mittel zur akustischen Unterwasser-Seeraumüberwachung einzusetzen. 2024 stand die Akustik im Fokus des Glider-Teams der WTD 71.

Im September 2024 hat die WTD 71 mit zwei Slocum-Glidern des Herstellers Teledyne Webb Research (TWR) an der von der portugiesischen Marine geführten NATO-Übung „Robotic Experimentation and Prototyping Maritime Unmanned Systems (REPMUS) 24“ teilgenommen. REPMUS 24 ist die derzeit weltweit größte maritime Übung für Versuche mit unbemannten Fahrzeugen. Insgesamt 11 Glider von Firmen und Instituten verschiedener Nationen waren bei REPMUS 24 zeitgleich im Einsatz. Ein Slocum Glider der WTD 71 (Abb. 1) sowie zwei von TWR (Abb. 2) waren mit jeweils vier Hydrofonen (Abb. 2) und dem akustischen Aufzeichnungssystem OceanObserver der Firma JASCO Applied Sciences ausgestattet. Die Verwendung mehrerer Hydrofone ermöglicht eine akustische Richtungsbildung.

Mit diesen drei Glidern wurde untersucht, inwieweit sich ein Schwarm von Glidern für eine akustische Seeraumüberwachung eignet. Die Aufgabe der Glider bestand darin, von anderen UUVs ausgesendete akustische Signale zu erfassen (inklusive deren Richtung), dabei vorab festgelegte Signale zu detektieren und diese Detektionsereignisse per Satellitentelemetrie zu übermitteln. Hierbei muss betont werden, dass die Detektionsalgorithmen im OceanObserver selbst implementiert sein müssen, da wegen der geringen Bandbreite der Satelliten-Telemetrie nur Detektionsergebnisse übertragen werden können, aber nicht die akustischen Rohdaten. Die Detektionsergebnisse (sofern vorhanden) wurden beim Auftauchen der Glider zusammen mit

anderen Daten wie Status, Position, ozeanografischen Daten, usw. in das von der Firma Blue Ocean Marine Tech Systems entwickelte Lagebildtool SeaSuite (Abb. 3, 4) übertragen und von hier aus mittels des Collaborative Autonomy Tasking Layer (CATL) Protokoll in die verschiedenen bei REPMUS 24 verwendeten operationellen Lagebildanwendungen übermittelt.

Aus operationeller Sicht ist besonders interessant, dass bei REPMUS 24 zum ersten Mal das von JASCO implementierte und getestete „Surface-On-Detect“-Verhalten der Glider demonstriert wurde. Dessen Ziel ist die möglichst zeitnahe (near-real-time) Übermittlung eines Detektionsereignis in das operationelle Lagebild, indem der Glider vorzeitig das Signal zum Auftauchen erhält, sobald eine Detektion stattgefunden hat.

Nach derzeitiger Bewertung sind Glider prinzipiell für eine passive akustische Seeraumüberwachung einsetzbar, wegen ihrer geringen Mobilität und der Latenz der Datenübertragung allerdings vermutlich weniger als taktisches Einsatzsystem, sondern eher als Mittel zur strategischen Langzeitüberwachung bzw. als Frühwarnsystem.



Abb. 3: Nahezu-Echtzeit-Lagebildkarte in SeaSuite vom 18. Sept. 2024 mit Positionen und Tracks der drei Glider, sowie mit Richtungsanzeigen der akustischen Detektion des laufenden Tages. Alle drei Glider scheinen ein akustisches Ziel in demselben Gebiet detektiert zu haben

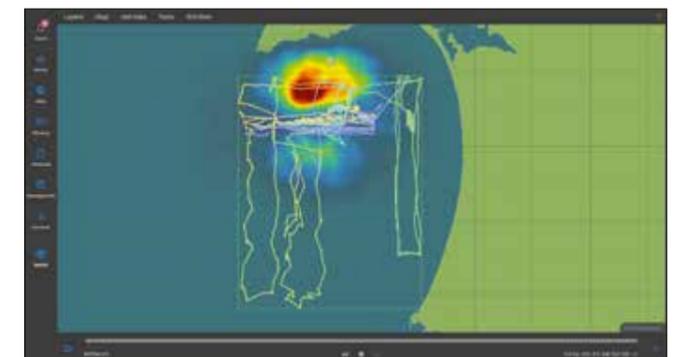


Abb. 4: SeaSuite Re-Play-Darstellung der Tracks aller Slocum-Glider im gesamten Einsatzzeitraum vom 11. bis 24. September 2024. Die drei Akustik-Glider bewegten sich vornehmlich auf den Ost-West ausgerichteten Tracks und die akustischen Ziele befanden sich in dem rötlichen Bereich nördlich der Glider

ORR Dr. Holger Schmaljohann
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe, Marinewaffen, Maritime Technologie
und Forschung (WTD 71)
Eckernförde

wtd71posteingang@bundeswehr.org

Synthetisches Apertur Sonar – mehr als ein besseres Seitensichtsonar

Kommerziell verfügbare Synthetische Apertur Sonare (SAS) wurden mit dem Ziel entwickelt, Nachteile des klassischen Seitensichtsonars zu umgehen. Dabei ermöglicht die synthetische Apertur weitere Potentiale, die im Rahmen der Forschung an der WTD 71 gemeinsam mit der Helmut Schmidt Universität Hamburg untersucht werden.

Im Rahmen der Minenjagd möchte man Objekte mit einer hohen Flächensuchleistung möglichst gut detektieren und klassifizieren. Hierfür bieten sich Seitensichtsonarsysteme an. Diese bilden einen Bereich querab zur Seite der Fahrtrichtung des Sensorträgers ab. Jedoch gibt es bei diesem Sensor mehrere Limitierungen. Für eine gute Winkelauflösung bedarf es einer hohen Frequenz. Steigt diese, nimmt die Dämpfung des Schalls im Wasser zu und somit die Flächensuchleistung ab. Zudem führt die konstante Winkelauflösung hinsichtlich der Erkennung von Objekten auf dem Meeresboden dazu, dass die Detektions- und Klassifikationsleistung des Systems ebenfalls entfernungsabhängig ist.

Dieses kann umgangen werden, wenn man ein Sonar mit einer synthetischen Apertur verwendet. Eine erfolgreiche Umsetzung dieses aus der Radartechnik bekannten Verfahrens gelang allerdings erst zirka 50 Jahre nach der Realisierung eines synthetischen Apertur Radars. Seit der ersten Realisierung wurde das SAS so weiterentwickelt, dass es mittlerweile von diversen Firmen angeboten wird. Die Auflösung eines solchen SAS ist entfernungsunabhängig, kann bei niedrigeren Fre-

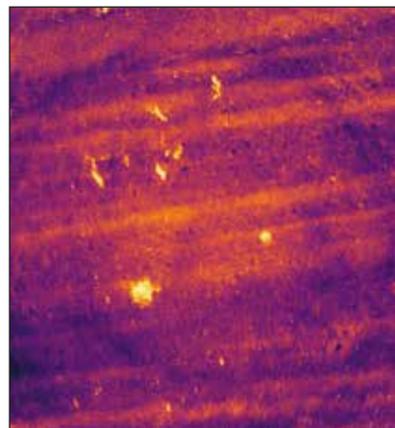


Abb. 1: Zirkulares SAS-Bild basierend auf einem hochfrequenten Sonarsignal

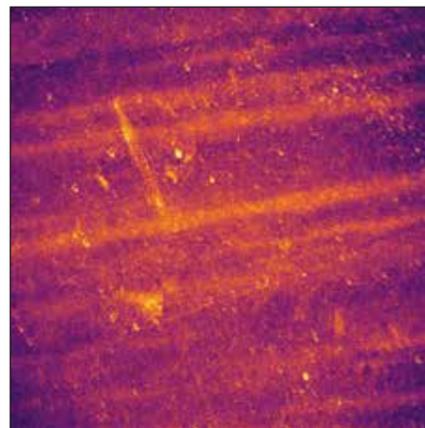


Abb. 2: Zirkulares SAS-Bild derselben Szene basierend auf einem niederfrequenten Sonarsignal

quenzen betrieben werden, was die Flächensuchleistung steigert, und ist in dem Sinne ein besseres Seitensichtsonar.

Mit der kommerziellen Verfügbarkeit solcher Systeme könnte man deren Entwicklung als abgeschlossen ansehen. Bei genauerer Betrachtung ergeben sich aber durch die synthetische Apertur weitere Möglichkeiten. Beispielsweise wird die Freiheit in der Wahl des Frequenzbandes zwar für die Erhöhung der Reichweite bzw. der entfernungsunabhängigen Auflösung im Vergleich zum konventionellen Seitensichtsonar genutzt, jedoch verwenden nahezu alle aktuellen SAS lediglich ein Frequenzband. Es wird dabei außer Acht gelassen, dass die Rückstreu- als auch die Propagationseigenschaften des Schalls an Objekten und insbesondere bei weichem Sediment frequenzabhängig sind. Weiterhin bedarf es beim konventionellen Seitensichtsonar einer möglichst geradlinigen Bewegung, um Verzerrungen in dem Sonarbild zu vermeiden. Dies ist beim Verwenden einer synthetischen Apertur per se nicht der Fall, da hier für die Bildgebung die Bewegungs- und Orientierungsänderungen berücksichtigt werden. So lassen sich zum Beispiel zirkuläre Missionen realisieren, um die Abbildung der Objekte noch weiter zu verbessern.

Abb. 1 zeigt Bilddaten einer zirkulären Mission eines synthetischen Apertur Sonars von einer Größe von 25 m x 25 m bei welchem der Schall an der obersten Grenzschicht zwischen Wasser und Sediment reflektiert wird. Abb. 2 zeigt die gleiche Szene bei Verwendung eines tieffrequenten Sendesignals. Hier erkennt man u. a. in der linken oberen Hälfte ein zusätzliches Objekt. Die Daten beider Bilder wurden zur selben Zeit auf demselben Fahrzeug aufgenommen. Lediglich wurde die Bildebene für die niederfrequenten Daten in Abb. 2 um 60 cm



Abb. 3: Ausschnitt der Überlagerung beider Bilddaten mit den hochfrequenten auf dem roten und den niederfrequenten Daten auf dem grünen RGB-Kanal

herabgesetzt. In diesem Fall stimmt der Durchmesser des Objektes mit der erwarteten Breite überein. Um den Unterschied besser zu verdeutlichen, wurde in der Abb. 3 die aus dem hochfrequenten Signal resultierenden Daten auf den roten RGB-Kanal und die Daten des niederfrequenten Signals auf den grünen RGB-Kanal abgelegt.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass das synthetische Apertur Sonar mehr sein kann als ein besseres Seitensichtsonar. Für die Ausschöpfung des bestehenden Potentials des SAS bedarf es jedoch eines auf die Möglichkeiten der synthetischen Apertur angepassten Designs. Dies gilt nicht nur für das Sonar, sondern insbesondere auch für die Trägerplattform, um die notwendigen Fahrprofile umsetzen zu können. So würde man beispielsweise durch eine Spiralbewegung, d. h. einer Variation in der Höhe während der Kreisfahrt, eine dreidimensionale Information erhalten und man könnte die in Abbildung 2 enthaltenen Objekte in der Vertikalen separieren. Auch wenn SAS-Systeme mittlerweile als leistungsfähige Produkte von unterschiedlichen Firmen angeboten werden, ist das Potential dieser Sensortechnologie noch lange nicht ausgeschöpft.

TORR Markus Pettinger
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik
(WTD 81)
Greding

WTD81340@bundeswehr.org

Dr. Christoph Bodensteiner
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Ettlingen

info@iosb.fraunhofer.de

Target Handoff-System und OSINT-Geolokalisierung

Es wurden existierende Verfahren zur optisch gestützten Selbstlokalisierung und Zielkoordinaten-Übergabe erweitert und zur Geolokalisierung von Bildern und Aufnahmen aus offenen Quellen (OSINT: Open Source Intelligence) untersucht. Hierzu wurden KI-gestützt 3D-Informationen aus Kartendiensten und geolokalisierten Aufnahmen extrahiert, in Lokalisierungsindizes überführt und die zu lokalisierenden Aufnahmen gegen diese registriert

In Konflikten spielen GPS-Störungen und Falschinformationen eine bedeutende Rolle. Im Krieg in der Ukraine setzen sowohl russische als auch ukrainische Streitkräfte elektronische Kampfführung ein, um die Navigations- und Kommunikationssysteme des Gegners zu beeinträchtigen. Russland nutzt hierbei GPS-Störungen, um die Präzision der gegnerischen Systeme zu verringern, und setzt gezielt Falschinformationen in öffentliche Quellen, um eigene Aktivitäten zu verschleiern.

Technologien zur bildbasierten 3D-Lokalisierung bieten eine Möglichkeit, diesen Störungen und Falschinformationen zu begegnen. Eine bildbasierte Lokalisierung wird durch Bestimmung eines gemeinsamen Koordinatensystems (Registrierung) erreicht. Dies beruht auf dem Abgleich von visuellen Informationen von Bildern mit bestehenden kartografischen, idealerweise georeferenzierten Datenbanken (Abb. 1). Es werden relevante Merkmale aus den Aufnahmen extrahiert und mit vorher erstellten und indizierten Referenzdaten verglichen. Dabei werden spezialisierte Algorithmen des maschinellen Lernens eingesetzt, um Übereinstimmungen zu erkennen und daraus die Position des aufgenommenen Bildes und deren



Abb. 1: Registrierung einer Aufnahme (Kyiv, Ukraine) mit einem erstellten 3D-Lokalisierungsindex

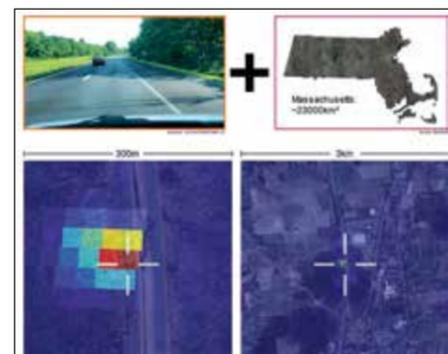


Abb. 2: Geolokalisierung eines Bildinhalts (links oben) aus öffentlicher Quelle und ohne Geoinformationen, lediglich anhand von verfügbaren Luftbildern. Es wird in der dargestellten Anwendung eine georeferenzierte Genauigkeit von unter 50 Metern – abhängig von der Qualität der Luftbilddaten – erreicht

abgebildeten Objekte präzise zu lokalisieren. Dies kann jederzeit mit weiteren Lokalisierungsverfahren wie GPS, Inertialen Messeinheiten (IMU) bzw. Visual-Inertial Odometry (VIO) und Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) kombiniert werden, um eine fortlaufende, echtzeitfähige Positionsbestimmung zu ermöglichen.

Diese Technologie erlaubt auch eine hochpräzise Ableitung von Zielkoordinaten und deren effiziente Verteilung im Verbund, einem auf optischen Daten beruhenden Target Handoff. Die benötigte Bandbreite zur Übertragung ist extrem gering, da nur einzelne Koordinaten mit Metadaten übertragen werden. Ein rein optisch gestütztes Target Handoff-System (THS), das robust gegen optische Umgebungsänderungen ist und Genauigkeiten bis unter einem Meter erreichen kann, wurde bereits demonstriert. Auch Anwendungen unter Non-Line of Sight-Bedingungen wurden bereits untersucht.

In einem weiterführenden Studienteil wurde die Anwendung dieser Registrierungsverfahren zur Lokalisierung von Bilddaten aus offenen Quellen und ohne Georeferenzierung untersucht. Dies kann die Interpretation von Aufnahmen unsicherer Herkunft als Beitrag zur Open Source Intelligence (OSINT) wesentlich vereinfachen. Es lassen sich z. B. Aufnahmen aus aktuellen Konfliktregionen räumlich zuordnen und damit zur militärischen Aufklärung und zur Prüfung der behaupteten Bildinhalte und Aufnahmeorte – und damit zur Erkennung von Falschbehauptungen oder so genannter Fake-News – beitragen.

Hierzu wurden u. a. mit photogrammetrischen Methoden die Datenindizierung und der Aufbau einer Lokalisierungsdatenbank rein aus offenen Karten und Quellen wie Mapillary

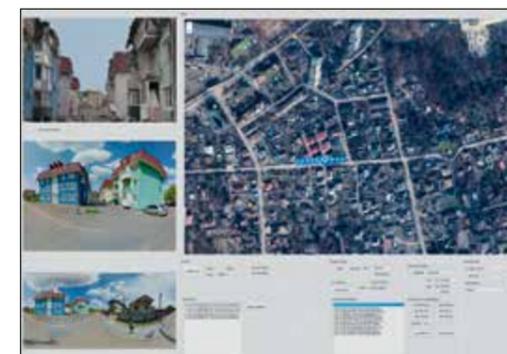


Abb. 3: Beispiel für die Lokalisierung eines Bildes (oben links) aus der Region Butscha in der Ukraine auf Basis von öffentlich zugänglichen Bilddaten

oder anderweitig bekannten bzw. zuordbaren Bild- und Videodaten vorgenommen (Abb. 2) bzw. vorhandene georeferenzierte Indizes ergänzt. Es wurden also aus öffentlichen Daten dreidimensionale Modelle generiert, die wiederum zur Lokalisierung von Aufnahmen aus offenen Quellen eingesetzt werden können (Abb. 3).

Die für nicht lokalisierte Aufnahmen entwickelten, KI-gestützten Algorithmen übernehmen die Bildregistrierung gegen die teilweise sehr große Lokalisierungsindex-Datenbank. Mit diesen automatischen, KI-gestützten Verfahren konnte nun mit sehr hoher Zuverlässigkeit die korrekte Geolokalisierung von Social Media-Bild- und Videodaten festgestellt werden (Abb. 4).

Eine OSINT-Analyse kann zudem mit textuellen Bildbeschreibungen angereichert werden. Auf die Verknüpfung von Bild- und Textdaten trainierte Multimodale Foundation-Modelle können Informationen aus beiden Modalitäten – visuelle und textuelle Daten – miteinander kombinieren. Komplexe Zusammenhänge zwischen Bildern und Beschreibungen können maschinell erfolgen und Beiträge für eine präzise Bestimmung von Standorten ermöglichen.



Abb. 4: Beispiel für eine 3D-Rekonstruktion (unten links) und Lokalisierung von Bildinhalten (oben) aus der Region Butscha in der Ukraine auf Basis von öffentlich zugänglichen Bilddaten

TORR Stefan Kossenjans
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91)
Meppen

WTD91posteingang@bundeswehr.org

TRDir Armin Sternberg
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91)
Meppen

WTD91posteingang@bundeswehr.org

Laserwaffensystem MILOS-D: Hochpräzise und kostengünstige Wirkung für landgestützte Kräfte und Spezialkräfte

Der militärische Einsatz von Lasern als Effektor bringt signifikante Vorteile: Neben der Kosteneffizienz, Präzision und Skalierbarkeit entfällt auch die Munitionsbevorratung. Auch kleine, tragbare Laserwaffensysteme (LWS) wie das von MBDA Deutschland in Abstimmung mit der Amtsseite entwickelte MILOS-D (Modular Integrated Laser Optic System – Dismounted) bieten hohes Einsatzpotenzial für landgestützte Kräfte.

Der Einsatz von LWS in der Wehrtechnik eröffnet ein breites Anwendungsspektrum über alle Truppengattungen hinweg. In enger Abstimmung mit dem Heer, dem BAAINBw und der WTD 91 wurde durch die Fa. MBDA Deutschland mit dem MILOS-D ein mobiles LWS entwickelt, welches tragbar oder abgesessen (Abb. 1) betrieben werden kann, um die Möglichkeiten der militärischen Kriegsführung deutlich zu erweitern.

Das Anwendungsspektrum von MILOS-D ist in der aktuellen Ausbaustufe primär für die verdeckte Bekämpfung von Infrastrukturen, die Öffnung von Sperren, das Schaffen von Zugängen oder die Auslösung von Minen ausgelegt.

Daraus ergibt sich ein Zielspektrum, das statische Ziele wie Drahtsperrungen, elektrooptische Sensoriken, Antennenstrukturen oder Minen (IEDs) umfasst. In der Regel ist das Schaffen von Zugängen nicht zeitkritisch, daher lag der Fokus bei der Konzeption des Systems zunächst auf niedrigem Gewicht und sekundär auf der Bekämpfungszeit. Im abgesessenen Einsatz soll das System von zwei bis drei Soldaten trag- und bedienbar sein.



Abb. 1: Erprobungsmuster MILOS-D bestehend aus Lasereffektor, Richteinheit, Dreibeinstativ, Laserquelle, Batterie und Tablet



Abb. 2: Lasereffektor mit Richteinheit aufgebaut auf UGV-Selbstfahrplattform Rovo

TRAR Richard Warczok
Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik
und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw)
Koblenz

BAAINBwPosteingang@bundeswehr.org

Kritische technologische Fragestellungen bei der Entwicklung eines derartigen LWS betreffen die Präzisionsfähigkeit, Systemkomplexität, Bedienbarkeit sowie die Schnittstellen. Zur Sicherstellung der Präzisionsfähigkeit beim Einsatz gegen statische Ziele in Bodennähe ist der Einfluss turbulenter Luftmassen eine besondere Herausforderung. Für den autarken Laserbetrieb ist es zudem notwendig, sehr kurzfristig elektrische Maximalleistung bereitzustellen.

Das aktuelle Erprobungsmuster wirkt mit 3000 W Leistung auf Distanzen bis zu 1 km. Die Bedienung erfolgt über ein Tablet. Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen ermöglichen den sicheren Betrieb des LWS. Die Verwendung von modularen Bauteilen und standardisierten Schnittstellen stellt Synergien bei der Entwicklung sowie im logistischen Konzept sicher. Die gemeinsame Technologiebasis wurde im Rahmen von F&T-Aufträgen bereits erarbeitet. Darüber hinaus ist die Nutzung des Lasereffektors auf einer Selbstfahrplattform bereits möglich (Abb. 2).

MILOS-D ist die erste Ausprägung einer mehrstufigen Systemfamilie mit Lasereffektoren unterschiedlicher Leistungsklassen zur Abdeckung der Anforderungen des Heeres. Ausgehend von einem ersten Labormuster hat die Firma MBDA Deutschland das mobile LWS iterativ ausgebaut. In 2024 wurde das Erprobungsmuster vorgestellt, das erstmals von geschultem Personal



Abb. 3: Erprobungsaufbau des MILOS-D auf der Test- und Versuchseinrichtung für Hochenergielaser (TuVHEL) an der WTD 91

Dipl.-Ing. Christian Wennesz
MBDA Deutschland
Schrobenhausen

communications@mbda-systems.de

der WTD 91 eigenständig betrieben werden kann und damit eine umfangreiche Erprobung innerhalb der Bundeswehr erlaubt (Abb. 3).

In mehreren Kampagnen konnte das System seine Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen – zuletzt im Rahmen der „Experimentalserie Land“, in dem die Anwendbarkeit aus operationellen Gesichtspunkten betrachtet wurde und erstmalig ein LWS auf einem Truppenübungsplatz in einer taktischen landbasierten Operation eindrucksvoll eingesetzt wurde (Abb. 4). Die gewonnenen Erkenntnisse zum Transport und zur Nutzung fließen in die weitere Entwicklung des Systems ein.

Mit der aktuellen Ausbaustufe konnte bereits ein weiterer wichtiger Meilenstein zur Entwicklung und Einführung von LWS in die Bundeswehr geschaffen werden. Kommende Arbeiten sollen vor allem eine signifikante Leistungssteigerung, die Realisierung der Bekämpfung bewegter Ziele wie Drohnen mittels Grob- und Feintracking sowie die Nutzung des Lasereffektors auf einem UGV zur Bekämpfung aus der Bewegung heraus umfassen, womit das militärische Anwendungsspektrum nochmals erweitert werden wird.



Abb. 4: Einsatz des LWS in einem militärisch taktischen Übungsszenario; Soldaten des Heeres bedienen das Erprobungsmuster beim Öffnen von Sperren

3

Wehrmedizinische Forschung und Militärpsychologische Forschung

Auch im Jahr 2024 haben Ressortforschungseinrichtungen und Krankenhäuser des Sanitätsdienstes der Bundeswehr erneut vielfältige Forschungsarbeiten geleistet, um die Gesundheit der Soldatinnen und Soldaten in vielfältigen Situationen schützen und wiederherstellen zu können.

Das Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz stellt das vom Europäischen Verteidigungsfonds (EVF) geförderte Drittmittel-Vorhaben iMEDCap vor, bei dem zivile und militärische Partner gemeinsam eine Fähigkeit zur Rettung Verwundeter mit autonomen Luft- oder Landfahrzeugen entwickeln.

Mit lebensbedrohlichen bakteriellen Resistenzen setzt sich das Bundeswehrkrankenhaus Berlin auseinander und stellt Bakteriophagen, spezielle Viren, die ausschließlich Bakterien befallen, als neue therapeutische Option vor.

Die Tropenmedizin des Bundeswehrkrankenhauses Hamburg entwickelt und validiert ein einsatztaugliches System zum Nachweis von Malaria-Erregern in den sie übertragenden Insekten, sog. Vektoren.

Das Institut für Radiobiologie der Bundeswehr konnte Auswirkungen auf die Genexpression schon durch niedrige Strahlendosen, z. B. in der Röntgen-Computertomographie, nachweisen und unterstreicht damit die Bedeutung von Strahlenschutz auch in der medizinischen Diagnostik.

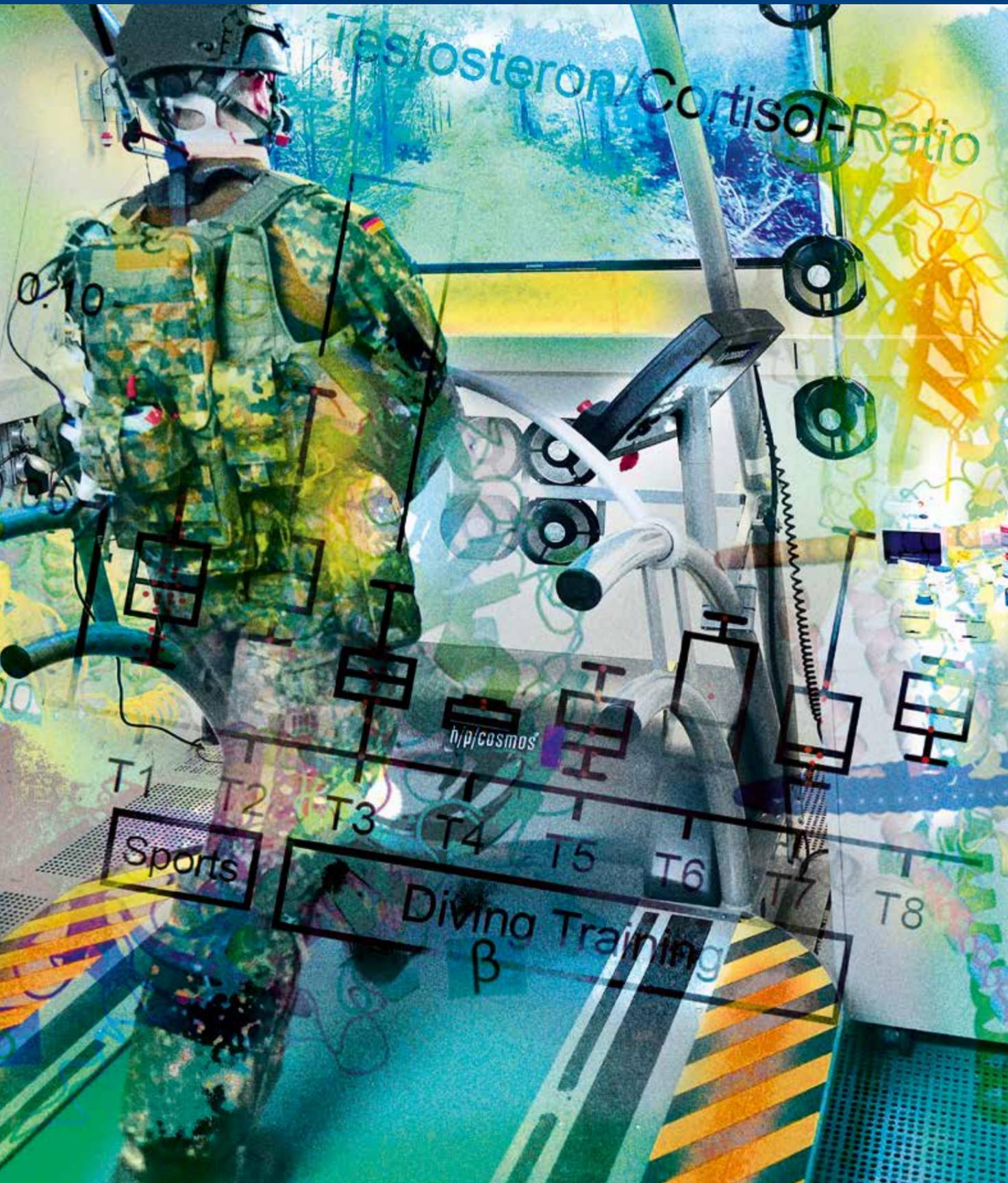
Das Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr beschreibt Methoden zum Nachweis und zur molekularen Charakterisierung des bakteriellen Erregers *Francisella tularensis*, der sowohl in natürlichen Ausbrüchen auftritt, aber auch als potentielle Biowaffe Grund zur Besorgnis ist.

Das Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr beschreibt die Entwicklung neuer Wirkstoffe gegen Nervenkampfstoff-Vergiftungen vom molekularen Design bis zur Erprobung in Gewebe-Modellen.

Das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr stellt seine Untersuchungen zum Erhalt der Einsatzfähigkeit bei Märschen vor. Das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe untersucht die Dauer der Auswirkungen eines Simulatortrainings auf das Gleichgewichtsorgan als Beitrag zur Flugsicherheit. Das Schiffahrtsmedizinische Institut der Marine setzt sich mit der Kampfschwimmerausbildung auseinander, einschließlich eines neuen Ansatzes zur Reduzierung unnötiger Abbrüche der Ausbildung.

Die wehrmedizinische Forschung beschreitet somit sowohl thematisch als auch hinsichtlich der Forschungsförderung durch nationale und europäische Drittmittel konsequent innovative Wege, um einem leistungsfähigen Sanitätsdienst in einer kriegstüchtigen Bundeswehr optimale Fähigkeiten zum Schutz der Gesundheit der Soldatinnen und Soldaten bereitzustellen.

Für den Bereich der Militärpsychologischen Forschung berichtet exemplarisch das Psychotraumazentrum am Bundeswehrkrankenhaus Berlin von einer gemeinsam mit der Universität der Bundeswehr München durchgeführten Analyse, wie viele Soldatinnen und Soldaten sich nach Einsätzen in Afghanistan, Mali oder Irak mit Symptomen einer einsatzassoziierten psychischen Störung in ärztliche Behandlung begeben haben. Als Grundlage der Analyse dienen anonymisierte Daten der sogenannten Einsatzstatistik, die im Auftrag des Kommando Sanitätsdienst der Bundeswehr seit 2010 die Vorstellungen von Betroffenen mit möglichen einsatzassoziierten Störungen in militärpsychiatrischen oder -psychotherapeutischen Einrichtungen des Sanitätsdienstes der Bundeswehr erfasst. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass Störungsbilder in Abhängigkeit der Einsätze unterschiedlich häufig diagnostiziert werden.



Oberfeldveterinär Dr. Heiner von Buttler
 Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
 München

Dr. Lydia Chitimia-Dobler
 Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
 München

InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org

InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org

Kultureller Nachweis und molekularepidemiologische Analyse von *Francisella tularensis* aus Zecken

Eine verbesserte Isolationsmethode für *Francisella tularensis* wurde entwickelt und an infizierten Zecken getestet. Mit den so gewonnen Ausbruchsisolaten sind Antibiotika-Sensitivitätstests für die Therapieberatung und hochauflösende epidemiologische Untersuchungen, z.B. für die Unterscheidung zwischen natürlichen und intentional herbeigeführten Ausbruchsereignissen, möglich.

Francisella tularensis, der Erreger der Tularämie, ist ein Gram-negatives Bakterium, das über Aerosol, Nahrung und blutsaugende Vektoren, Zecken oder Mücken, übertragen werden kann. Auf Grund der sehr geringen Infektionsdosis und der teilweise sehr schweren Krankheitsverläufe war es in der Vergangenheit Bestandteil von verschiedenen Biowaffenprogrammen. Eine weitergehende militärmedizinische Relevanz für die Tularämie ergibt sich aus Vektor-Übertragung, da durch den Aufenthalt im Freien und in der Vegetation das Expositionsrisiko steigt. Zur tiefgehenden Analyse des Erregers, sowohl um die therapeutische Behandlung von Patienten zu unterstützen, als auch um natürliche von intentionalen Krankheitsausbrüchen zu unterscheiden, ist die Anzucht des Erregers die beste Option. Hierfür können klinische Materialien vom Patienten, aber auch Umweltpollen genutzt werden. Um die Ergebnisse der Anzucht zu verbessern, wurde ein neues Medium unter Berücksichtigung von Beispielen aus der Literatur konzipiert und seine Anwendbarkeit zur Isolation von *Francisella tularensis* aus Zecken getestet. Dies wird den hohen Ansprüchen von *Francisella tularensis* u. a. durch die Beimengung von Hämoglobin gerecht und unterdrückt durch

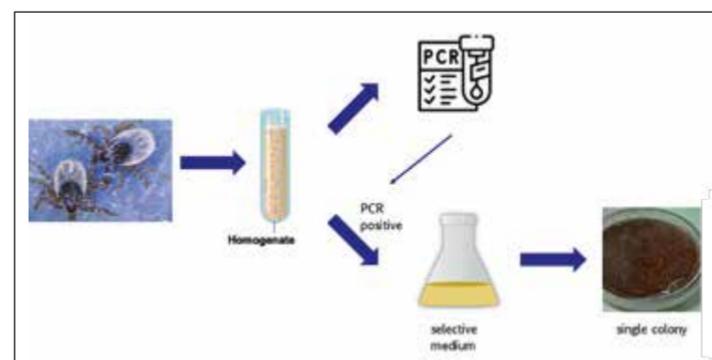


Abb. 1: Vorgehen zur Isolation von *Francisella tularensis* aus Zecken

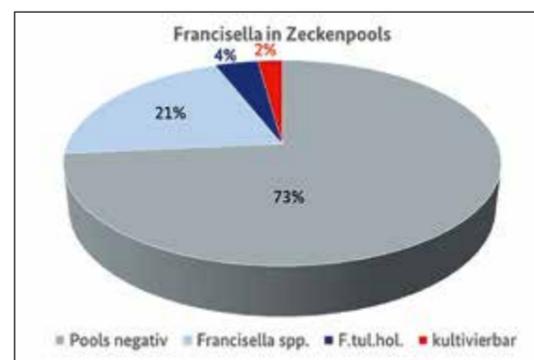


Abb. 2: Ergebnisse der Untersuchung von Zecken auf *Francisella tularensis*. In 6 % der untersuchten Zeckenpools konnte *Francisella tularensis holarctica* DNA gefunden werden. Bei 2 % der untersuchten Zeckenpools war die Isolation erfolgreich

RDir Dr. Markus Antwerpen
 Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
 München

InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org

die Zugabe geeigneter Antibiotika darüber hinaus das Wachstum von Begleitkeimen, die die Isolation ansonsten erschweren.

Um das neue Isolationsmedium an realen Proben zu testen, wurden Zecken aus einem Bereich untersucht, in dem ein Patient nach einem Zeckenstich eine Tularämie entwickelt hatte. Die Zecken wurden via PCR auf das Vorliegen von *Francisella tularensis* untersucht und anschließend Isolationsversuche mit dem neuen Medium durchgeführt. Aus Proben der Jahre 2022 bis 2024 war die Isolation erfolgreich. Anschließend wurde für alle Isolate die Empfindlichkeit gegenüber therapeutisch wichtigen Antibiotika mittels Mikrodilutionsverfahren bestimmt. Nur durch diese Testung mit isolierten Stämmen kann eine fundierte Therapieberatung für die Behandlung erfolgen. Wie zu erwarten waren die Stämme gegen alle getesteten Antibiotika sensibel. Des Weiteren wurde die DNA der Stämme präpariert und die Erbinformation sequenziert und bioinformatisch analysiert.

Hierbei konnte eine sehr enge genetische Verwandtschaft der Stämme nachgewiesen werden. Die Stämme bilden einen eigenen Cluster innerhalb der aus dem süddeutschen Raum bekannten *Francisella tularensis holarctica*. Da alle Isolate diesem Cluster angehören, konnte so ein Naturherd für *Francisella tularensis holarctica* nachgewiesen werden, also ein

	MHK (µg/ml)	Breakpoint CLSI	
Gentamicin	0,25	4	S
Streptomycin	0,5	16	S
Doxycyclin	0,125	4	S
Tetracyclin	0,125	4	S
Ciprofloxacin	0,004	0,5	S
Levofloxacin	0,25	0,5	S

Abb. 3: Ergebnisse der Antibiotika-Sensitivitätstestung. Alle Isolate waren gegen die therapeutisch eingesetzten Antibiotika sensibel

Oberfeldarzt Dr. Gerhard Dobler
 Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
 München

InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org

Bereich, in dem das Bakterium im Gleichgewicht mit seinen natürlichen Wirten (Nagetiere, Hasenartige) und den übertragenen Zecken vorkommt.

Durch diese Untersuchungen konnte eine verbesserte Methode etabliert werden, die nun genutzt werden kann, um Stämme von *Francisella tularensis* aus schwierigen Probenmaterialien zu isolieren. Diese kann bei Verdacht auf eine intentionale Ausbringung mit klinischen und Umweltpollen durchgeführt werden. Hierdurch wird die Bestimmung des Resistenzspektrums von Stämmen ermöglicht, wodurch gezielte Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Darüber hinaus können hochauflösende Analysen z. B. des Genoms der Stämme Hinweise auf den natürlichen oder nicht-natürlichen Ursprung des auslösenden Agens geben.

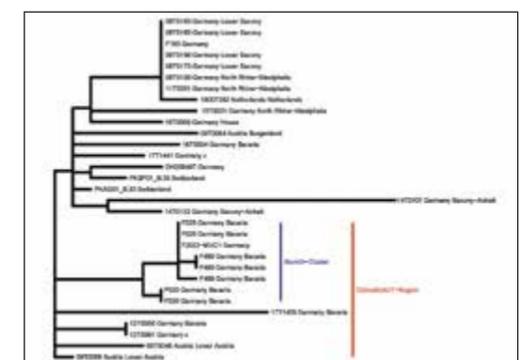


Abb. 4: Phylogenetischer Stammbaum von *Francisella tularensis* aus Mitteleuropa. Die Isolate bilden einen eigenen Cluster (blauer Balken) innerhalb der aus dem Raum Süddeutschland / Österreich bekannten Stämme (roter Balken)

ORR Dr. Thomas Seeger
 Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr
 München

Institut fuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

Oberfeldapotheker Dr. Karin Veronika Niessen
 Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr
 München

Institut fuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

Neuartige Antidote zur Behandlung von Kampfstoffvergiftungen: Vom virtuellen Strukturvorschlag bis hin zur Testung im Gewebe

Ein möglicher Ansatz für die Entwicklung neuartiger Antidote zur Behandlung von Kampfstoffvergiftungen ist der iterative Prozess aus Molecular Modeling, zielgerichteter Synthese und pharmakologischer Testung an den entsprechenden Zielorganen. Die effiziente Kopplung dieser drei Methoden erhöht die Identifizierung aussichtsreicher Wirkstoffkandidaten.

Die Entwicklung neuartiger Antidote zur Behandlung von Kampfstoffvergiftungen stellt eine besondere Herausforderung dar. Bewährt hat sich ein Prozess aus drei Ansätzen, die iterativ ineinandergreifen. Dabei handelt es sich um virtuelle, synthesechemische und pharmakologische Methoden. Im Molecular Modeling und in der chemischen Synthese kann nicht auf Standardmethoden zurückgegriffen werden, sondern es müssen neue Strategien entwickelt werden. Das pharmakologische Screening an den Zielorganen muss mit speziellen Methoden durchgeführt werden, um die pathologischen Prozesse der Kampfstoffvergiftungen möglichst realitätsnah abzubilden.

Bei der Wirkstoffentwicklung für die Behandlung von Nerven-kampfstoffvergiftungen wird dieses iterative Konzept schon seit einigen Jahren angewendet. Die aktuelle weltpolitische Situation macht deutlich, dass Nerven-kampfstoffe mehr denn je eine essentielle Bedrohung darstellen. Äußerst kritisch sind die eingeschränkten medizinischen Behandlungsmöglichkeiten, insbesondere bei einem Massenanfall von Vergifteten. Hierfür wäre ein Antidot hilfreich, welches ein breites Wirkspektrum

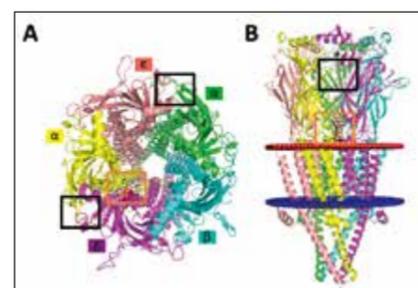


Abb. 1: Der humane Muskeltyp-nAChR vom A) extrazellulären Raum und B) von der Seite aus gesehen. Die orthosterische Bindungsstelle (Bindungsstelle des endogenen Liganden Acetylcholin) ist mit einer schwarzen Box markiert. Die orange Box zeigt die Lokalisation der neu identifizierten allosterischen Bindungsseite. Die Membran ist dargestellt mit einer roten (extrazellulären) und blauen (intrazellulären) Grenzlinie (Quelle: Kaiser et al., 2023)

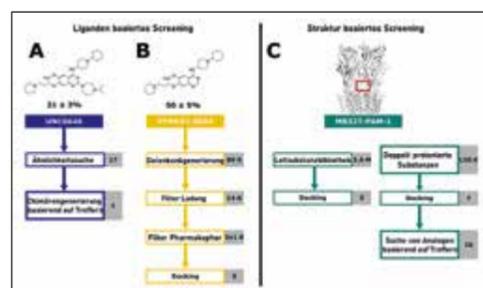


Abb. 2: Virtuelle Screening-Strategien für die Identifikation neuer rezeptoraktiver Wirkstoffe. A und B: Ligand basiertes Screening. C: Struktur basiertes Screening im humanen Homologiemodell des nAChR (Quelle: Modifizierte Abbildung aus Kaiser et al., 2024)

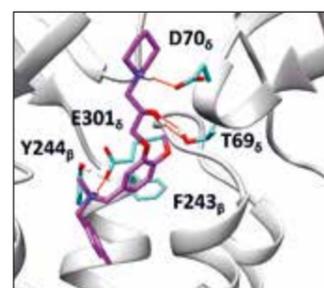


Abb. 3: Modellierter Bindungsmodus eines Wirkstoffkandidaten in der Bindungsstelle zwischen den α - und δ -Untereinheiten des humanen Muskeltyp-nAChR (Quelle: Kaiser et al., 2024)

aufweist und im Rahmen der Selbst- und Kameradenhilfe appliziert werden kann.

Nerven-kampfstoffe hemmen nach Inkorporation das essentielle Enzym Acetylcholinesterase, so dass es zur Anhäufung von Acetylcholin im synaptischen Spalt und damit zur Dysfunktion von Rezeptoren kommt. Unbehandelt führt die Vergiftung zum Tod durch Atemstillstand. Die derzeitige Therapie aus Atropin zur Behandlung der muskarinischen Symptomatik und Obidoxim zur Reaktivierung der gehemmten Acetylcholinesterase ist nicht ausreichend wirksam, wie beispielsweise bei Vergiftungen mit Soman, Tabun und Novichok. In diesen Fällen bleibt die Muskelfunktion beeinträchtigt, da die nikotinischen Acetylcholinrezeptoren (nAChR) in einem dysfunktionalen Zustand bleiben und die Reizübertragung in der neuromuskulären Endplatte ausbleibt. Ein innovativer Therapieansatz wären daher Wirkstoffe, die direkt mit diesen Rezeptoren interagieren und deren Funktion trotz bestehender Giftwirkung wiederherstellen.

Mittels Molecular Modeling wird ein humanes Homologiemodell des nAChR generiert, wobei der funktionale Rezeptorzustand in der pathologischen Situation einer Nerven-kampfstoffvergiftung wiedergegeben wird (Abb. 1). Dann wird ein virtuelles Screening durchgeführt (Abb. 2), das unter anderem auf das Docking von chemischen Strukturen in Bindungstaschen des Rezeptors beruht (Abb. 3). Die so erhaltenen Strukturvorschläge werden dann hinsichtlich einer Synthesemöglichkeit überprüft. Hierfür müssen meistens neue Synthesestrategien entwickelt werden, so dass reproduzierbar chemisch stabile Verbindungen in möglichst hoher Ausbeute hergestellt werden können. Diese chemischen Verbindungen werden in pharmakologischen Testsystemen untersucht, die einerseits verschiedene molekular-

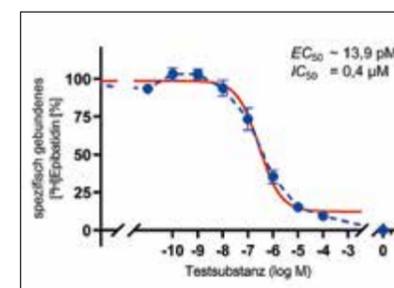


Abb. 4: Im Radioligand-Bindungssassay wird der Reporterligand $[^3\text{H}]$ Epibatidin konzentrationsabhängig durch die Testsubstanz verdrängt. Die gestrichelte Linie zeigt einen biphasischen Kurvenverlauf



Abb. 5: Multiorganbad mit 12 Myographen zur Untersuchung der Funktion von Atemmuskulatur-Präparationen verschiedener Spezies. Untersuchung neuer Verbindungen am kampfstoffvergifteten Atemmuskulatur

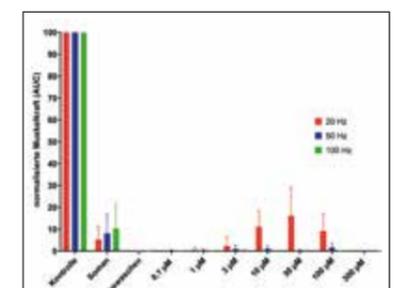


Abb. 6: Wiederherstellung der Muskelkraft nach Lähmung der Atemmuskulatur mit dem Nerven-kampfstoff Soman durch Zugabe einer Testsubstanz. Gezeigt werden die normalisierten Muskelkontraktionen der Atemmuskulatur nach indirekter elektrischer Feldstimulation

larpharmakologische Ebenen (Rezeptoren versus Gewebe) und andererseits die Vergiftung möglichst realitätsnah wiedergeben. Bei den Screeningmethoden wird der dysfunktionale Rezeptorzustand induziert und Auswirkungen der neuen Testsubstanzen auf die Affinität am Rezeptor beobachtet (Abb. 4). Bei den myografischen Messungen im Muskelgewebe werden Zwerchfellhälften aus Ratten mit Soman vergiftet und damit gehemmt und sodann auf eine mögliche Wiederherstellung der Muskel-funktion nach Zugabe der Testsubstanzen untersucht (Abb. 5 und 6).

Trotz verschiedener Testungsansätze sind sehr oft klare Korrelationen der erzielten Ergebnisse zu beobachten, was die Güte des virtuellen Screenings widerspiegelt. Nicht erwünschte Effekte können in den nächsten Schritten eliminiert werden und somit selektiv wirkende Verbindungen entwickelt werden. Die bislang erzielten Ergebnisse zeigen, dass sich in dieser äußerst speziellen Wirkstoffentwicklung der iterative Prozess aus Molecular Modeling, zielgerichteter Synthese und Screening in verschiedenen pharmakologischen Testsystemen bewährt hat.

Oberstabsarzt Leonard Stratmann
 Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
 Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
 Andernach

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

Oberstarzt Dr. Ulrich Rohde
 Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
 Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
 Andernach

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

Effizienz im militärischen Marsch: Präventivmedizinische Untersuchungen zur Beanspruchung, Ermüdung und zum Leistungserhalt beim Fußmarsch

Der Fußmarsch ist weiterhin eine relevante militärische Aufgabe, die effizient absolviert werden muss, um die Einsatzfähigkeit am Zielort zu gewährleisten. Ziel dieser Studienreihe ist es, die physiologische Beanspruchung und Ermüdung bei Märschen unter realitätsnahen Bedingungen zu messen, um die Marsch- und Versorgungsplanung präventivmedizinisch und leistungsorientiert zu optimieren.

Trotz zunehmender Technisierung der Streitkräfte bleibt der militärische Marsch eine essentielle Aufgabe von Soldatinnen und Soldaten. Dabei ist der Marsch zu Fuß ein Bestandteil eines militärischen Auftrages und muss daher mit möglichst geringer Ermüdung absolviert werden, um am Zielort einsatzfähig zu sein.

Die Belastungskenngrößen Lasten, Isolation durch Bekleidung und Ausrüstung, Terrain, Klimaeinflüsse, Strecke und Geschwindigkeit bestimmen in Verbindung mit persönlichen Leistungsmerkmalen die individuelle physiologische Beanspruchung und hieraus resultierende Ermüdung bei Märschen. Sie sind dabei in sehr unterschiedlichem Ausmaß bei der Planung eines militärischen Einsatzes steuerbar: Während der zu erfüllende Auftrag eine angepasste Bekleidung und Ausrüstung erfordert, können Klimaeinflüsse in der Planung nur begrenzt beeinflusst werden, z. B. durch die gewählte Tageszeit. Dahingegen können Vorgesetzte bei der Einsatzvorbereitung durchaus die Marschgeschwindigkeit beeinflussen, indem sie eine längere Marschdauer von Beginn an einplanen.

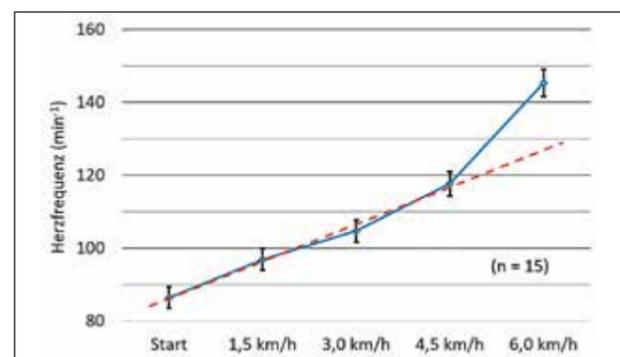


Abb. 1: Stufenförmiger Marschtest auf einem Laufband (beginnend mit 1,5 km/h und Steigerung je Stufe (240 s) um 1,5 km/h bis 6 km/h mit einer Gesamtlast von Bekleidung und Ausrüstung von ca. 31,3 kg). Bei der Steigerung von 4,5 km/h auf 6 km/h ist im Vergleich ein überproportionaler Anstieg der Herzfrequenzen (Mittelwert und Standardfehler) zu beobachten



Abb. 2: Vor-Ort-Tätigkeitsanalyse mit Erfassung leistungsphysiologischer Parameter bei einem exemplarischen Fußmarsch von Infanteristen mit einer Gesamtlast von jeweils 32 kg (Bekleidung, Ausrüstung und Bewaffnung) mit 4,5 km/h und 6,0 km/h Marschgeschwindigkeit

OTL Nils-Alexander Simon
 Kommando Heer / Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
 Andernach

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

Eigene Marschuntersuchungen mit Lasten zeigten, dass bei einer Steigerung der Geschwindigkeit um jeweils 1,5 km/h die Beanspruchung beim Wechsel von 4,5 km/h auf 6 km/h überproportional anstieg (Abb. 1 und 2). 6 km/h entspricht der geforderten Geschwindigkeit für den jährlich verpflichtenden Marschtest über 6 km in der Bundeswehr.

Informationen über den Einfluss von Lasten, Klimaeinflüssen und Geschwindigkeiten bei einem Marsch auf die Leistungs- und Thermophysio-logie könnten Vorgesetzten eine bessere Planung ermöglichen und als Hilfe dienen, bereits vorab die potentiellen Folgen einer Belastung im Hinblick auf Ermüdung, Erschöpfung, Regeneration, Energie- und Flüssigkeitsbedarf abzuschätzen. Die Studienreihe soll daher einen Beitrag leisten, die komplexen Wechselwirkungen von Einflussfaktoren auf das Ausmaß der körperlichen Beanspruchung zu überprüfen.

Hierzu sollen bei einsatznahen, mehrphasigen Marschtests auf einem Laufband in einer Umweltsimulationskammer leistungs-, thermo- und ernährungsphysiologische Parameter sowie kognitive Leistungsparameter erfasst werden, um die Auswirkungen unterschiedlicher Marschgeschwindigkeiten (jeweils 6 km Marschstrecke mit 4,5 km/h bzw. 6,0 km/h) auf Beanspruchung und Ermüdung zu vergleichen.

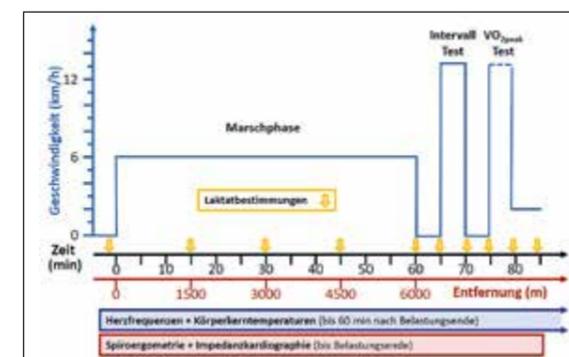


Abb. 3: Darstellung der Belastungsphasen des Marsch-Last-Tests mit 6 km/h

Oberstarzt PD Dr. Manuela Andrea Hoffmann
 Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
 Andernach

InstPraevMedBw@bundeswehr.org

Der Marschtest gliedert sich in die Phasen (Abb. 3):

- i) 6 km Marschphase
 - ii) Intervalltest (Simulation der ersten Phase eines „überschlagenen Ausweichens“ durch fünf Sprints mit 13 km/h und je 15s Pause)
 - iii) Ausbelastungstest (zur Ermittlung der VO₂-Peak)
- Die Phasen ii) und iii) dienen der Operationalisierung der Auswirkungen von i) hinsichtlich Beanspruchung und Ermüdung.

Die Tests sollen in einer Umweltsimulationskammer mit zwei unterschiedlichen Temperaturen (15° C und 25° C) und zwei Bekleidungs- und Ausrüstungsvarianten (Gesamtlast von 32 kg und 40 kg), basierend auf dem Kampfbekleidungssatz, durchgeführt werden (Abb. 4). Die beschriebenen Phasen und dabei erhobenen Parameter lassen sich der Abb. 3 entnehmen.

Die Erkenntnisse sollen die Grundlage einer anwendungsorientierten Planungshilfe für die Truppe bilden, die es den militärischen Vorgesetzten vor Ort erlauben soll, Märsche unter präventivmedizinischen und Leistungsaspekten besser vorbereiten zu können. Durch die erstmalige Erprobung der Impedanzkardiographie unter militärischen Belastungsbedingungen im Rahmen unserer Laboruntersuchung lässt sich zudem das Potenzial dieser Methode für zukünftige Felduntersuchungen evaluieren.



Abb. 4: Entwicklung des Marsch-Last-Tests in der Umweltsimulationskammer

Oberstabsarzt Laura Kubitscheck
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
München

RDir PD Dr. Reinhard Ullmann
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
München

Oberstabsarzt Prof. Dr. Matthias Port
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

Routine-CT-Diagnostik führt zu strahlenspezifischer Genaktivierung in peripheren Blutzellen

Die Computertomografie (CT) trägt maßgeblich zur medizinisch bedingten Strahlenbelastung bei, welche epidemiologisch nicht erfasst, jedoch durch radiobiologische Untersuchungen evaluiert werden kann. In dieser translationalen *in-vivo*-Studie konnten wir die dosisabhängige Deregulationen zellulärer Prozesse bestätigen, was die Bedeutung strahlenschutzoptimierter Diagnostik unterstreicht.

Die Computertomografie ist in Deutschland ein etabliertes Mittel der bildgebenden Diagnostik. Das breite Anwendungsspektrum spiegelt sich auch in den kontinuierlich steigenden Untersuchungszahlen wider. Trotz verbesserter Technik und hohen Standards im Strahlenschutz führt dies jedoch dazu, dass die medizinisch bedingte Strahlenbelastung der Individuen zunimmt. Die möglichen Effekte von Strahlung auf den menschlichen Körper sind daher nicht außer Acht zu lassen, insbesondere hinsichtlich Langzeitrissen wie der Entwicklung von Tumoren.

In früheren *ex-vivo*-Studien konnten wir zeigen, dass schon niedrige Strahlendosen zu intrazellulären molekularbiologischen Veränderungen führen. Ziel dieser Studie war es daher, diese Erkenntnisse in einem klinischen Setting mit *in-vivo*-Exposition zu evaluieren, um die Übertragbarkeit auf den in der medizinischen Diagnostik typischen Niedrigdosisbereich zu prüfen. Zu diesem Zweck bündelten wir die Expertisen des Institutes für Radiobiologie der Bundeswehr sowie der beiden Kliniken für Urologie und für Radiologie und Neurologie des Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz.



Abb. 1: Photon-Counting-CT der neuesten Generation (Naeotom Alpha) der Firma Siemens Healthineers in der Notaufnahme des Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz

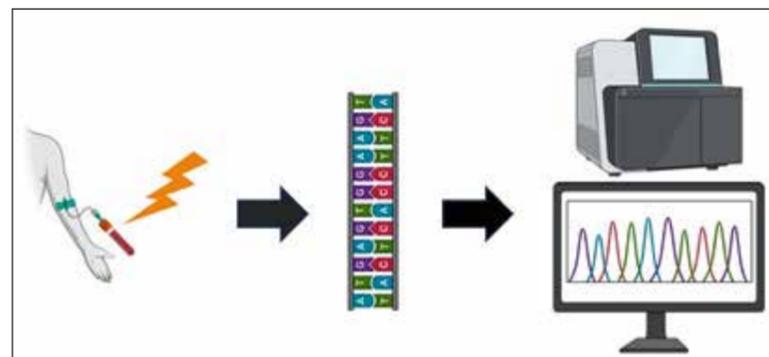


Abb. 2: Schematische Darstellung der Methodik: Die Blutentnahme erfolgte jeweils unmittelbar vor und nach der CT-Untersuchung. Anschließend wurden die Proben so aufbereitet, dass die DNA im Hochdurchsatzverfahren sequenziert werden konnte

Oberstabsarzt Dr. Hanns Leonhard Kaatsch
Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz
Klinik für Radiologie und Neuroradiologie
Koblenz

Oberfeldarzt PD Dr. Benjamin Valentin Becker
Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz
Klinik für Radiologie und Neuroradiologie
Koblenz

Oberstabsarzt PD Dr. Stephan Waldeck
Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz
Klinik für Radiologie und Neuroradiologie
Koblenz

BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org

BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org

BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org

Vierzig Probanden, die sich einer Mikrohämaturiediagnostik mittels Abdomen-CT unterzogen, wurde jeweils unmittelbar vor und nach der Untersuchung Blut entnommen und dieses für 6 h bei 37 °C inkubiert. Anschließend wurde die RNA der Leukozyten so aufbereitet, dass sie im Rahmen einer genomweiten Hochdurchsatzsequenzierung mittels bioinformatischer Prozesse analysiert werden konnte.

Die im Median applizierte Dosis betrug 6,55 mGy (gewichtsabhängige Dosis, CDTIvol: 3,75 – 26,95 mGy). Alle Proben vor der CT-Exposition eines jeden Probanden waren Teil der Dosisgruppe „prae“ (0 mGy; n = 40), alle Proben nach CT-Exposition Teil der Dosisgruppe „post“ (3,75 – 26,95 mGy; n = 40). Zusätzlich wurden die Probanden entsprechend ihrer individuell applizierten Dosis in die drei weiteren Dosis-Untergruppen „low“ ($\leq 6,55$ mGy; n = 20), „medium“ ($> 6,55$ mGy; n = 16) und „high“ (high ≥ 12 mGy; n = 4) kategorisiert.

Angesichts der niedrigen Dosis dominierten die interindividuellen Unterschiede und nicht die strahleninduzierten Effekte im Genexpressionsprofil eines jeden Probanden. Durch weiterführende bioinformatische Analyse konnten jedoch sieben Gene mit signifikanter Hochregulation nach Exposition identifiziert werden. Sechs der sieben Gene (*EDA2R*, *AEN*, *FDXR*, *DDB2*, *PHLDA3*, *MIR34AHG*) werden dosisabhängig exprimiert und

sind funktionaler Teil von TP53-gesteuerten DNA-Reparaturprozessen, was sich ebenfalls in der Analyse der biologischen Signalwege zeigte: Die Reaktion auf DNA-Schäden und deren Reparatur sowie der Zellmetabolismus standen im Vordergrund. Das siebte Gen (*RYR3*) wurde in nur 3 der 40 Probanden vermehrt exprimiert. Dies legt nahe, dass die CT-assoziierte Hochregulation von störenden, Probandengruppen-spezifischen Faktoren abhängt und *RYR3* daher keinen allgemeinen Biomarker für eine low-dose-Exposition darstellt.

In dieser Studie konnten unsere bisherigen *ex-vivo*-Daten erfolgreich *in vivo* reproduziert werden, was die CT als geeignetes Modell für die Detektion einer low-dose-Strahlenexposition beim Menschen im Rahmen der Biodosimetrie mittels Biomarkern hervorhebt. Die Ergebnisse betonen außerdem die Notwendigkeit zwischen diagnostischem Nutzen und dem damit verbundenen Strahlenrisiko abzuwägen und unterstreichen den Grundsatz des ALARA-Prinzips („As low as reasonably achievable“): Der Patient sollte stets so wenig Dosis wie möglich ausgesetzt werden.

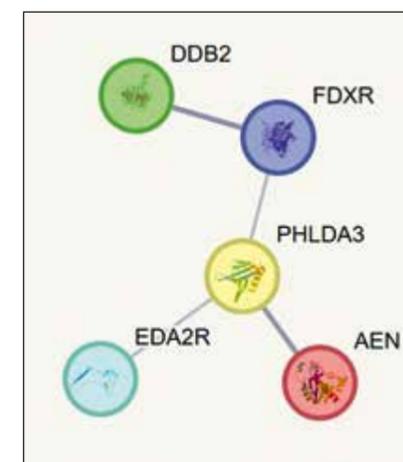


Abb. 3: Darstellung des funktionalen Zusammenhanges von fünf der sieben identifizierten Gene via string-Databse. *MIR34AHG* ist als long non-coding RNA nicht miterfasst. *RYR3* steht in keinem direkten funktionalen Bezug zu den übrigen Genen. Die Liniestärke repräsentiert die Signifikanz der Gen-Interaktion

Oberfeldarzt Prof. Dr. Stefan Sammito
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe
Köln

LtCol Dr. Erik Frijters
Aerospace and Operational Physiology, Royal Netherlands Air Force
Soesterberg, Niederlande

ZentrLuRMedLwI3ForschungErprobung@bundeswehr.org

aerospace.physiology@mindef.nl

Simulatorkrankheit – Wie lange beeinflussen Trainingseinheiten im Simulator die Flugeignung und Performance von NH90-Pilotinnen und Piloten?

In einer bilateralen Studie untersucht das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe mit der niederländischen Organisation für Angewandte Forschung bei NH90-Pilotinnen und Piloten, wie lange ein Simulatortraining auf das Gleichgewichtsorgan und auf die Flugeignung nachwirkt. Dies ist von hoher einsatzrelevanter Bedeutung vor dem Hintergrund der Zunahme von Simulatortrainingseinheiten.

Militärische Pilotinnen und Piloten absolvieren einen Teil ihrer Aus- und Weiterbildung sowohl im realen Flug als auch in einem Simulator. Simulatortraining bietet zahlreiche Vorteile, neben dem sicheren Üben von Risikosituationen sind sie im Verhältnis zur Trainingszeit deutlich kostengünstiger und können in der Regel in größerer Zahl zur Verfügung gestellt werden.

Flugsimulatoren unterscheiden sich in der Art der Nutzung und der dargestellten Simulationsumgebung. Von einfachen Flugsimulatoren mit Computermonitoren und einfachen Steuerelementen gibt es größere Versionen mit Full-Mission-Cockpits und 180 – 360°-Bildschirmanzeigen bis hin zu 3D-beweglichen Cockpit-Plattformen (Abb. 1).

Allen Simulatoren ist gemeinsam, dass es zu einem Ungleichgewicht zwischen den eingehenden Informationen aus dem visuellen und vestibulären System kommen und zu einer Simulatorkrankheit führen kann. Die Ausprägung der Simulatorkrankheit ist dabei abhängig von der Reizintensität der widersprüchlichen Informationen, weshalb statische Simula-



Abb. 1: Simulatortraining im NH90-Simulator



Abb. 2: NH90-Hubschrauber im Realflug
(Quelle: Bundeswehr / Carsten Schulz)

LtCol (R) Dr. Olaf Binsch
Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO)
Soesterberg, Niederlande

info@tno.nl

toren mit ausschließlich visuellen Flugeindrücken oft die größten Auswirkungen auslösen können.

Sowohl die Symptome der Simulatorkrankheit als auch die Dauer sind von Person zu Person unterschiedlich. Ein aktiver Flugdienst nach einem Simulatorflug ist daher erst nach Ablauf einer Karenzzeit möglich. Bislang gibt es jedoch kaum wissenschaftliche Daten darüber, wie lange die Symptome der Simulatorkrankheit andauern und wie dies die Fähigkeit zum aktiven Flugdienst beeinträchtigt. Tendenziell ist davon auszugehen, dass Piloten zukünftig einen größeren Anteil von Flugstunden im Simulator absolvieren werden, gleichzeitig aber die Einsatzfähigkeit gegeben sein muss.

In direkter bilateraler Zusammenarbeit wurde daher vom Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe in Köln mit der niederländischen Organisation für Angewandte Forschung (TNO) bei respektive deutschen und niederländischen NH90-Piloten die vorliegende Studie durchgeführt. Während auf deutscher Seite die Untersuchungen im Hubschraubertransportregiment 10 in Faßberg stattfanden, wurden auf niederländischer Seite die gleichen Untersuchungen beim Ausbildungs- und Simulations-Squadron 7 des niederländischen Helikopter Commando in Den Helder (NLD) durchgeführt. Neben subjektiven Befragungen der teilnehmenden aktiven

NH90-Piloten (Abb. 2) beider Länder wurden laborgestützte Untersuchungen sowohl vor, wie direkt nach dem zweistündigen Simulatortraining, wie auch in zeitlichen Abständen nach einer, zweieinhalb und fünf Stunden sowie im deutschen Arm auch nach 22 Stunden am nächsten Tag erhoben (Abb. 3).

Die Probanden absolvierten hierbei neben einer Prüfung der posturalen Instabilität, mit offenen und geschlossenen Augen, auch Tests zum dynamischen Seh- und des dauerhaften Reaktionsvermögens (Vigilanz). Die erhobenen Daten werden derzeit in enger bilateraler Zusammenarbeit ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Studie werden einen wichtigen Beitrag bezüglich einer sicheren Flugtauglichkeit der Piloten nach Simulatortrainings und bei der Möglichkeit, die bisherige Karenzzeit genauer zu berechnen, leisten können. Dadurch können missionspezifische Trainings im Simulator optimiert werden, welche anschließend nach deutlich kürzerer Karenzzeit im Realflug geflogen und weiter geübt werden können, mit dem Ziel die Einsatzfähigkeit von Piloten im taktischen Lufttransport zu erhöhen.

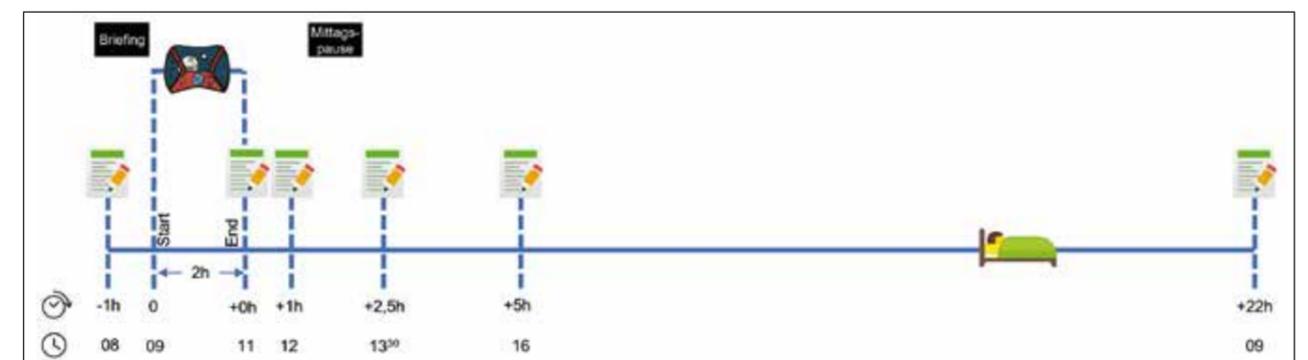


Abb. 3: Ablauf der Studie mit Messzeitpunkten zum Simulatortraining

Flottenarzt Prof. Dr. Andreas Koch
Schiffahrtmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

Flottillenarzt Dr. Sebastian Klapa
Schiffahrtmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

Sollten in bestimmten, sehr fordernden Ausbildungen die Soldatinnen und Soldaten als „Military Athletes“ betrachtet werden? Erkenntnisse aus der „Kampfschwimmerstudie“ der Marine

Die Ausbildung zum Kampfschwimmer bzw. zur Kampfschwimmerin stellt hohe Anforderungen an die körperliche und psychische Leistungsfähigkeit. Ein zukünftiges Verständnis der Lehrgangsteilnehmer und -teilnehmerinnen als „Military Athletes“ mit bestmöglicher Anpassung der Ausbildungsprozesse an moderne Trainingsmethoden kann dazu beitragen, die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Lehrgangsabschlusses zu erhöhen und insbesondere Ausfälle durch Bagatellverletzungen oder Infektionserkrankungen zu reduzieren.

Die Ausbildung zu einem Mitglied der Maritime Special Operations Forces (MSOF) der Marine, die Kampfschwimmerausbildung (Abb. 1), legt sehr hohe Maßstäbe an die körperliche und psychische Belastbarkeit der Soldaten an, um diese für die Bewältigung von Aufgaben auch unter Extrembedingungen angemessen vorzubereiten. Deshalb ist es zielführend, bereits zu Beginn der umfangreichen Ausbildung die Anwärter gezielt und in vielerlei Hinsicht sehr hoch zu belasten, um im Sinne einer Bestenauslese weniger geeigneten Bewerbern recht früh ihre Grenzen aufzuzeigen.

Dies geschieht im ersten Abschnitt der Kampfschwimmerausbildung, in der fünföchigen, sehr komplexen, sogenannten „Schwimmhallenvorausbildung“ in Eckernförde. Hier stellt zwar die „Bestenauslese“ einen relevanten Bestandteil der Ausbildung dar, aber das Interesse aller Ausbilder liegt zunächst auf einem hochwertigen Training der Soldaten. Die hohe körperliche und mentale Gesamtbelastung birgt hier jedoch das Risiko des Overtrainings / Overreachings. Es war Ziel dieser Studie, Anzeichen für das Auftreten von Overtraining / Overreaching bei den Soldaten zu erfassen, um mögliche hierdurch bedingte Abbrüche der Ausbildung in Zukunft zu vermeiden.



Abb. 1: Kampfschwimmer der Deutschen Marine



Abb. 2: Ablaufplan

Flottillenarzt Dr. Katrin Bender
Sanitätsversorgungszentrum Fritzlär
Fritzlär

SanVersZFritzlär@bundeswehr.org

Oberstabsarzt Viktoria Schulz
Sanitätsversorgungszentrum Fritzlär
Fritzlär

SanVersZFritzlär@bundeswehr.org

Oberfeldarzt Dr. Lorenz Scheit
Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
Hamburg

BwKrhsHamburg@bundeswehr.org

Diese prospektive Beobachtungsstudie wurde an 40 freiwillig an der Untersuchung teilnehmenden Soldaten durchgeführt. Diese absolvierten die Ausbildungsphase in regulärer Form, nahmen jedoch zusätzlich zu acht Zeitpunkten (Abb. 2) an Untersuchungen zur körperlichen Leistungsfähigkeit, zur Körperzusammensetzung und zum Status relevanter Blutparameter teil. T1 – T2 markierte Beginn und Ende einer sechswöchigen Sportvorausbildung, T3 – T8 die fünf Wochen der Schwimmhallenausbildung mit den wöchentlichen Untersuchungen. Die Hallenausbildung umfasste ein breites Ausbildungsspektrum rund um Schwimmen, Apnoe-Tauchen (Abb. 3), Kreislaufgerätetauchen und Durchführung von Tag- und Nachtübungen sowie weiterem Sport in enger zeitlicher Taktung.

In der Ergebnisauswertung wurde für die wöchentliche Gesamtbelastung der Soldaten ein Wert zwischen 17.000 und 20.000 MET-Minuten errechnet. Dies entsprach einem täglichen Kalorienbedarf von 5.500 – 6.000 Kalorien und somit ungefähr einem Leistungsäquivalent von bis zu eineinhalb absolvierten Marathonläufen pro Ausbildungstag.

Trotz initialer Gesundheit und einer sehr hohen aeroben Leistungsfähigkeit zu Beginn der Hallenphase ($VO_{2max} = 61,8 \pm 6,3$ ml/kg/min), schlossen nur 13 Soldaten die fünfwöchige Belastungsphase erfolgreich ab.



Abb. 3: Apnoe-Tauchtraining in der Schwimmhalle

Die Auswertung aussagekräftiger Blutparameter für die Erfassung von Zeichen eines Overtrainings / Overreachings zeigten im Verlauf teilweise signifikante Veränderungen: Testosteron fiel von T2: $7,2 \pm 1,9$ ng/ml auf T4: $4,1 \pm 2,5$ ng/ml, Cortisol stieg von T2: $161,2 \pm 38,8$ nmol/l auf T4: $238,3 \pm 30,9$ nmol/l, entsprechend änderte sich der Testosteron / Cortisol-Quotient (Abb. 4). Auch zeigten sich Hinweise auf eine vermehrte Schläfrigkeit in der Stanford Sleepiness Scale.

Als Schlussfolgerung kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass das Belastungsniveau der Soldaten in einem hohen athletischen Bereich lag, der geeignet war, im aktuellen Ausbildungssetting zu deutlichen Zeichen eines Overtrainings / Overreachings zu führen, was mit dem relativ geringen Anteil der erfolgreichen Absolventen in Verbindung stehen mag. Ein in Zukunft gesteigertes Verständnis für die Teilnehmenden an solchen hochgradig fordernden Lehrgängen als „Military Athletes“ mit bestmöglicher Anpassung des Trainingsablaufes an moderne Erkenntnisse der Trainingslehre mag aber sicher dazu beitragen, die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Lehrgangsabschlusses zu erhöhen und insbesondere „unverdiente“ Ausfälle durch Bagatelltraumen und/oder interkurrierende Infekte zu vermeiden.

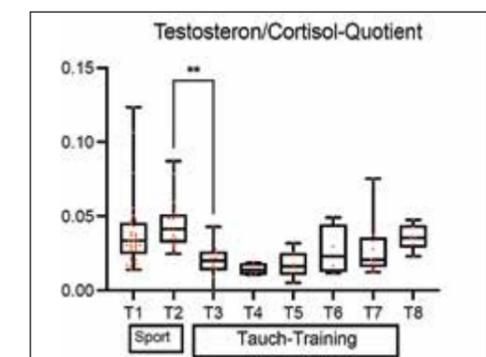


Abb. 4: Testosteron / Cortisol-Quotient

Lt (SanOA) Melanie Häfner, M.Sc.
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie und Septisch-Rekonstruktive Chirurgie
Berlin

BwKrhsBerlinKlinik14Unfallchirurgie@bundeswehr.org

Oberstarzt Prof. Dr. Christian Willy
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie und Septisch-Rekonstruktive Chirurgie
Berlin

BwKrhsBerlinKlinik14Unfallchirurgie@bundeswehr.org

Praktikabilitätstestung der Bakteriophagentherapie am Bundeswehrkrankenhaus Berlin: Das Forschungsprojekt PhagoFlow

Die Bakteriophagentherapie stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Behandlung von Infektionen mit multiresistenten oder schwer behandelbaren Bakterien dar. Im Rahmen des Forschungsprojektes PhagoFlow wurde die Praktikabilität der Herstellung und klinischen Anwendung erprobt. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse für die Zukunft der Bakteriophagentherapie in Deutschland gewonnen werden.

Bakteriophagen sind Viren, die Bakterien gezielt durch Lyse bekämpfen können. Sie wurden erstmals 1919 therapeutisch eingesetzt, verloren nach der Entdeckung von Antibiotika v. a. in der westlichen Welt jedoch an Bedeutung. In den Ländern der ehemaligen UDSSR blieben sie jedoch weiterhin relevant. Seit den 1990er Jahren wird die Bakteriophagentherapie bei multiresistenten Infektionen auch in Deutschland vereinzelt angewendet. Ihr Vorteil liegt in ihrer Spezifität gegenüber den Bakterien, der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit. In der Wehrmedizin zeigt sich ihr Potenzial insbesondere im Rahmen der Behandlung von Schuss- und Explosionsverletzungen, da diese oft mit einem hohen Grad an Kontamination und Wundinfektionen einhergehen. Oft handelt es sich dabei um multiresistente oder schwer behandelbare Bakterien. Da es in Deutschland derzeit kein zugelassenes Bakteriophagen-Präparat gibt, hatte das Konsortialprojekt das Ziel, die Praktikabilität der Phagenherstellung und -therapie in Deutschland zu erproben.

Die Isolation, Charakterisierung und Auswahl der Bakteriophagen erfolgte durch das Leibniz-Institut DSMZ, die Entwick-



Abb. 1: Übersicht der Projektstruktur von PhagoFlow



Abb. 2: Beispiel für Erregerproben zur mikrobiologischen Untersuchung der Suszeptibilität gegenüber Bakteriophagen

lung eines Herstellungsprozesses für die Phagenwirkstoffe gemäß mit den Behörden festgelegten Qualitätsstandards durch das Fraunhofer ITEM (Abb. 1). Im Bundeswehrkrankenhaus Berlin wurde die Eignung von Patientinnen und Patienten für eine Phagentherapie im Rahmen individueller Heilversuche geprüft. Dabei wurden Faktoren wie das Erregerspektrum und die Art der Infektion sowie behandlungslogistische Aspekte berücksichtigt. Nach Entnahme von Erregerproben (Abb. 2) und Empfindlichkeitstests auf Antibiotika und Phagen wurde über die Durchführung der Therapie entschieden. Die Phagen wurden durch die Krankenhausapotheke in einem Reinraum individuell für jeden Patienten bzw. jede Patientin zubereitet. Die Applikationsart erfolgte abhängig von der Indikation, wobei eine Mindestbehandlungsdauer von zehn Tagen angestrebt wurde. Der Behandlungserfolg wurde klinisch und mikrobiologisch bewertet.

Die DSMZ wählte drei Phagen gegen *Pseudomonas aeruginosa* aus 140 Kandidaten basierend auf Wirtsspektrum, genetischen Eigenschaften und Lysewirksamkeit aus, welche vom Fraunhofer ITEM zur therapeutischen Anwendung hergestellt wurden. Bei knapp 20 % der über 300 Behandlungsanfragen handelte es sich um Infektionen mit *Pseudomonas aeruginosa* (Abb. 3).

Für die klinische Fallserie konnten 33 Patientinnen und Patienten für eine mögliche Phagenbehandlung ausgewählt werden, darunter ausnahmslos komplexe Fälle mit meist erfolgreichen vorherigen Therapieversuchen. In 18 Fällen zeigte im mikrobiologischen Vortest keiner der Phagen eine Wirksamkeit. In zehn Fällen erfolgte eine Behandlung. In fünf Fällen war der Erreger nachweislich eliminiert, wobei im Verlauf in einzelnen Fällen Rezidive auftraten. In einem Fall wurde eine nachhaltige kli-

nische und mikrobiologische Heilung erzielt. In keinem Fall traten unerwünschte Nebenwirkungen auf.

Auch wenn die Phagentherapie eine vielversprechende Behandlungsmöglichkeit darstellt, ist eine breite Anwendung im klinischen Alltag derzeit noch nicht möglich. Hierfür fehlt es an infrastrukturellen und personellen Kapazitäten zur Phagenproduktion, um eine breite Anwendung mit vielen verschiedenen Phagen in der Regelversorgung zu ermöglichen. Dazu sind eine klare gesundheitspolitische Einordnung und Finanzierungsmodelle notwendig. Die eigenen klinischen Erfolge erreichten nicht ganz das Niveau, das sich in anderen Publikationen widerspiegelt. Es wird vermutet, dass dies in der beschränkten Auswahl verfügbarer Phagen, jedoch auch an der Applikationsform als Flüssigmedium und einer zu kurzen Anwendungsdauer begründet sein könnte. Auch komplexe Patientenkonstellationen erschwerten die Therapie. Durch koordinierte Anstrengungen könnte die Therapie in Zukunft eine zentrale Rolle im Kampf gegen resistente Keime spielen.

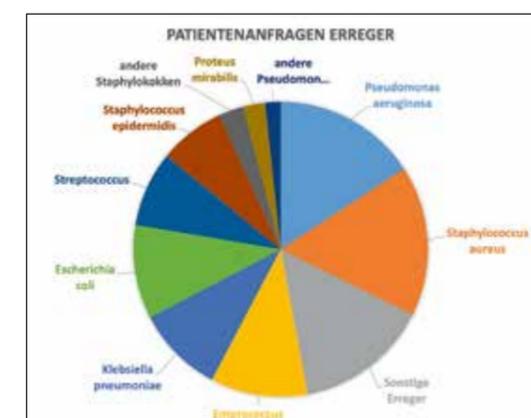


Abb. 3: Auswertung der Patientenfragen nach Erregerspektrum

ORR Dr. Albert Eisenbarth
 Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
 Abteilung für Mikrobiologie und Krankenhaushygiene
 Hamburg

BwKrHsHamburg@bundeswehr.org

Beurteilung eines neuen Diagnosesystems zum Nachweis von Malariaparasiten in Vektoren unter einsatzrealen Bedingungen

Eine der gefährlichsten Tropenkrankheiten überhaupt ist die von Moskitos übertragene Malaria. Die Bundeswehr überwacht darum Moskitos in endemischen Einsatzgebieten durch kontinuierliche Analyse von Probensammlungen. Da der Parasitennachweis derzeit noch nicht vor Ort realisierbar ist, testet unsere Arbeitsgruppe die Eignung eines solchen Systems, was für die Patientendiagnostik entwickelt wurde.

Malaria ist eine durch Stechmücken (= Vektoren) übertragene Infektionskrankheit, die durch Vertreter der einzelligen Protozoen der Gattung *Plasmodium* verursacht wird. Mit fast 250 Millionen Infektionen und 600.000 Todesfällen pro Jahr in tropischen und subtropischen Ländern, insbesondere in Afrika südlich der Sahara, stellt sie weltweit ein großes Gesundheitsproblem dar. Die Übertragung erfolgt durch die Blutmahlzeit einer infizierten Person von einer der ca. hundert kompetenten weiblichen Mosquitoarten der Gattung *Anopheles*, wo sich der Parasit zu infektiösen Stadien weiterentwickelt, die bei einer weiteren Blutmahlzeit auf einen neuen menschlichen Wirt übertragen werden können. Das Infektionsrisiko für die Bevölkerung in einem endemischen Gebiet ist daher abhängig von (1) der Vielfalt und Häufigkeit kompetenter Malaria-Vektoren, (2) der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Vektoren und (3) der Ko-Präsenz und Häufigkeit von Personen, die mit *Plasmodium*-Parasiten infiziert sind.

Die Bundeswehr betreibt deshalb zur Prävention in Risikogebieten Vektormonitoring im Einsatz, d. h. die Analyse von Mückensammlungen durch auf dem Gelände von Militär-



Abb. 1: Das Alethia Malaria LAMP System erfüllt alle Anforderungen eines Point-of-Care-Diagnostiksystems

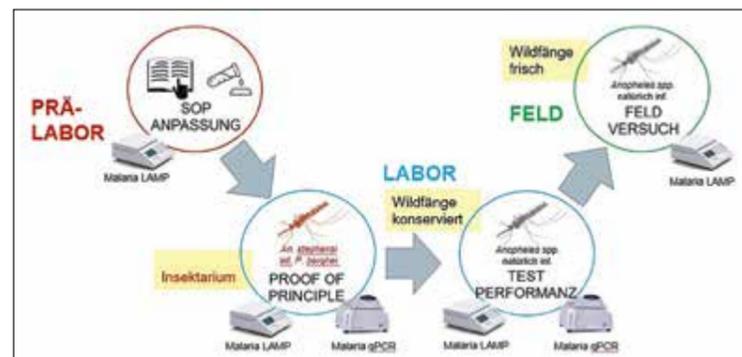


Abb. 2: Workflow zur Weiterentwicklung des Alethia Malaria LAMP Systems für den Test von Vektoren

lagern verteilte Ventilatorfallen. Der Nachweis der Parasiten gelingt über ein PCR-Screening-Verfahren, welches allerdings erst nach Versand der Proben nach Deutschland durchführbar und deshalb erst mit großem Zeitverzug auswertbar ist. Ein Point-of-Care-System zur Detektion von Erregern im Einsatzgebiet würde zu einer massiv verkürzten Reaktionszeit führen und somit zu einer deutlichen Reduzierung des Gesundheitsrisikos von Soldatinnen und Soldaten beitragen. Unsere Arbeitsgruppe hat bereits das Alethia Malaria Loop-mediated Isothermal Amplification (LAMP, Abb. 1) System der Firma Meridian Biosciences als leistungsfähiges Referenztool für die Patientendiagnostik bestätigt. Die laufende Studie evaluiert nun, ob dasselbe System für die Parasitendiagnostik in Vektoren unter Einsatzbedingungen geeignet ist.

Die Entwicklung zur Einsatztauglichkeit des Malaria LAMP Testsystems unterteilt sich in vier Phasen (Abb. 2). Zuerst wurde das Nutzungsprotokoll des im Handel erhältlichen Malaria LAMP Kits so verändert, dass es für Vektoren anwendbar ist. Dann wurde das Proof of Principle über den Test an im Labor gezüchteten Vektoren, die mit einer für Nagetiere infektiösen Malaria infiziert waren, festgestellt. Schließlich wurden Wildfänge aus hochendemischen Malariaregionen Zentralafrikas in Gabun untersucht, zunächst unter kontrollierten Laborbedingungen, später unter tropischen Einsatzbedingungen.

Als Goldstandard für alle Isolate diente die „quantitative Real-Star Malaria PCR“ (qPCR) der Firma Altona Diagnostics. Sowohl die Stechmücken aus der Laborzucht, als auch die Möglichkeiten für Materialsammlungen und Diagnostetests in Gabun wurden freundlicherweise vom Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin in Hamburg, einem engen Kooperationspartner

des Bundeswehrkrankenhauses Hamburg in der Tropenmedizin, zur Verfügung gestellt.

Während die Ergebnisse mit den Laborzuchtmoskitos eine niedrigere Sensitivität (68 %, n = 22) ggü. der qPCR Referenz aufwiesen, zeigten die Wildfanganalysen eine höhere Detektionsrate (LAMP 7,6 % vs. qPCR 5,1 %, n = 79 Pools à 10 Moskitos, Abb. 3). Einzeltestungen einer Auswahl von positiv getesteten LAMP-Pools ergaben 5 aus 6 (83 %) bestätigte Malariainfektionen, was als Indiz einer höheren Sensitivität von LAMP ggü. qPCR steht, aber auch eine potenziell etwas verringerte Spezifität aufweist. Die Ergebnisse aus den Feldversuchen in Gabun zeigten eine noch höhere Positivrate (27 %, n = 56 Pools à 10 Moskitos), welches einer geschätzten Infektionsrate der Mückenpopulation von 3 bis 11 % entspricht.

Das neu angepasste Malaria LAMP System eignet sich somit für den Einsatz und soll in Zukunft im Rahmen des Vektormonitorings der Bundeswehr in Endemieregionen getestet werden.

Allgemein			
Herkunftsland	Deutschland	Gabun	Gabun
Infektionsstatus	künstlich	natürlich	natürlich
Herkunft Diagnoselabor	Deutschland	Deutschland	Gabun
# Vektoren gesammelt	43	1771	551
# Vektoren analysiert	43 (100.0)	789 (44.5) in 79 Pools	551 (100.0) in 56 Pools
Malaria LAMP			
# positives Poolergebnis (+ve)	17 (39.3)	6 (7.6)	15 (26.8)
# negatives Poolergebnis (-ve)	24 (55.5)	73 (92.4)	40 (71.4)
# invalides Poolergebnis (inv)	2 (3.6)	0 (0.0)	1 (3.7)
Malaria qPCR			
# positives Poolergebnis (+ve)	22 (51.2)	4 (5.3)	n. d.
# negatives Poolergebnis (-ve)	21 (48.8)	75 (94.9)	n. d.
# invalides Poolergebnis (inv)	0 (0.0)	0 (0.0)	n. d.
Testperformanz			
# konkordant LAMP +ve/qPCR +ve	15 (34.9)	4 (5.3)	
# konkordant LAMP -ve/qPCR -ve	21 (48.8)	73 (92.4)	
# diskordant LAMP +ve/qPCR +ve	2 (4.7)	0 (0.0)	
# diskordant LAMP -ve/qPCR -ve	0 (0.0)	0 (0.0)	
# diskordant LAMP +ve/qPCR -ve	5 (11.4)	0 (0.0)	
# diskordant LAMP -ve/qPCR +ve	0 (0.0)	2 (2.5)	

Abb. 3: Absolute und proportionale Werte (in Klammern) der getesteten Malariamücken mit dem adaptierten Alethia Malaria LAMP System im Vergleich zur qPCR Referenzmethode

Flottillenarzt Dr. Christoph Jänig
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Klinik X

Oberstarzt Dr. Willi Schmidbauer
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Klinik X

BwZKrhsKoblenzKlinikX@bundeswehr.org

BwZKrhsKoblenzKlinikX@bundeswehr.org

Intelligente militärische medizinische Fähigkeiten („iMedCap“ – intelligent medical capabilities) zur Überwachung, medizinischen Versorgung und Evakuierung von ansteckendem, verletztem und kontaminiertem Personal

Ein Konsortium unter Führung der Technischen Universität München und der Bundeswehr arbeitet an der Entwicklung eines Systems zur Rettung und Versorgung von Verwundeten aus kontaminierten Gebieten. Der Schwerpunkt liegt in der Nutzung von autonomen Systemen und einer telemedizinischen Infrastruktur zur Versorgung der Patientinnen und Patienten. 2026 wird das Gesamtsystem in einer Übung demonstriert.

Bei groß angelegten Kampfszenarien ist es schwierig, die Zeitvorgaben für die optimale Versorgung von Verletzten einzuhalten. Dies wird noch schwieriger, wenn die Gebiete schwer zugänglich oder kontaminiert sind. Autonome Fahrzeuge (UxV) haben sich in aktuellen Konflikten als bahnbrechende Technologie erwiesen und bieten neue Möglichkeiten zur Verwundetenversorgung. Die iMEDCAP-Lösung wird verletzte, kontaminierte oder ansteckende Patienten lokalisieren, evakuieren, überwachen und medizinische Maßnahmen während des Transports ermöglichen.

Ein Konsortium aus Bundeswehr, großen Technologieunternehmen, Start-ups und Forschungseinrichtungen hat 2023 ein von der EU finanziertes Projekt zur Entwicklung eines ganzheitlichen Rettungssystems gestartet. Aufklärungs-UAVs werden die Verwundeten lokalisieren und ihre Vitalparameter aus der Ferne erfassen. Anschließend wird ein UxV zum Ort der Verwundung geschickt. Dort wird die verletzte Person (halb-) automatisch in die autonome Patiententransporteinheit (APTU) des UxV gebracht und fernüberwacht. Über Robotersysteme kann neben einer Diagnosesicherung bereits während des



Abb. 1: Integration unbemannter Systeme (UxV) in die militärische Rettungskette (FLOT: Forward Line of Own Troops / Vorderste Position eigener Truppenteile; POI: Point of Injury / Ort der Verwundung; DronEvac: Drone Evacuation / Drohnengestützte Evakuierung; CCP: Casualty Collection Point / Verwundetensammelpunkt; MedEvac: Medical Evacuation / qualifizierter Verwundetentransport)

Oberstarzt Prof. Dr. Dirk Steinritz
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr
München

Institut fuer Pharmakologie und Toxikologie@bundeswehr.org

Oberstveternär Dr. Sabine Sauer
Sanitätsakademie der Bundeswehr
München

SanAkBwAbtEWehrMedWissForschEntw@bundeswehr.org

Transports eine Ersttherapie durchgeführt werden. Der Verletzte wird zur nächsten medizinischen Versorgungseinrichtung transportiert, wo eine Notfallbehandlung und Dekontamination des Verletzten durchgeführt werden kann (Abb. 1).

Kernstück für den Bereich der Patientenversorgung ist die sogenannte autonome Patiententransporteinheit (APTU; Abb. 2) für die folgende Anforderungen definiert wurden:

1. Entwicklung der APTU als eigenständige Patientenkabine mit autonomem Betrieb.
2. Kompatibilität mit verschiedenen Transportmitteln (Boden, Luft, See) für ein hohes Maß an Flexibilität. Ein vollständig autonomer Transport mit autonomen Systemen (Remote Autonomous Systems; RAS) muss möglich sein.
3. Kontinuierliche telemedizinische Überwachung der Patienten. Wearables, dedizierte medizinische Überwachungssysteme und externe Sensoren müssen für die Erfassung von Vitalparametern integriert werden.
4. Lebensrettende Eingriffe müssen über ein in die APTU integriertes robotergestütztes chirurgisches und interventionelles Versorgungsmodul (RASiC) aus der Ferne durchgeführt werden können.
5. Die APTU muss unter CBRN-Bedingungen einsatzfähig sein und über ein CBRN-Erkennungssystem verfügen.
6. KI-basierte Software sollte bei der Patientenüberwachung,

der Steuerung des Patientenflusses und der Patientenverfolgung helfen.

7. Medizinisches Personal muss in der Lage sein, dem Patienten psychologische Unterstützung zu bieten, alle medizinischen Daten zu überwachen und die erforderlichen Maßnahmen aus der Ferne durchzuführen.

Das Konzept konzentriert sich auf drei Komponenten innerhalb der Rettungskette:

1. Lokalisierung des Opfers
2. Automatische Evakuierung von Opfern durch UxVs zur nächstgelegenen medizinischen Behandlungseinrichtung
3. Versorgung während des Transports mittels ferngesteuerter medizinischer Geräte zur Durchführung von Diagnostik und lebensrettenden Maßnahmen

UxVs können in großer Zahl in gefährliche Gebiete geschickt werden, ohne dass weiteres Personal gefährdet wird. Das System der schnellen Lokalisierung, Rettung und Erstversorgung während des Transports ist geeignet, um die engen Zeitvorgaben in der Traumaversorgung einzuhalten und so die Überlebensraten zu erhöhen.

Das endgültige System, einschließlich eines Prototyps des APTU, wird bis Ende 2026 in einem Übungsszenario mit RAS-Transport getestet, bewertet und vorgestellt.

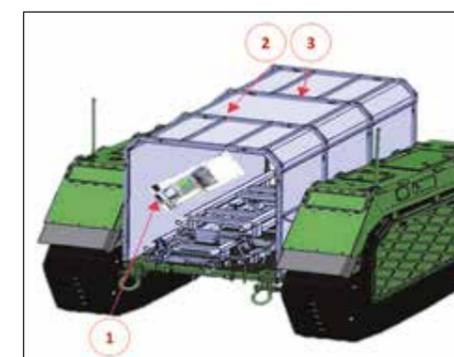


Abb. 2: Darstellung einer plattformunabhängigen Patiententransporteinheit auf einem UGV mit Halterungen für medizinisches Equipment (1), Schienensystem für einen Interventionsroboter (2) und eine textile Schutzhülle mit Aktivkohle zur Verhinderung einer Kreuzkontamination im Falle einer ABC-Bedrohung



Abb. 3: Dieses Projekt wird aus dem Europäischen Verteidigungsfonds (EDF) gefördert

RDir PD Dr. Ulrich Wesemann
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

Lt (SanOA) Nils Hüttermann
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

RDir Harald Hofmann
Einsatzführungskommando
der Bundeswehr
Schwielowsee

Prof. Dr. Karl-Heinz Renner
Universität der Bundeswehr
München
Neubiberg

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum
@bundeswehr.org

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum
@bundeswehr.org

OpFueKdoBwJ1PsychDst
@bundeswehr.org

info@unibw.de

Afghanistan, Irak, Mali – aktuelle repräsentative Untersuchung zu Bundeswehrpersonal mit einsatzassoziierten psychischen Störungen

Wie viele Soldatinnen und Soldaten bekommen nach Einsätzen in Afghanistan, Mali oder Irak die Diagnose einer einsatzassoziierten psychischen Störung? Mit insgesamt N = 112.810 eingeschlossenen Soldatinnen und Soldaten handelt es sich bei der Beantwortung dieser Frage um eine sehr umfangreiche statistische Untersuchung zu dieser Thematik innerhalb der Bundeswehr. Die Vollerhebung wurde vom Psychotraumazentrum am Bundeswehrkrankenhaus Berlin in Kooperation mit dem Psychologischen Dienst, dem Sanitätsdienst sowie der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Humanwissenschaften, Institut für Psychologie, durchgeführt.

Zahlreiche Studien belegen eine signifikante Zunahme psychischer Störungen nach Auslandseinsätzen. Damit gehören psychische Beeinträchtigungen zum Berufsrisiko von Militärpersonal. Bundeswehrrsoldatinnen und -soldaten, die während des Einsatzes einem lebensbedrohlichen Ereignis ausgesetzt waren, entwickeln 6–7-mal häufiger eine posttraumatische Belastungsstörung, eine Depression oder eine Angststörung als ihre Kameradinnen und Kameraden desselben Einsatzes. Ebenfalls haben sie ein 2-mal höheres Risiko für eine Partnerschaftstrennung. Die wenigen Studien, die es zur Inzidenz, also der Neuentwicklung einsatzbedingter psychischer Störungen gibt, wurden schon vor mehr als zehn Jahren durchgeführt und haben nur Afghanistan betrachtet. Zwei voneinander unabhängige Studien kamen dabei nahezu übereinstimmend zu einer 1-Jahresinzidenz von 7,3 % bzw. 8,0 %. Ebenfalls übereinstimmend wurden Angststörungen als die Störung mit der höchsten Inzidenz identifiziert. Um eine repräsentative Aussage machen zu können, wie viele Soldatinnen und Soldaten mit einer einsatzassoziierten psychischen Störung aus Afghanistan, Mali oder Irak diagnostiziert werden, haben Mitarbeitende des Psychotraumazentrums am Bundeswehrkrankenhaus Berlin, dem Einsatzführungskom-



Abb. 1: Evakuierung Afghanistan: Fallschirmjäger auf dem Flughafengelände Kabul/Afghanistan (Quelle: Bundeswehr / Einsatzkameratrupp)



Abb. 2: Education Cadre Development Institute aus der NATO Mission in Irak (NMI) in Bagdad/Irak (Quelle: Bundeswehr / PAO)



Abb. 3: Camp Castor während der Rückverlegung (Redeployment) bei der UN-Mission MINUSMA in Gao/Mali (Quelle: Bundeswehr / Marc Tessensohn)



Abb. 4: Patrouille durch Gao/Mali (Quelle: Bundeswehr / Julia Dahlmann)



Abb. 5: Besprechung während der Ausbildungsunterstützung (Capacity Building Iraq) in Erbil/Irak (Quelle: Bundeswehr / PAO)



Abb. 6: Evakuierung Afghanistan: Schutzbedürftige während der Evakuierungsoperation in Taschkent/Usbekistan (Quelle: Bundeswehr / Marc Tessensohn)

mando der Bundeswehr und der Universität der Bundeswehr München diese Untersuchung durchgeführt. Ziel war eine Vollerhebung der Einsätze in Afghanistan, Irak und Mali. Für die Berechnung wurden die Zahlen aller Soldatinnen und Soldaten ermittelt, die von 2001–21 in Afghanistan, von 2013–22 in Mali und von 2015–18 im Irak eingesetzt waren.

Im Psychotraumazentrum Berlin wird eine Datenbank geführt, in der Soldatinnen und Soldaten aufgenommen werden, die in militärpsychiatrischen oder militärpsychotherapeutischen Einrichtungen des Sanitätsdienstes der Bundeswehr vorstellig werden und an einer einsatzassoziierten psychischen Störung leiden. Die psychische Störung wird von Psychologischen Psychotherapeutinnen und -therapeuten sowie von Fachärztinnen und -ärzten diagnostiziert. Ebenfalls wird dabei der Einsatzbezug erörtert. Dies bedeutet, dass die Störung ohne den entsprechenden Einsatz mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nicht aufgetreten wäre, ohne allerdings dadurch eine Kausalität zweifelsfrei belegen zu können. Neben dem auslösenden Einsatz werden hier ebenfalls Symptombeginn und Erstkontakt zur professionellen Einrichtung festgehalten.

Durch Zusammenführen dieser Daten kann die kumulative Behandlungs-Inzidenz aller Soldatinnen und Soldaten mit einsatzassoziierten psychischen Störungen bestimmt werden. Ebenfalls können dadurch die Latenzzeiten zwischen Einsatz und Symptombeginn oder von Symptombeginn bis zum Aufsuchen professioneller Hilfe berechnet werden. Einschränkung muss hier aber festgehalten werden, dass nur Militärpersonal mit einer „offiziellen Diagnose“ berücksichtigt werden konnte. Die Dunkelziffer dürfte damit deutlich höher liegen. Betroffene, die sich aufgrund von Stigma oder anderen Gründen keine professionelle Hilfe gesucht haben oder die von der Truppenärztin oder vom Truppenarzt direkt eine Überweisung an externe

Therapeutinnen und Therapeuten bekommen haben, sind in dieser Berechnung nicht enthalten.

Die kumulative Behandlungs-Inzidenz aller in Afghanistan eingesetzten Soldatinnen und Soldaten mit einer psychischen Störung beträgt 2,6 %. Die Hauptdiagnosen verteilen sich auf posttraumatische Belastungsstörungen (63,2 %), Angststörungen (25,7 %), depressive Störungen (8,3 %) und Suchterkrankungen (0,5 %). Die kumulative Behandlungs-Inzidenz aller von 2013–22 in Mali eingesetzten Soldatinnen und Soldaten mit einer psychischen Störung beträgt 1,1 %. Zu den häufigsten Hauptdiagnosen gehören posttraumatische Belastungsstörungen (45,9 %), Angststörungen (48,5 %) und depressive Störungen (5,7 %). Die kumulative Behandlungs-Inzidenz aller von 2015–2018 in Irak eingesetzten Soldatinnen und Soldaten mit einer psychischen Störung beträgt 3,4 %. Hier finden sich zu 50,9 % posttraumatische Belastungsstörungen, 32,7 % Angststörungen, 7,3 % depressive Erkrankungen und 9,1 % sonstige psychische Störungen. Die durchschnittliche Zeit von Symptombeginn bis zum Aufsuchen professioneller Hilfe beträgt hier 1 Jahr, wobei Betroffene mit einer posttraumatischen Belastungsstörung mit 1,3 vs. 0,6 Jahre signifikant länger brauchten.

Nicht alle Betroffenen finden gleichermaßen Eingang in die Statistik. So gibt es vergleichsweise wenig Betroffene mit Angst- oder depressiven Störungen. Die Dunkelziffer dürfte damit deutlich höher liegen. Zukünftige Studien sollten daher die Überweisungen an niedergelassene Psychotherapeutinnen und Psychotherapeuten mit einbeziehen.

Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Einsätze unterschiedliche Häufigkeitsausprägungen der Störungsbilder haben. Dies sollte bei der Untersuchung der Einsatzrückkehrenden berücksichtigt werden, in dem ein zusätzlicher Schwerpunkt auf die am häufigsten zu erwartenden psychischen Symptome gelegt wird.

4

Sozialwissenschaftliche Forschung und Militärgeschichtliche Forschung

Das Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) betreibt im Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung militärgeschichtliche und sozialwissenschaftliche Forschung und beteiligt sich am öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs über deutsches Militär in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.

Die wissenschaftliche Arbeit des ZMSBw zielt auf das Gewinnen und Vermitteln militärgeschichtlicher und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse insbesondere für das BMVg und die Bundeswehr, aber auch für das Parlament, die Wissenschaft und die nichtwissenschaftliche Öffentlichkeit.

Die militärgeschichtliche und sozialwissenschaftliche Forschung bildet den Schwerpunkt wissenschaftlichen Arbeitens am ZMSBw. Geschichte und Gegenwart der Bundeswehr stehen dabei im Mittelpunkt. Die wissenschaftliche Arbeit erfolgt nach den allgemein anerkannten Methoden und Standards der Geschichts- und Sozialwissenschaften und unterliegt der grundgesetzlich garantierten Freiheit von Wissenschaft und Forschung.

Die Forschungsergebnisse des ZMSBw stellen eine wesentliche Grundlage für die historische Bildung in der Bundeswehr dar. Sie wirken damit unmittelbar auf das staatsbürgerliche Verständnis und das Geschichtsbewusstsein der Angehörigen der Bundeswehr ein und tragen zur Verwirklichung des Leitbildes des Staatsbürgers in Uniform bei.

Das ZMSBw unterstützt das BMVg bei der Wahrnehmung der Fachaufsicht über das Museums- und Sammlungswesen der Bundeswehr und ist im Auftrag des BMVg für die fachliche Steuerung und Überwachung aller Sammlungen im Museums- und Sammlungsverband der Bundeswehr zuständig.



Hybride Kriegführung – über die Notwendigkeit Krieg „hybrid“ zu denken

Wer Streitkräfte, Staat und Gesellschaft auf die Herausforderungen hybrider Kriegführung vorbereiten will, benötigt ein ganzheitliches Verständnis dieser Herausforderung. Es kommt darauf an, die Wesensmerkmale hybrider Kriegführung zu erfassen, um ihre wechselnden Erscheinungsformen lagegerecht interpretieren zu können. Da die Verteidigung gegen hybride Angriffe das Zusammenwirken einer Vielzahl unterschiedlicher Teilakteure – u. a. auch der Streitkräfte – erfordert, ist ein gemeinsames Grundverständnis die Voraussetzung für stringentes gemeinsames Handeln in Verteidigung, Resilienzbildung und Gegenreaktion. Ein solches Grundverständnis auf der Basis einer am Wesen des Phänomens ausgerichteten Konzeption zu fördern, ist Ziel dieses Projekts.

Hybride Kriegführung in der und um die Ukraine hat Europa ab 2014 mit einem sicherheitspolitischen Paradigmenwechsel konfrontiert. Die Eskalation durch den großangelegten militärischen Überfall Russlands auf die Ukraine vom 24. Februar 2022 hat in Deutschland zur Ausrufung einer „Zeitenwende“ geführt. Es ist davon auszugehen, dass auch die Zukunft des Krieges in hohem Maße durch hybride Formen geprägt sein wird. Deren Parameter und Wirkmechanismen zu verstehen, ist daher notwendige Voraussetzung für verantwortliches politisches, gesellschaftliches und militärisches Handeln.

Da die komplexen Parameter und indirekten, zum Teil verdeckten Wirkmechanismen hybrider Kriegführung und entsprechender Strategien mitunter nur schwer zu erkennen und einzuordnen sind, stellt hybride Kriegführung insbesondere auch eine geistig-analytische Herausforderung dar. Dieser haben sich neben der Wissenschaft auch Politik, Gesellschaft und die Streitkräfte zu stellen.

Neben einer Sensibilisierung für die Relevanz der Herausforderung ist die Entwicklung eines gemeinsamen Grund-

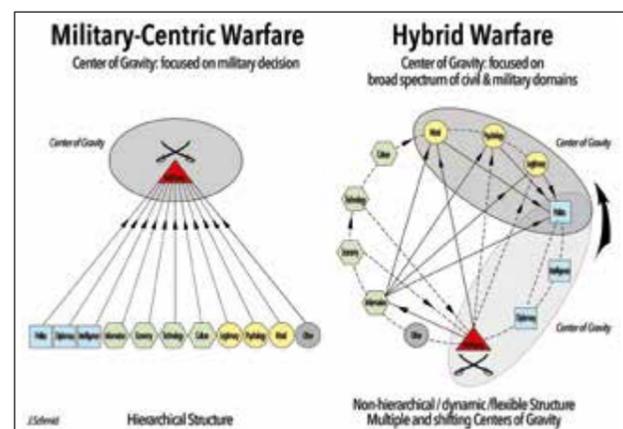


Abb. 1: Horizontale Entgrenzung des Gefechtsfeldes und Nutzung auch nicht-militärischer Gravitationszentren: Militärisch-zentrierte Kriegführung (linke Grafik) – als gedankliches Gegenstück zu hybrider Kriegführung – strebt primär nach einer Entscheidung mit militärischen Mitteln und Methoden auf einem militärischen Gefechtsfeld. Andere Domänen werden in den Dienst einer militärischen Entscheidung gestellt, von der wiederum der politische Gesamterfolg erwartet wird. Im Gegensatz dazu kombiniert und integriert hybride Kriegführung (rechte Grafik) unterschiedliche Domänen und Dimensionen als eigenständige Gefechtsfelder auf dynamische und flexible Art und Weise. Eine Entscheidung kann dabei auch auf nicht-militärischen Gravitationsfeldern angestrebt werden. Die Streitkräfte können so zum unterstützenden Element einer Gesamtentscheidung auf nicht-militärischen Handlungsfeldern werden. Im Gegensatz zur hierarchischen Struktur militärisch-zentrierter Kriegführung weisen die inneren Zusammenhänge im Rahmen hybrider Kriegführung eine flexible, nicht-hierarchische Struktur mit wechselnden und multiplen Gravitationszentren der Entscheidung auf

verständnisses hybrider Kriegführung entscheidend. Ein solches Grundverständnis kann sich als Katalysator für die notwendige Kooperation und Koordination aller relevanten Teilakteure zur Abwehr und Bewältigung hybrider Bedrohungen erweisen. Dies erfordert eine wissenschaftlich basierte, konzeptionelle Grundlage.

Hierbei kommt es vor allem darauf an, die Wesensmerkmale hybrider Kriegführung zu erfassen. Hervorzuheben sind dabei insbesondere die drei zentralen Charaktermerkmale hybrider Kriegführung:

1. Die horizontale Entgrenzung des Gefechtsfeldes in Verbindung mit der Nutzung auch nicht-militärischer Gravitationszentren der Entscheidung. D. h. der militärische „Schießkrieg“ wird u. a. kombiniert mit dem Informationskrieg, dem Wirtschafts- und Finanzkrieg, dem gesellschaftlichen Kulturkampf wie auch dem Ringen auf internationalem diplomatischem Parkett.
2. Das gezielte Operieren in den Grauzonen von Schnittstellen u. a. zwischen Krieg und Frieden, Freund und Feind, innerer und äußerer Sicherheit wie auch zwischen zivilen und militärischen oder staatlichen und nicht-staatlichen Verantwortungsbereichen.
3. Die unorthodoxe Kombination von Mitteln, Methoden, Taktiken und Strategien. D. h. reguläre Mittel und Methoden werden mit irregulären, offene mit verdeckten, symmetrische mit asymmetrischen oder legale mit illegalen oder gar kriminellen Ansätzen kombiniert.

Da in Zeiten hybrider Kriegführung die Grenzen zwischen Krieg und Frieden, Freund und Feind wie auch zwischen innerer und äußerer Sicherheit sowie zwischen zivilen und militärischen Angriffsvektoren verschwimmen, ist neben einer

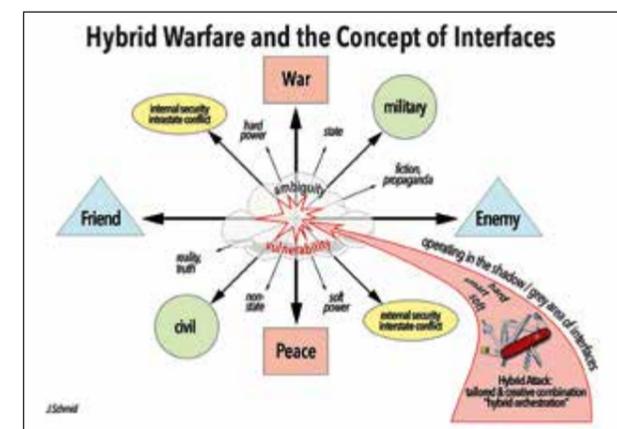


Abb. 2: Operationen in den Grauzonen von Schnittstellen/ Unorthodoxe Kombination von Mitteln und Methoden:

Hybride Kriegführung kennzeichnet sich durch das Operieren in den Grauzonen von Schnittstellen. Dazu werden unterschiedliche Instrumente, Mittel und Methoden, Taktiken und Strategien passgenau, kreativ und unorthodox miteinander kombiniert. Die Anlage einer hybriden Kampagne kann dabei in gewisser Weise mit der Konstruktion eines Schweizer Taschenmessers verglichen werden. Die Klinge des Messers steht dann stellvertretend für die militärische Komponente im Rahmen einer Vielzahl weiterer Instrumente, Mittel und Methoden. Im Unterschied zum Schweizer Taschenmesser können im Rahmen hybrider Kriegführung die verschiedenen Instrumente aber auch gleichzeitig zum Einsatz kommen

starken militärischen Verteidigung der Schutz der eigenen Gesellschaft, Wirtschaft und Infrastruktur auch gegen nicht-militärische hybride Angriffsvektoren (u. a. in Form von Migrationsangriffen, ideologischer Radikalisierung, krimineller Zersetzung, Terror und Sabotage) von zentraler Bedeutung.

Für die Streitkräfte bedeutet die Konfrontation mit hybrider Kriegführung zuallererst, ihren militärischen Hauptauftrag (d. h. für die Bundeswehr die Landes- und Bündnisverteidigung) bestmöglich zu beherrschen. Da der konventionelle Kampf höchster Intensität (wie auch die Drohung im nuklearen Spektrum) Teil einer übergeordneten Gesamtstrategie hybrider Kriegführung darstellen kann, ist in der Vorbereitung hierauf auch im Kontext hybrider Kriegführung der Schwerpunkt für die Streitkräfte zu sehen. Darüber hinaus geht es aber auch darum, die Fähigkeit zum Agieren in der „Schattenwelt“ des „Hybriden“ zu entwickeln und für hybride Herausforderer die Räume für Schattenoperationen in den Grauzonen von Schnittstellen systematisch zu verengen. Dazu gilt es Zuständigkeits- und Verantwortungslücken sowie Räume mangelnder Gesamtverantwortung zu identifizieren und zu schließen.

Auf Basis der identifizierten Wesensmerkmale lässt sich folgende Kurzdefinition hybrider Kriegführung ableiten: „Hybride Kriegführung ist eine spezifische Form der Kriegführung, die das Gefechtsfeld horizontal entgrenzt und eine Entscheidung auch auf nicht-militärischen Handlungsfeldern anstrebt, die insbesondere in den Grauzonen von Schnittstellen operiert und damit strategische Ambiguität erzeugt und die den Gegner durch unorthodoxe Mittel- und Methodenkombinationen herausfordert“ (J. Schmid).

Dr. Sven Deppisch
Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw)
Potsdam

ZMSBwEingang@bundeswehr.org

Das Zeitzeugenprojekt des Zentrums für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw)

Im Dezember 2023 startete das ZMSBw sein Zeitzeugenprojekt. Ziel ist es, die Stimmen von Vertretern der deutschen Streitkräfte, aber auch der Ministerialbürokratie und der Bundespolitik für die künftige Forschung systematisch einzufangen und für die Nachwelt zu konservieren. Vom Oral-History-Projekt der Bundeswehr profitiert nicht nur die Geschichtsschreibung, sondern auch die Truppe selbst.

Zwei Mitarbeiter des ZMSBw befragen für das Zeitzeugenprojekt aktive und pensionierte Soldaten der deutschen Streitkräfte zu ihren Lebensgeschichten, Erlebnissen und Erfahrungen. Da die beiden Historiker im Forschungsbereich Einsatz tätig sind, der die Ära der Auslandseinsätze untersucht, gilt ihr Interesse besonders der Epoche von der deutschen Wiedervereinigung 1990 bis zur „Zeitenwende“ 2022. Auf diesen jüngsten Abschnitt der deutschen Militärgeschichte bleiben die Gespräche mit den Akteuren der Vergangenheit jedoch nicht beschränkt. Und an interessanten Gesprächspartnern mangelt es nicht. In der ersten Phase konzentriert sich die Arbeit aber zunächst auf Entscheidungsträger der frühen 1990er Jahre, weil sie die Weichen für die ersten Auslandseinsätze stellten und sie sich bereits in einem fortgeschrittenen Alter befinden.

Das Militärgeschichtliche Forschungsamt (MGFA) und dessen Nachfolgeinstitution, das ZMSBw, führten zwar schon früher zahlreiche Projekte durch, in denen Zeitzeugen zu Wort kamen. Grundlegend neu am aktuellen Zeitzeugenprojekt ist jedoch, dass die Interviews systematisch vorbereitet, durchgeführt und dokumentiert werden. Orientiert an den Methoden der Oral



Abb. 1: Interview für das Zeitzeugenprojekt des ZMSBw (Quelle: Bundeswehr / Nimpisch, 2025)



Abb. 2: Akten des Zeitzeugenprojekts der Bundeswehr (Quelle: Bundeswehr / Nimpisch, 2025)



Abb. 3: Deutscher UN-Soldat mit jungen Kambodschanerinnen in Phnom Penh (Quelle: Bundeswehr / Modes, 1993)

History schaffen die Historiker so wichtige Quellen jenseits des Behördenschriftguts. Was in den Streitkräften gerade der englischsprachigen Nationen seit vielen Jahrzehnten erfolgreich praktiziert wird, hält dadurch nun auch Einzug in die Bundeswehr.

Das Zeitzeugenprojekt rückt damit den Menschen ins Zentrum. Er fungiert als Wegweiser durch das Dickicht an institutionellen Vorgängen und historischen Ereignissen. Die Interviews können helfen, Entscheidungsprozesse zu rekonstruieren, die behördliche Akten überhaupt erst entstehen ließen, aus diesen aber nicht ersichtlich sind. Im Gespräch übermittelt der Zeitzeuge nicht nur Zahlen, Daten und Fakten – oder was er dafür hält. Vielmehr lässt er den Rezipienten auch an seinen Erlebnissen und Erfahrungen teilhaben. Jedes einzelne Interview liefert eine Vielzahl von Narrativen, Perspektiven und Reflexionen einzelner Individuen, welche andere Quellen ideal ergänzen.

Um die Gespräche zu strukturieren, erstellten die Forscher einen Fragenkatalog, der jedoch stets die Biografien und Verwendungen ihrer Zeitzeugen berücksichtigt. Die mehrstündigen Interviews werden aufgezeichnet und anschließend verschriftlicht. Letzteres gestaltet sich ebenso zeitintensiv wie die redaktionelle Nachbearbeitung der Transkripte. Sobald ein solcher Text vorliegt, erhält ihn der Gesprächspartner. Während er geringfügig Korrekturen vornehmen kann, gilt aber grundsätzlich das gesprochene Wort.

Sobald seine schriftliche Freigabe vorliegt, wird ein Vorgang angelegt. Neben dem Transkript und der Freigabeerklärung gehören dazu der Schriftverkehr, die Audio-Datei des Interviews und weitere Unterlagen. Danach wird die Akte an das



Abb. 4: Bundesminister der Verteidigung, Volker Rühle (rechts) und Generalinspekteur der Bundeswehr, General Klaus Naumann auf der Pressekonferenz zum Einsatz UNOSOM II in Somalia (Quelle: Bundeswehr / Modes, 1993)



Abb. 5: Panzerkommandant der deutschen Einsatzbrigade der KFOR-Truppen im Kosovo (Quelle: Bundeswehr / Modes, 1999)



Abb. 6: ISAF-Einsatz in Afghanistan: Deutscher Soldat in der Nähe von Mazar-e Sharif (Quelle: Bundeswehr / Heinrichs, 2013)

Bundesarchiv (Abteilung Militärarchiv) in Freiburg im Breisgau abgegeben und dort mit einer Signatur sowie einer Schutzfrist von 30 Jahren versehen, die für Sachakten obligatorisch ist. So ist sichergestellt, dass nach deren Ablauf jeder Archivbesucher das Material nutzen kann. Nur den Mitarbeitern des ZMSBw ist dies schon vorab möglich.

Auf diesem Weg produzieren die Forscher einzigartige Quellen, die von unschätzbarem Wert für die Geschichtswissenschaft und die Bundeswehr sind. Die bisher geführten Interviews lassen bereits erkennen, welch großes Potential für künftige Forschungsprojekte in ihnen ruht. Dabei liefern sie Informationen für zahlreiche Studien zur Binnenperspektive der Truppe, die ohne sie teilweise gar nicht möglich wären. In der Gesamtschau bilden sie sogar eine wertvolle Grundlage für eine Mentalitätsgeschichte der Bundeswehr. Nicht zuletzt bietet sich dem ZMSBw durch das Zeitzeugenprojekt daher die einzigartige Chance, sich als Zentrum der militärhistorischen Oral History in Deutschland zu etablieren.

5

Geowissenschaftliche Forschung

Auftrag des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr ist es, wissenschaftliche Erkenntnisse in den Geowissenschaften zu bewerten, für die Nutzung zu erschließen sowie eigene Vorhaben und Projekte voranzutreiben, mit dem Ziel die Streitkräfte und die Bundeswehr insgesamt in ihrer Auftragserfüllung zu unterstützen und Schaden von Material oder Personal abzuwenden.

Ein wesentlicher Bereich sind dabei die Einflüsse, die die Atmosphäre im weitesten Sinne auf die Soldatinnen und Soldaten, auf den Einsatz von militärischem Gerät und somit letztlich auf die Operationsführung insgesamt hat. Diese stellen, wenn auch in unterschiedlichster Ausprägung, stets einen wesentlichen Faktor im Einsatz dar. Dies ist keine neue Erkenntnis. Clausewitz beschreibt es so: „Da es gewisse Umstände gibt, welche das Gefecht immerwährend begleiten und mehr oder weniger Einfluss darauf haben, so müssen diese bei der Anwendung der Streitkräfte mit in Betrachtung gezogen werden. Diese Umstände sind die Örtlichkeit (das Terrain), die Tageszeit und das Wetter. (Gen.-Maj. Carl von Clausewitz (1780 – 1831) „Vom Kriege, 2. Buch). Besser kann man die wesentlichen Aspekte dessen, was in der Bundeswehr als GeoInfo-Unterstützung bezeichnet wird, nicht beschreiben.

Die in diesem Jahr vorgestellten Projekte zeigen die Vielgestaltigkeit im Bereich Meteorologie deutlich. Sie reichen von grundlegenden Arbeiten zur Modellierung der Atmosphäre und ihrer Kopplung mit der festen Erde und dem Ozean, über Einflüsse der atmosphärischen Zustände auf den Einsatz von Sensoren und Effektoren bis zur aufgabenbezogenen, qualitätsgesicherten Versorgung einzelner Soldatinnen und Soldaten mit meteorologischen Informationen.

Übergeordnet ist aber auch eine Tendenz erkennbar, die den Anforderungen einer modernen Gefechtsführung gerecht wird: Informationen, Parameter und Vorhersagen müssen hoch aktuell, bedarfsgerecht und unmittelbar dem Führungspersonal und auch den Anwendenden im soldatischen Umfeld ohne die Vermittlung von Fachexperten und Fachexpertinnen zur Verfügung gestellt und vor allem anwendbar sein. Hier wird sich in den nächsten Jahren, auch unter Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz, ein Paradigmenwechsel vollziehen.



ORR Dr. Lars Wiegand
 Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
 Dez III 4 (1) Numerische Wettervorhersage
 Offenbach am Main

Dr. Christine Sgoff
 Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
 Dez III 4 (1) Numerische Wettervorhersage
 Offenbach am Main

ZGeoBwIII41NumerischeWettervorhersage@bundeswehr.org

ZGeoBwIII41NumerischeWettervorhersage@bundeswehr.org

Das Erdsystem- und Seegangmodell zur Verbesserung der Vorhersagequalität

Für die optimale meteorologische und ozeanographische (METOC) Unterstützung aller Bedarfsträger wird ein Erdsystemmodell (Kopplung Atmosphäre-Ozean) sowie ein neues Seegangmodell beim Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelt. Im Artikel werden Planungen, erste erreichte Projektmeilensteine sowie ein Ausblick dargelegt.

Das im ZGeoBw Fachprojekt neu in Entwicklung befindliche Vorhersagesystem bestehend aus dem „Erdsystem- und Seegangmodell“ wird einen wichtigen Beitrag zur maritimen Lagebilderstellung liefern. Die daraus resultierenden verbesserten Vorhersagen werden von der deutschen Marine sowie deren NATO-Partnern in den Einsatz-, Krisen- und Übungsgebieten, im operationellen (24/7) Betrieb benötigt. Bisherige Modelle und Verfahren beruhen aufgrund hoher Modellkomplexität, limitierter Rechenleistung und dem Erkenntnisstand der Zeit auf ungekoppelten Atmosphäre- oder Ozeanmodellen. Durch die neue 2-Wege-Kopplung wird eine präzisere Einsatzberatung möglich. Das betrifft auch spezielle Systeme der Marine, wie z. B. AUVs (autonomous underwater vehicles) und UAVs (unmanned aerial vehicles), sowie vielfältige Anschlussverfahren, z. B. für Sonarleistungs- und Ausbreitungsvorhersagen. Von der Verbesserung der METOC-Vorhersagequalität profitieren alle Bedarfsträger in den Teilstreitkräften.

In Zusammenarbeit mit dem DWD als Auftragnehmer wird in dem achtjährigen Fachprojekt ein gekoppeltes Erdsystemmodell auf der Wetterskala (ICON-ESM-W) bestehend aus den Haupt-

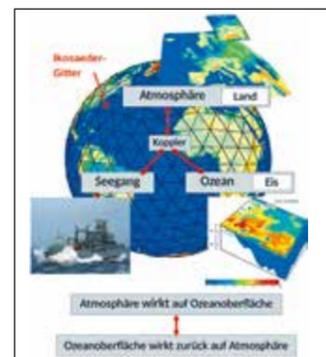


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Erdsystemmodells basierend auf dem ICON (Ikosaeder-Gitter) Modell. Der YAC-Koppler tauscht die relevanten Variablen zwischen der Ozean- und der Atmosphären- und Landkomponente (ICON-A, bzw. TERRA/ICON-Land) aus

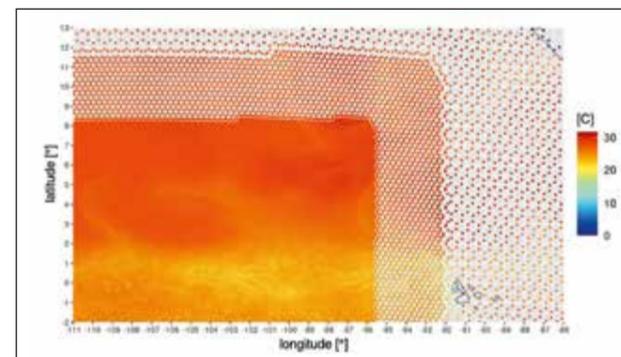


Abb. 2: Darstellung des ZOOM-Gitters im Bereich der lokalen Verfeinerung anhand der Meeresoberflächentemperatur in der Region Ostpazifik / Westküste Südamerika. Die Außenregion entspricht 40 km Auflösung, anschließend folgt ein Bereich mit 20 km, der in eine Verfeinerungsstufe von 10 km übergeht. Die feinste Auflösung bildet die hohe Dynamik, sichtbar anhand der Oberflächenstrukturen, in der Nähe der Galapagos Inseln ab

Dr. Jörn Geisbüsch
 Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
 Dez III 4 (1) Numerische Wettervorhersage
 Offenbach am Main

ZGeoBwIII41NumerischeWettervorhersage@bundeswehr.org

RDir Uwe Paul
 Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
 Dez III 4 (1) Numerische Wettervorhersage
 Offenbach am Main

ZGeoBwIII41NumerischeWettervorhersage@bundeswehr.org

komponenten ICON-Atmosphäre (ICON-A), ICON-Ozean (ICON-O) und dem Seegangmodell (ICON-WAVES) entwickelt. Neben der technischen Umsetzung der Kopplung (Abb. 1), der physikalischen Parametrisierung der Flüsse zwischen den Modellkomponenten und der ozeanischen Datenassimilation, wird der Aufbau einer beobachtungs-basierten Verifikation zur Evaluierung, die Entwicklung eines Experimentiersystems und einer Routinesteuerung angestrebt.

Des Weiteren werden zwei mögliche Wege zur Regionalisierung des ICON-O Modells implementiert und getestet, welche die Qualität der METOC-Unterstützung in den Interessensgebieten steigern. Dieses geschieht einerseits in Form eines separat laufenden Modells mit 1-Wege-Kopplung (ICON-O-LAM) und zum anderen durch eine in das ICON-O integrierte Verfeinerung (Abb. 2) mit 2-Wege-Kopplung (ICON-O-ZOOM). Basierend auf ICON-O-ZOOM sollen zukünftig ausgesuchte Modellgebiete in höherer Auflösung routinemäßig gerechnet werden (Abb. 3). Weitere Modellgebiete können im Bedarfsfall mit ICON-O-LAM global verschiebbar in höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung gerechnet werden.

Gerade für seegehende Einheiten ist neben den genaueren Wettervorhersagen die Seegangsvorhersage von wesentlicher Bedeutung. Das ZGeoBw Fachprojekt ICON-WAVES konzen-

triert sich speziell auf die Simulation von Oberflächenwellen im Ozean und deren Wechselwirkung mit der Atmosphäre (Abb. 4). Aufgrund der Flexibilität und Erweiterbarkeit von ICON kann ICON-WAVES in die Erdsystems simulation sowohl global als auch regional (LAM) eingebunden werden. Diese Einbindung ermöglicht es entscheidend, sowohl Wetter- als auch saisonale Vorhersagen zu verbessern, insbesondere in Regionen, in denen die Wechselwirkungen zwischen Wind, Wellen und Meeresströmungen besonders groß sind (z. B. vor der Französischen Küste um Quessant bei Brest oder vor Südafrika im Bereich der Agulhas-Strömung am Ostkap). Für die sichere Seeschifffahrt ist dies von größter Bedeutung.

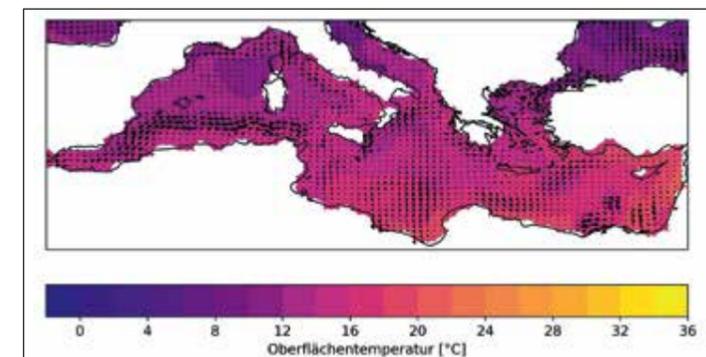


Abb. 3: Modellierung der Oberflächentemperatur (Farben) und -strömung (Pfeile) des Ozeans im Bereich Mittelmeer

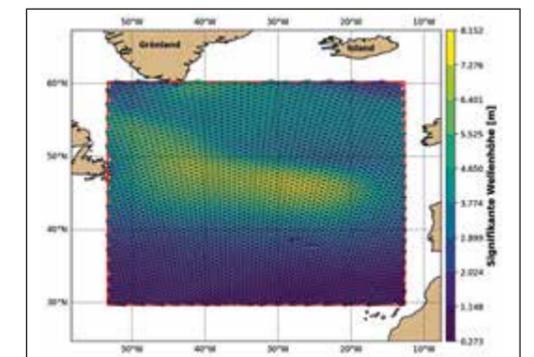


Abb. 4: ICON-WAVES Vorhersage der signifikanten Wellenhöhe für den Nordatlantik in Abhängigkeit von Längen- und Breitengrad im LAM. Die durch den durchschnittlichen Abstand des gezeigten dreieckigen ICON R02B06-Gitters gegebene Auflösung beträgt 40 km

ORR'in Dr. Liselotte Schühl
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
Offenbach am Main

TRAR Frank Flimm
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
Euskirchen

ZGeoBwIII42MeteorologischeSpezialverfahren@bundeswehr.org

ZGeoBwVI3GeoInfoDatenbereitstellung@bundeswehr.org

IT-Service „Wetterinformationen für Kleindrohnen“

Das Wetter ist ein wesentlicher Geofaktor für den Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugsystemen. Insbesondere der Einsatz von Kleindrohnen nimmt momentan stark zu, sodass die Entwicklung digitaler Tools zum Selbstbriefing der Piloten immer dringlicher wird, um kurzfristige Operationen mit bestmöglicher Wetterinformation zu unterstützen und das Flugwetterberatungspersonal der Bundeswehr zu entlasten.

Zur Implementierung von Drohnen als „Schlüsseltechnologie für den Krieg der Zukunft“ hat der Generalinspekteur der Bundeswehr kürzlich eine Task Force „Drohne“ eingesetzt. Als unmittelbares Ergebnis können die Teilstreitkräfte ab 2025 dezentral Kleindrohnen mit einem Startkapital von bis zu 1 Mrd. Euro beschaffen. Im Rahmen der Flugvorbereitung ist unter anderem für jeden Flug außerhalb des (erweiterten) Sichtbereiches eine Flugwetterberatung erforderlich. Bei Flügen mit Kleindrohnen im Sichtbereich ist durch den Luftfahrzeugführer (Abb. 1) selbständig eine Wetterinformation einzuholen. Dies wird jedoch bisher nicht umgesetzt, da bisher keine Möglichkeiten zum Selbstbriefing zur Verfügung stehen. Stattdessen wird die Anforderung einer formalen Flugwetterberatung aktuell noch für alle Drohrentypen praktiziert.

Absicht des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (GeoInfoDBw) ist es, zukünftig nutzerfreundliche digitale Werkzeuge bereitzustellen, um Luftfahrzeugführern von Kleindrohnen zu ermöglichen, sich selbständig zur Wetterlage zu informieren. In einem ersten Schritt hat das Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) im Auftrag des Amtes für



Abb. 1: Die 2. Kompanie des Aufklärungslehrbataillons 3 übt auf dem Standortübungsplatz Wendisch Evern (Niedersachsen) den Flugbetrieb mit der Drohne ALADIN im Nächstbereich (Quelle: <https://ynside.extranet-bw.de/de/aktuelles/mediathek/audios-videos-galerien/woche-im-bild-kw-22-5437324>)

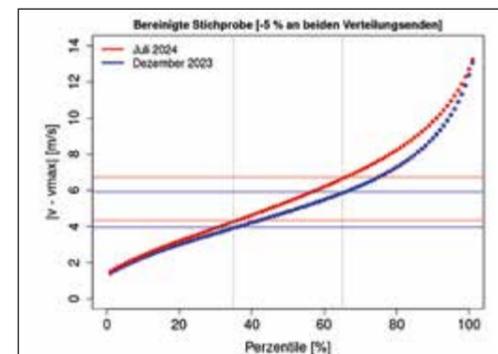


Abb. 2: Zur Festlegung von Schwellenwerten für die Turbulenzintensitäten schwach, moderat, stark werden Perzentile des Böenspreads betrachtet, der in der Flugwetterberatung als Proxy für Turbulenz genutzt wird

RDir Dr. Roland Martin
Amt für Heeresentwicklung (AHEntwg)
Köln

AHEntwgI13GeoInfoW@bundeswehr.org

Heeresentwicklung (AHEntwg) eine Webseite für die von Heer, Luftwaffe und Marine eingesetzten Drohnen ALADIN und MIKADO implementiert. Dafür wurde ein METOC-Verfahren (METOC = meteorologisch-ozeanographisch) entwickelt, das im Deutschen Meteorologischen Rechenzentrum in Offenbach am Main läuft. Hier betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) gemeinsam mit dem GeoInfoDBw einen Hochleistungsrechner, auf dem auch die Wettervorhersagemodelle gerechnet werden, die die Basis für die täglichen Wettervorhersagen des DWD und GeoInfoDBw darstellen. Ziel ist es, mittels des Verfahrens aus den hochdimensionalen Wettervorhersagedaten diejenigen Schlüsselinformation zu extrahieren, die auf eine Gefährdung der Flugsicherheit von Drohnenflügen mit ALADIN und MIKADO hindeuten (Abb. 2). So wird z. B. geprüft, ob die Temperatur- und Windvorhersagen im vertikalen Flugbereich außerhalb der Betriebsgrenzen der Flugmuster liegen oder ob gefährliche Wettererscheinungen wie z. B. Gewitter oder Vereisungsgefahr auftreten können.

Für die nutzerfreundliche Darstellung wird eine Ampeldarstellung abgeleitet, die auf einen Blick erkennbar machen soll, wann und wo besondere Vorsicht geboten ist. Da die finale Entscheidung über die Durchführbarkeit eines Fluges den Luftfahrzeugführern selbst überlassen bleibt, wird ergänzend zu den Ampelfarben „rot“ und „gelb“ die Information mitgeliefert,

welche Geofaktoren zur prognostizierten Einschränkung geführt haben – dies ist die „Wetterinformation“ im eigentlichen Sinne.

Die resultierenden Daten werden im Wetterportal, einer aus dem Intranet der Bundeswehr zugreifbaren Webseite des ZGeoBw auf einer Karte dargestellt (Abb. 3). Hier können zukünftig rund um die Uhr Wetterinformationen zum Selbstbriefing bezogen werden, zunächst flächendeckend für Europa bzw. höher aufgelöst für Deutschland – mit der Möglichkeit einer Ausweitung auf die Einsatzgebiete der Bundeswehr.

Um eine zielorientierte Entwicklung des Gesamtsystems mit einem 360°-Blick zu ermöglichen, hat sich eine agile Zusammenarbeit zwischen Entwicklerteam und Auftraggeber sowie fachlicher Austausch mit den Flugwetterberatern des Ausbildungs- und Übungszentrums Luftbeweglichkeit in Celle und den auszubildenden Luftfahrzeugführern der Heeresaufklärungsschule Munster bewährt.



Abb. 3: Die Webseite des ZGeoBw: Dargestellt ist eine vom Drohrentyp abhängige Ampelvorhersage, die Auskunft darüber gibt, ob die Wettervorhersage eine Gefährdung der Sicherheit für Drohnenflüge aufzeigt. Ausgewählt werden können der Drohrentyp, der gewünschte Zeitpunkt sowie das Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes für Europa (ICON-EU) oder Deutschland (ICON-D2)

Alexander Bütow
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw)
Euskirchen

ZGeoBwV8Atmosphärenphysik@bundeswehr.org

Weiterentwicklungsansätze der Sichtweitenvorhersage für Restlichtverstärkerbrillen

Für den Nachtflugbetrieb von Hubschraubern stellt der Einsatz von Restlichtverstärkerbrillen (BiV-Brillen) einen wichtigen Beitrag zum Sicherheits- und Fähigkeitengewinn dar. Das bisherige Sichtweitenvorhersageverfahren für BiV-Brillen wird nicht mehr allen Einsatzszenarien gerecht, weshalb das Forschungsvorhaben auf eine Verbesserung der Vorhersage abzielt.

Im praktischen Einsatz ist den meisten elektrooptischen Sensorsystemen gleich, dass deren Sichtweite – exakter: Reichweite – aufgrund von Umweltfaktoren begrenzt wird. Im Falle der BiV-Brille beeinflussen die meteorologische Sichtweite und das vorhandene natürliche Restlicht die Reichweite, aber auch andere Faktoren wie Bodenbeschaffenheit, -feuchte oder Fauna spielen eine Rolle.

Aus diesem Grund ist in den 1970er und 80er Jahren ein Verfahren zur Vorhersage von Sichtweiten für BiV-Brillen entwickelt und implementiert worden, welches in seiner wesentlichen Form nach wie vor Bestand im Rahmen der obligatorischen Flugwetterberatung des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr hat. Im Kern arbeitet es über einen empirischen Formelsatz, bei dem sowohl das vorhandene natürliche Restlicht als auch die meteorologische Sichtweite sowie eine Reihe von Korrekturfaktoren als Eingabegrößen eingehen.

Die Koeffizienten und Korrekturfaktoren des Formelsatzes sind mit Hilfe umfangreicher Messflüge bestimmt worden, sodass ein funktioneller Zusammenhang der genannten Ein-



Abb. 1: BiV-Brillen werden durch Fahrzeugführende üblicherweise auf einen Helm geclipst. Der Sichtbereich der BiV-Brille ist deutlich begrenzt (Quelle: Wikimedia Commons)



Abb. 2: Blick durch die BiV-Brille BONIE-M (Quelle: www.bundeswehr.de)

gangsgrößen zur beobachteten Erkennungsreichweite von Wald- und Wiesenflächen hergestellt werden konnte.

Grundsätzlich arbeitet das Verfahren sehr zuverlässig für die im überwiegenden Einsatz befindlichen BiV-Brillen der sogenannten dritten Generation. Das Verfahren ist jedoch nur für flugnavigatorische Sichtaufgaben in einer begrünten Wald- und Wiesenlandschaft und auf die genannte BiV-Brillengeneration mit einem festen Verstärkungsfaktor ausgelegt, weshalb eine unmittelbare Anpassung oder Weiterentwicklung an modernere BiV-Brillen mindestens eng begrenzt oder ohne Durchführung aufwendiger Messkampagnen nicht möglich ist.

Aus diesem Grund wird das Ziel verfolgt, ein neues Beratungsverfahren zu entwickeln, welches in der Lage ist, Bedarfe der Truppe in einer zukunftssichereren und flexibleren Art und Weise zu decken. Statt eines heuristischen Ansatzes wird eine modellbasierte Methodik gewählt, bei der die Abbildungsleistung von BiV-Brillen auf Grundlage validierter physikalischer Vorgänge direkt simuliert wird. Entsprechende Rechenmodelle sind bereits heute verfügbar und in der Lage, den vollständigen Strahlengang bis zur Errechnung der Sichtweite zu simulieren. Für einen praktischen Einsatz in der Wetterberatung erweist sich solche Modellierungssoftware aufgrund der komplexen Bedienung jedoch als unbrauchbar. Vielmehr kann eine solche Software als Basis herangezogen werden, um vereinfachte Modelle z. B. auf Basis von Regressionsrechnungen abzuleiten und sie in einer für den Wetterberater übersichtlichen Nutzerschnittstelle zugänglich zu gestalten.

Ein weiterer, bisher nicht berücksichtigter Aspekt betrifft die Lichtverschmutzung. Da mittlerweile auf Satellitenmessungen

basierende Datensätze der örtlichen Lichtverschmutzung mit weltweiter Abdeckung verfügbar sind, könnten diese Daten als zusätzliche Lichtquelle in ein entsprechendes Beratungsverfahren integriert werden. Als herausfordernd wirkt sich jedoch die örtlich extreme Variabilität der Lichtverschmutzungsmenge auf eine etwaige Streckenberatung aus.

Die Planungen hinsichtlich einer notwendigen Konsolidierung der konkreten Bedarfe an ein neues bzw. verbessertes Beratungsverfahren stehen zum aktuellen Zeitpunkt noch am Anfang. Erst wenn die Bedarfe klar festgelegt worden sind, kann aus den gegebenen Lösungsansätzen ein maßgeschneidertes Beratungsverfahren entwickelt werden.

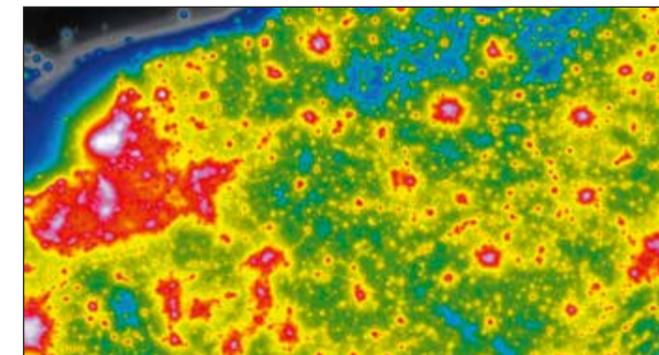


Abb. 3: Simulierte Leuchtdichte im Zenit über Deutschland durch Kunstlicht. Blaue Flächen weisen kaum Lichtverschmutzung auf, Pinkfarbene sind besonders belastet (Quelle: www.lightpollutionmap.info)

6

Forschung Cyber/Informationstechnik

Wehrtechnische Forschung im Bereich der Cyber- und Informationstechnologien orientiert sich einerseits an zivilen und disruptiven Innovationen wie Künstlicher Intelligenz, andererseits sind die spezifischen Gegebenheiten aktueller und zukünftiger Konflikte zu berücksichtigen, die zunehmend „hybrid“ geführt werden. Sie deckt dabei vor allem die Bereiche Informationssicherheit und Informationsoperationen, militärische Kommunikation und Anwendungen zur Führungsunterstützung ab.

Es werden hier zwei Beispiele aus dem breiten Spektrum an Forschungsaktivitäten vorgestellt. Bei diesen geht es zum einen um eine intelligente Emulation von Cyber-Angrifern für Übungszwecke in Cyber-Ranges und zum anderen um eine Netzwerk-Serviceinfrastruktur sowie Sicherheit in taktischen Koalitionsnetzen.

Dabei soll in möglichst großem Umfang auf zivile Technologie zurückgegriffen werden, die für den späteren militärischen Einsatz wo erforderlich angepasst wird. Eine übergreifende Automatisierung in allen wehrtechnischen Forschungsbereichen wird hierbei sichtbar.



Felix Bandosz
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

info@fkie.fraunhofer.de

Dr. Thorsten Aurisch
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

info@fkie.fraunhofer.de

FIST – Ein Projekt zur Optimierung der Netzwerk-Serviceinfrastruktur und Sicherheit in taktischen Koalitionsnetzen

Im Projekt **Federated Information Sharing over Tactical Networks (FIST) II** hat das Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE) zusammen mit der Firma IABG Erweiterungen für strategische und taktische IT-Infrastrukturen für zukünftige Koalitionseinsätze erarbeitet, um Initiativen wie das **NATO Federated Mission Networking (FMN)** zu unterstützen.

Im Bereich Infrastruktur wurde gezeigt, dass die Reduzierung des Kontrollaufwandes von „Software-defined Tactical Networks“ (SDTNs) notwendig ist, woraufhin eine adaptive Zuweisung von SDN-Controllern erarbeitet wurde. Diese teilt das Netzwerk in Cluster auf, um die Robustheit gegenüber Ausfällen zu erhöhen und einen effizienten Lastausgleich zu ermöglichen. Dazu wurde ein Multi-Controller-Setup vorgestellt, welches ein software-basiertes Clustering in Abhängigkeit des Kontrollaufwandes innerhalb des Netzwerks umsetzt. Ein weiteres Themenfeld ist die Mitwirkung in der Standardisierung der mobilen taktischen Domäne im Rahmen von FMN. Hier ist das Fraunhofer FKIE im NATO Tactical Edge Syndicate direkt an der Entwicklung von Spezifikationen für kommende FMN-Spirals beteiligt. Die Standardisierung von Schnittstellen für digitale Sprache mit Push-to-Talk ist eines der derzeit wichtigsten Themen. Auf der NATO CWIX 2024 wurden mögliche Verfahren erprobt und auf Interoperabilität getestet.

Im Bereich der Informationsdienste und des Service Management & Control wurde unter anderem eine neue Übertragungsmethode für Sensordaten des Internets der Dinge (IoT)



Abb. 1: Testinfrastruktur für die Evaluation der interoperablen Kommunikationssysteme auf der CWIX



Abb. 2: Aufbau taktischer Hand-Funkgeräte auf der CWIX

Jonathan Kirchoff
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

info@fkie.fraunhofer.de

Philipp Zißner
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

info@fkie.fraunhofer.de

entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass die komprimierte MQTT-Verbindung resistenter gegen Störungen ist.

Im Technologiefeld Sicherheit wurden im Rahmen der Unterstützung des FMN IWG Tactical Edge Syndicates Konzepte zur präventiven Netzwerksicherheit erarbeitet. Hierbei handelt es sich um eine zusätzliche Absicherung vertraulicher Informationen mit NINE und STaC-IS, die über die Verschlüsselungsmechanismen der Funkgeräte hinaus gehen. Im Bereich reaktiver Netzwerksicherheit wurden Verbesserungen für das Sicherheitsmanagement in multinationalen militärischen Operationen erarbeitet. Zur verbesserten Erkennung von Cyberangriffen wurde ein Konzept zum Training eines KI-gestützten Systems entworfen, das auf Federated Learning und unter Partnernationen verteilten Trainingsdaten basiert. Mittels Reinforcement Learning wurde untersucht, wie optimale Reaktionsstrategien bei Cyberangriffen in taktischen Netzen erlernt werden können.

Ein sicherer, browserbasierter Zugriff auf die SOA & IdM RuDi Plattform war ein Ergebnis im Kontext Anwendungssicherheit. Weiterhin wurde die Steuerung des Datenaustauschs zwischen Sicherheitsdomänen, die auf Information Exchange Gateways (IEG) und Sicherheitslabels nach ADatP-4774/47748-Standard basiert, für andere Protokolle, z. B. XMPP, erweitert. Parallel dazu

wurde Data Centric Security mit dem Standard ACP 240 untersucht. Dieser bietet eine interoperable Möglichkeit, Daten sicher zwischen Nationen auszutauschen.

Die Notwendigkeit von interoperablen Kommunikationssystemen bzw. IT-Infrastrukturen bei Koalitionseinsätzen war die Motivation, die erarbeiteten Lösungsansätze über mehrere Jahre bei der CWIX zu evaluieren. Hierzu wurde eine umfangreiche Testinfrastruktur aufgebaut (vgl. Abb. 1 bis 3). Der Fokus der Tests lag in den Bereichen Dynamic Link Exchange Protocol (DLEP), Tactical Voice auf Basis STANAG 5634, Network Awareness und Coalition Routing. Auch mit der SOA & IdM RuDi Plattform wurden detaillierte Interoperabilitätsuntersuchungen zu den Schwerpunkten Servicenutzung per Browser, Sicheres XMPP über Domänengrenzen, Service Management and Control (SMC) und Friendly Force Tracking (FFT) durchgeführt.

Durch die erfolgreichen Tests hat FIST II einen erheblichen Beitrag zur Verifikation von FMN Spiral 6 und der Exploration zukünftiger Spirals beigetragen.



Abb. 3: Aufbau taktischer Fahrzeug-Funkgeräte auf der CWIX

Intelligente Emulation von Cyber-Angreifern für Übungszwecke in Cyber-Ranges

Cyber-Ranges ermöglichen praktische Übungen für Sicherheitspersonal durch die Emulation von Cyber-Angriffen. Adversary Emulation Tools automatisieren diese ressourcenintensive Emulation, basieren jedoch häufig auf vordefinierten Szenarien. Diese Studie untersucht, wie sich Angriffe in solchen Übungen ohne menschliche Interaktion oder feste Szenarien automatisieren lassen.

Um gegen reale Cyber-Bedrohungen besser gerüstet zu sein, kann die Verteidigung von Produktivnetzen in Cyber-Range-Übungen trainiert werden. Eine beispielhafte Topologie einer Cyber-Range ist in Abb. 1 dargestellt und umfasst eine Windows Active Directory Domäne mit einem Windows Server als Domain Controller und zwei Windows 10 Workstations, einen Ubuntu Log-Server und eine Kali Linux Maschine, die als Angreifer fungiert. Das manuelle Nachbilden von Angreifern in solchen Umgebungen ist sehr ressourcenintensiv, da speziell geschultes Personal und viel Zeit während der Vorbereitung sowie der Ausführung von Angriffsszenarien benötigt werden.

Sogenannte Adversary Emulation Tools automatisieren die Ausführung eines nachgebildeten Angriffs teilweise, z. B. mithilfe von Skripten oder vordefinierten Angriffsszenarien. Allerdings wird für ihre Verwendung häufig noch speziell geschultes Personal benötigt und durch die wiederholte Verwendung von vordefinierten Szenarien kann der Lerneffekt einer Übung geringer ausfallen. Durch diese Herausforderung motiviert, wurde im Rahmen dieser Studie untersucht, inwiefern sich Cyber-Angriffsaktivitäten im Rahmen von Übungen automa-

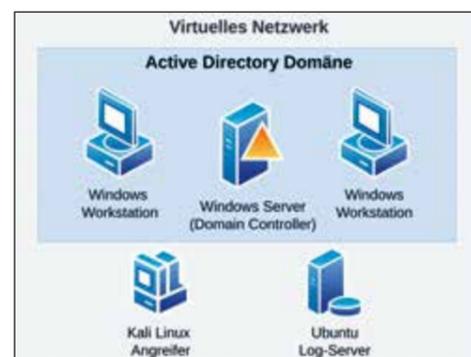


Abb. 1: Beispielhafter Aufbau einer Cyber-Range

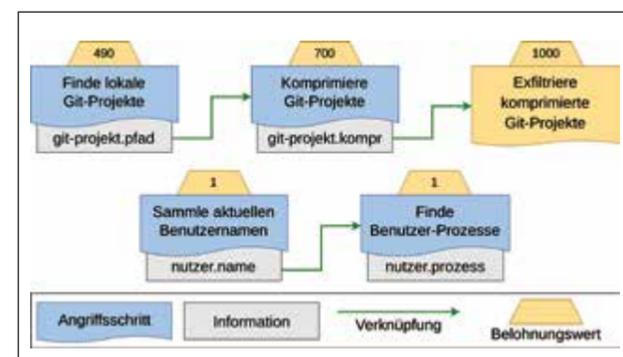


Abb. 2: Verknüpfung von Angriffsschritten über gesammelte bzw. benötigte Informationen

tisieren lassen, sodass keine menschliche Interaktion oder vordefinierte Szenarien benötigt werden.

Aus einer Analyse verwandter Arbeiten konnte sich die Cybersicherheitsplattform MITRE Caldera durch ihre Modularität und den Einsatz von Planungslogiken, die die Emulation komplexer Angreiferverhalten erlauben, abheben. Als Ergebnis der bisherigen Arbeiten wurde daher eine neue Planungslogik für Caldera entwickelt – der Bounty Hunter (z. Dt. Kopfgeldjäger). Im Rahmen einer Übung wird das Ziel des Bounty Hunters konfiguriert, das anschließend, namensgebend für die Planungslogik, vollkommen autonom verfolgt wird. Dabei agiert der emulierte Angreifer abhängig von Belohnungswerten von Angriffsschritten, die abhängig von den definierten Zielen berechnet werden. Dafür werden Verknüpfungen zwischen Angriffsschritten genutzt, die anhand von gesammelten bzw. benötigten Informationen geknüpft werden. Abb. 2 zeigt die beispielhafte Verknüpfung zwischen Angriffsschritten. Dabei haben die Schritte, die zum konfigurierten Ziel führen, hohe Belohnungswerte (490 bzw. 700) und Schritte, die nicht zum Ziel führen, niedrige Standardwerte.

Der Ablauf einer Übung mit der neu entwickelten Planungslogik wird in Abb. 3 dargestellt. In diesem Beispiel soll der emulierte Angreifer eine Windows Active Directory Domäne durch einen Kerberos Golden Ticket Angriff kompromittieren – ein Szenario, das im Rahmen dieser Studie einer APT29-Kampagne nachempfunden wurde. Zu Beginn findet eine autonome, initiale Systemkompromittierung mittels Netzwerk-Scans und dem Ausnutzen gefundener Schwachstellen statt. Anschließend beginnt der Angreifer mit der Ausführung von Befehlen auf dem Zielsystem. In diesem Fall findet eine autonome Rechte-

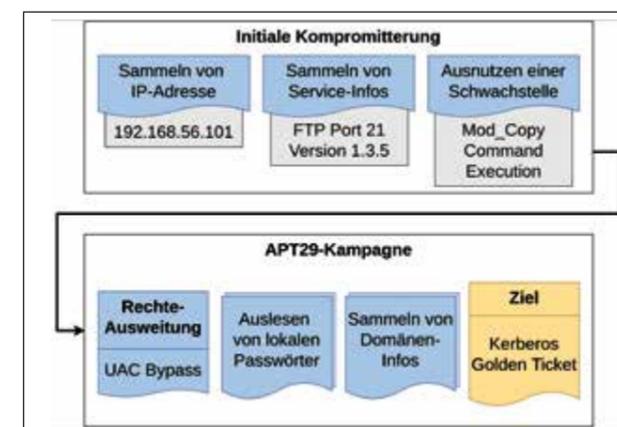


Abb. 3: Ablauf eines Angriffsszenarios unter Verwendung des neuen Bounty Hunter-Planers

ausweitung statt, um lokal zwischengespeicherte Passwörter aus dem Arbeitsspeicher auslesen zu können und einige Informationen über die aktive Domäne zu sammeln. Da der Angreifer zu diesem Zeitpunkt selbstständig alle Informationen gesammelt hat, die er für die Ausführung seines Ziels benötigt, führt er dieses aus und stoppt dann seine Aktivitäten.

Die Ergebnisse der bisherigen Arbeiten zeigen, dass sich Cyber-Angriffsaktivitäten im Rahmen von Cyber-Ranges mithilfe des neu entwickelten Caldera-Plugins „Bounty Hunter“ automatisieren lassen. Während der Ausführung ist keine menschliche Interaktion notwendig und es werden keine vordefinierten Szenarien genutzt. Somit entstehen pro Übung automatisiert neue Szenarien und es tritt keine Langeweile bei den Übenden aufgrund bereits bekannter Angriffsabläufe auf. Aktuelle Arbeiten im Rahmen der Studie beschäftigen sich mit der Integration von Detektions- sowie Erfolgswahrscheinlichkeiten von Angreiferaktivitäten.

7

Forschung mit Bundeswehrbezug an den Universitäten der Bundeswehr

An beiden Universitäten der Bundeswehr in Hamburg und München wird in einem breiten Spektrum universitäre Forschung betrieben, die auch für die Bereiche Sicherheit und Verteidigung von Relevanz ist, beispielsweise im Bereich Cyber- und Informationstechnik, der geistes- und sozialwissenschaftlichen Forschung, der wehrmedizinischen und militärpsychologischen oder auch der geo- und ingenieurwissenschaftlichen Forschung.

Beide Universitäten setzen hier auf große Interdisziplinarität. Die Universität der Bundeswehr in München verfügt zu diesem Zweck bereits seit längerem über mehrere Forschungszentren und -institute. Die notwendigen Erkenntnisse für sicherheits- und verteidigungsrelevante Forschung können am umfassendsten in Kooperationen erzielt werden. Die Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg befindet sich in einem Strategieprozess der Profilierung, der auch Forschungsschwerpunkte mit Ausrichtung auf Sicherheit und Verteidigung umfassen wird. Beide Universitäten sind seit Jahren verlässliche Partner für das BMVg und verfügen über zahlreiche etablierte (Forschungs-) Kooperationen mit dem BMVg und Dienststellen der Bundeswehr, mit nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen, der Sicherheits- und Verteidigungsindustrie sowie der zivilen Wirtschaft.

Beiden Universitäten gelingt es auf diese Weise, ingenieurwissenschaftliche Forschung und Forschung zur Kompetenzbildung sowie der Gestaltung von Organisation und Arbeit der Zukunft zu verbinden. Den Anforderungen und Chancen der

Digitalisierung und Künstlichen Intelligenz wird in all diesen Forschungsfeldern auf lange Sicht eine zentrale Rolle zukommen. Das Thema der Sicherheit und Verteidigung verstehen wir dabei weit.

Geforscht wird seit 2020 auch im Rahmen des zur Ressortforschung komplementär ausgerichteten und von beiden UniBw getragenen Zentrums für Digitalisierungs- und Technologieforschung (dtec.bw), das ministeriell im Verantwortungsbereich des Abteilungsleiters CIT des BMVg als Ressort-CIO (Chief Information Officer) ist und gegenwärtig durch die Europäische Union im Rahmen von NextGenEU finanziert wird. Das dtec.bw ist für die beiden UniBw ein großer Erfolg. Die bisher erzielten Forschungsergebnisse aus den 66 universitären dtec.bw-Forschungsprojekten können ebenfalls dazu beitragen, dass die Bundeswehr ihre verfassungsmäßigen Aufgaben in einer digitalen Umwelt selbstständig, selbstbestimmt und sicher ausüben kann. Dies wird vor allem durch das hohe Interesse von Dienststellen der Bw an den Projektergebnissen und durch zahlreiche Kooperationen mit Dienststellen der Bw innerhalb der einzelnen dtec.bw-Projekte deutlich. Auch der Wissenschaftsrat, der das dtec.bw evaluiert hat, attestiert den dtec.bw-Forschenden teilweise qualitativ sehr hochwertige Projektergebnisse und empfiehlt, die universitäre Forschung des dtec.bw noch stärker an den Digitalisierungsbedarfen der Bundeswehr auszurichten.

Diese disziplinäre Vielfalt der universitären Forschung vor allem auch in den Bereichen Sicherheit und Verteidigung bilden die hier aufgenommenen Beiträge beispielhaft ab.



Henrik Sebastian Steude
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Dr. Alexander Diedrich
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

KI-gestützte Anomalieerkennung und Diagnose für komplexe Systeme: Von der Internationalen Raumstation zur militärischen Anwendung

Das Projekt (K)ISS entwickelt KI-basierte Lösungen zur Anomalieerkennung und Diagnose komplexer Systeme. Am Beispiel der Internationalen Raumstation ISS entstehen wegweisende Technologien mit Potenzial für Raumfahrt und militärische Anwendungen. Dabei ermöglicht eine innovative MLOps-Plattform (MLOps: Machine Learning Operations) die effiziente Umsetzung von KI-Algorithmen und verspricht Verbesserungen in Effizienz und Sicherheit technischer Systeme.

Mit zunehmender Komplexität moderner technischer Systeme wächst auch die Herausforderung der schnellen und präzisen Fehleranalyse trotz steigender Sensorendichte. Dies ist besonders relevant in der Raumfahrt und bei militärischen Anwendungen, wo hohe Zuverlässigkeit unter extremen Bedingungen gefordert ist. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, initiierten die Bundeswehruniversitäten ein Projekt in Zusammenarbeit mit Airbus Defence and Space und Just Add AI aus Bremen. Ziel war die Entwicklung innovativer Lösungen für Anomalieerkennung, Diagnose und Rekonfiguration (Abb. 1). Die Internationale Raumstation diente als primäres Anwendungsbeispiel, wobei die Übertragbarkeit auf andere komplexe Systeme, einschließlich militärischer Anwendungen, von Anfang an ein zentrales Anliegen war.

Methodische Grundlage der Projektarbeit war die Kombination von maschinellem Lernen und symbolischer KI zur Entwicklung eines umfassenden Assistenzsystems. Für die Anomalieerkennung haben sich neuronale Netzwerke als besonders wichtige Technologie abgezeichnet, während für die Diagnose ein hybrider Ansatz mit der Kombination von Maschinellen



Abb. 1: (K)ISS-Projekt

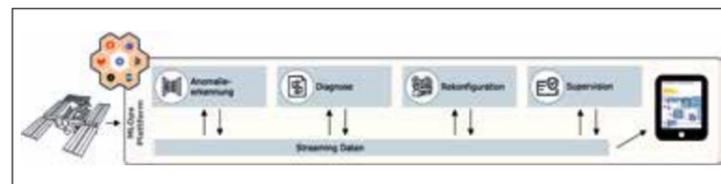


Abb. 2: Übersicht der modularen KI-Services im (K)ISS-Projekt

Lukas Moddemann
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Univ.-Prof. Dr. Oliver Niggemann
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Lernen mit Logikkalkülen verfolgt wurde. Die entwickelten Lösungen (Abb. 2) zeichnen sich durch ihre Interpretierbarkeit, Übertragbarkeit und Modularität aus, was sie für eine Vielzahl von Anwendungen attraktiv macht.

Ein weiterer Fokus lag auf der Entwicklung einer MLOps-Plattform (Machine Learning Operations), die den gesamten Lebenszyklus von KI-Anwendungen unterstützt (Abb. 3). Diese Plattform ermöglicht nicht nur die effiziente Implementierung, Produktivsetzung und modulare Kopplung der Algorithmen, sondern entwickelte sich auch zu einem eigenständigen Forschungsgegenstand. Sie wurde unabhängig von spezifischen Anwendungsfällen konzipiert, mit einem Airbus-Innovationspreis ausgezeichnet und auf mehreren Fachkonferenzen vorgestellt. Die Plattform bildet die Grundlage für die Gründung des Start-ups prokuba.ai GmbH, die nun die Weiterentwicklung und Vermarktung der MLOps Plattform übernimmt. Sie bietet branchenübergreifende Einsatzmöglichkeiten und unterstützt sowohl den Einsatz in privaten Rechenzentren und in der Cloud als auch in vollständig isolierten (air-gapped) Umgebungen ohne Verbindung zu externen Netzwerken, was sie besonders für sicherheitskritische Anwendungen attraktiv macht.

Die im Projekt entwickelten Technologien und Konzepte leisten einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Effizienz, Flexibilität

und Sicherheit in komplexen technischen Systemen. Dabei sind die Ergebnisse des Projektes bereits für den Einsatz im Nachfolgeprojekt der ISS sowie in zukünftigen Raumfahrtmissionen vorgesehen. Neben der konkreten Anwendungsperspektive in der Raumfahrt bietet sich auch für militärische Anwendungen ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit in kritischen Situationen. In der Bundeswehr kann ein solches Assistenzsystem im Bestand zur Optimierung von Wartungsprozessen von autonomen Systemen, wie unbemannten Flugobjekten sowie Land- und Wasserfahrzeugen, eingesetzt werden. Aber auch zur Unterstützung komplexer Gefechtsentscheidungen und zur Verbesserung der Multidomain-Integration bieten sich hier Einsatzmöglichkeiten für die KI-basierte Analyse und Diagnose.

Aufgrund des Erfolgs wurde das Projekt um zwei Jahre verlängert, um die vielversprechende Forschung und Entwicklung in diesem wichtigen Bereich fortzusetzen und zu vertiefen. In der Verlängerung werden neue Forschungsfragen adressiert, insbesondere der Transfer der entwickelten Verfahren auf weitere komplexe Systeme wie das Orion Multi-Purpose Crew Vehicle (MPCV). Das (K)ISS Projekt wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert; dtec.bw wird von der Europäischen Union – Next-GenerationEU finanziert.

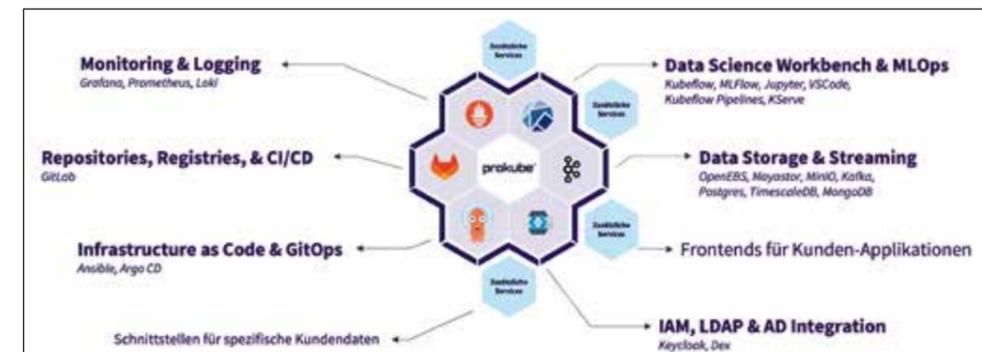


Abb. 3: MLOps-Plattform und ihre Kernfunktionalitäten

Dr. Fabio Ibrahim
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
 Professur für Persönlichkeitspsychologie und Psychologische Diagnostik
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Prof. Dr. Philipp Yorck Herzberg
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
 Professur für Persönlichkeitspsychologie und Psychologische Diagnostik
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Close Quarters Battle – Prädiktoren und Trainingseffekte bei unspezialisierten Soldaten und Spezialkräften der Polizei

Close Quarters Battle (CQB) ist eine zentrale Fähigkeit für Spezialeinheiten. Diese Studie untersuchte Prädiktoren der CQB-Leistung und Trainingseffekte. Die antizipatorische Stressreaktion korrelierte positiv, Extraversion hingegen negativ mit der taktischen Leistung. Das Training verbesserte die taktische Leistung beider Gruppen signifikant.

Die zunehmende Urbanisierung und die steigende Zahl asymmetrischer Konflikte verlagern militärische Auseinandersetzungen zunehmend in städtische Gebiete. Bereits heute lebt ein Großteil der Weltbevölkerung in Städten, und in den kommenden Jahren wird ein weiterer Anstieg der Urbanisierungsrate erwartet. Diese Entwicklung macht urbane Operationsfähigkeiten zu einem essenziellen Faktor für militärische und sicherheitsrelevante Akteure, da Konflikte in Städten neue taktische Herausforderungen und Chancen mit sich bringen. Städtische Umgebungen bieten irregulären und regulären Konfliktparteien vielfältige Vorteile, wie bessere Überwachungsmöglichkeiten, die Nutzung unterirdischer Infrastrukturen wie Tunnelsysteme und die Erschwerung der Ressourcenbündelung durch den Gegner. Gleichzeitig stellt die Unterscheidung zwischen Zivilisten und Kombattanten in urbanen Gefechten eine erhebliche Herausforderung dar. In solchen Szenarien sind technologische Vorteile oft weniger entscheidend, während die Ausbildung und Fähigkeiten der eingesetzten Kräfte maßgeblich zum Erfolg beitragen.



Abb. 1: Beispielhaftes Foto der Eye-Tracking-Aufnahme aus einem CQB-Szenario

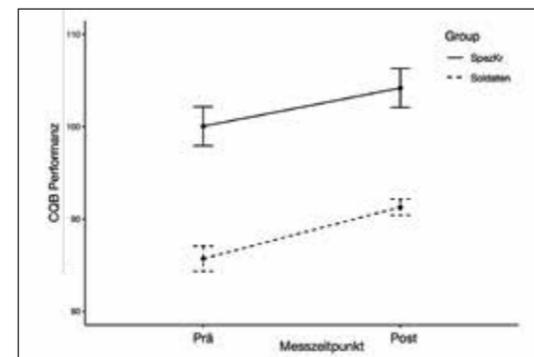


Abb. 2: Einfluss des CQB-Trainings auf die CQB-Gesamtleistung zwischen polizeilichen Spezialeinheiten und nicht-spezialisierten Soldaten

Eine Schlüsselkompetenz in urbanen Einsätzen ist der Nahkampf auf engem Raum, bekannt als Close Quarters Battle (CQB). Diese mikro-taktischen Ansätze setzen auf Geschwindigkeit, Präzision und die Nutzung räumlicher Geometrie, was ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit und schnelle Entscheidungsfindung erfordert. Ursprünglich für Spezialeinheiten entwickelt, ist CQB mittlerweile auch für reguläre Infanterieeinheiten essenziell, insbesondere in urbanisierten Konfliktszenarien. Auch im polizeilichen Kontext spielt CQB eine entscheidende Rolle. Spezialeinheiten nutzen diese Taktiken zur Terrorismusbekämpfung, bei der Festnahme bewaffneter Täter und bei Geiselnbefreiungen. Aufgrund der Komplexität von CQB stellen Training und individuelle Fähigkeiten hohe Anforderungen, die Implementierung ist zeit- und kostenintensiv. Gleichzeitig bleibt die Beherrschung solcher Taktiken unverzichtbar, um die Sicherheit von Zivilisten zu gewährleisten und rechtliche Vorgaben einzuhalten.

Eine Stichprobe von N = 35 Teilnehmer:innen (n = 18 polizeiliche Spezialeinsatzkräfte) absolvierte ein CQB-Training sowie einen CQB-Leistungstest vor und nach dem Training. Die Leistung wurde anhand einer standardisierten Eye-Tracking-Analyse (Abb. 1) und videobasierter Bewertungen durch zwei Experten evaluiert. Die Stressreaktion wurde während des CQB (Herzfrequenz) sowie vor und nach dem CQB (Alpha-Amylase und Cortisol im Speichel) gemessen.

Das Training verbesserte die Leistung sowohl von spezialisierten als auch nicht-spezialisierten Kräften ($F(1,15) = 11.372, p = .004, \eta^2P = 0.431$; Abb. 2), insbesondere im taktischen Verhalten, während sich die Reaktionszeit und das Blickverhalten nicht verbesserten. Die Stressreaktion nahm nach dem Training ab

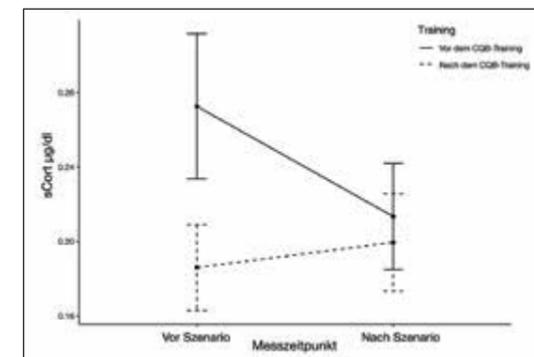


Abb. 3: Kortisol-Speichelkonzentration vor und nach dem CQB-Szenario bevor und nach dem CQB-Training

($F(1,32) = 6.647, p = .015, \eta^2 = 0.048$; Abb. 3 und 4), und die antizipatorische Stressreaktion war positiv mit der CQB-Leistung vor dem Training assoziiert ($\rho = .512, p = .005$). Darüber hinaus sagte Extraversion die CQB-Leistung negativ voraus ($\beta = -.40, p = .035$), und das durchschnittliche 2D:4D-Verhältnis korrelierte stark mit dem Blickverhalten ($r = .45, p = .007$), dem taktischen Verhalten ($r = .41, p = .019$) und der Aufmerksamkeitsfähigkeit ($\rho = .57, p < .001$).

Die Ergebnisse zeigen, dass ein kompaktes CQB-Training effektiv zur Leistungssteigerung und Stressreduktion beitragen kann. Das Blickverhalten erwies sich dabei als valider Indikator für CQB-Expertise und bietet wertvolle Einblicke in das Kompetenzniveau der Teilnehmer:innen. Eine erhöhte antizipatorische Stressreaktion förderte die Leistung, während Extraversion und das 2D:4D-Verhältnis wichtige Prädiktoren für die Eignungsdiagnostik darstellen.

Potenzielle Anwendungsbereiche liegen in der Entwicklung kompakter CQB-Kurse, die sowohl für Anfänger:innen als auch für erfahrene Kräfte angepasst werden können. Leistungsfacetten wie taktisches Verhalten, Waffenhandhabung, Blickverhalten und Reaktionszeit bieten sich als praktische Evaluationsvorlagen an. Insbesondere das Blickverhalten kann zur Personalauswahl und Bewertung von Trainingsmaßnahmen genutzt werden, um CQB-Fähigkeiten gezielt zu fördern und weiterzuentwickeln.

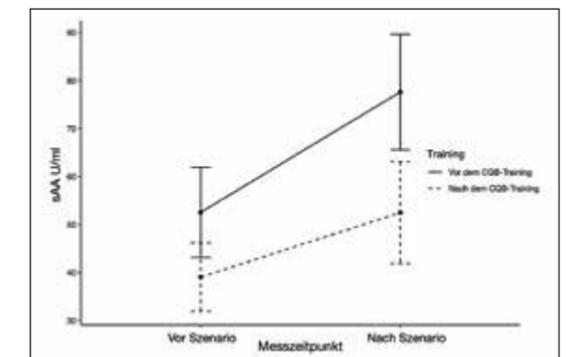


Abb. 4: Alpha-Amylase-Speichelkonzentration vor und nach dem CQB-Szenario bevor und nach dem CQB-Training

Hptm d.R. Dr. Tom Brandt
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

Prof. Dr. Marko Hofmann
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

Physiologische und psychologische Stressreaktionen bei Soldatinnen und Soldaten in virtuellen Kriegsszenarien

Soldatinnen und Soldaten (Sdt) müssen unter extremem Stress komplexe und teilweise existentielle Entscheidungen treffen. Die Erforschung physiologischer und psychologischer Stressreaktionen in virtueller Realität soll dazu beitragen, das Stresserleben von Sdt besser zu verstehen, um die Einsatzvorbereitung weiter zu optimieren und somit die Kriegstüchtigkeit der deutschen Streitkräfte zu verbessern.

Akute Gefahr für Leib und Leben, extreme klimatische Bedingungen, Lärm, Ungewissheit und hohe körperliche Belastungen sind immanente Bestandteile kriegerischer Konflikte und prägen die Einsatzrealität vieler Sdt. Zur optimalen Vorbereitung von Sdt auf reale Kriegseinsätze ist ein fundiertes Verständnis über die individuelle Wahrnehmung und Verarbeitung von physischem und psychischem Stress essentiell. Das Smart Health Lab (SHL) an der Universität der Bundeswehr München (UniBw M) widmet sich dem Ziel, dieses Verständnis zu erweitern, mit einem interdisziplinären Ansatz, bei dem Forschungsmethoden der Sportbiologie, Psychologie und Informatik zum Einsatz kommen.

Die Darstellung realitätsnaher Kriegsszenarien stellt dabei, aufgrund des hohen Personal-, Material- und Zeitaufwands, eine besondere Herausforderung dar. Das SHL bedient sich daher eines virtuellen Handlungstrainers. Mit diesem lassen sich vielfältige, immersive Kriegsszenarien in virtueller Realität (VR) generieren und flexibel sowie ressourcenschonend für verschiedene Forschungsvorhaben anpassen (Abb. 1).



Abb. 1: Soldat im virtuellen Handlungstrainer



Abb. 2: Analyse von Speichelkortisol im Nasslabor

Prof. Dr. Karl-Heinz Renner
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

Darüber hinaus ermöglicht die labortechnische Ausstattung des SHL eine ganzheitliche Erhebung physiologischer und psychologischer Parameter. Die Datenerhebung durch psychometrische Messverfahren und körpernahe Sensorik wird dabei zunehmend durch die Analyse von Stresshormonen (z. B. Kortisol, Alpha-Amylase) in einem neu etablierten Nasslabor ergänzt (Abb. 2). Zur Untersuchung des Einflusses externer Stressoren auf physiologische und psychologische Parameter wurden inzwischen mehrere Studien durchgeführt, in denen Sdt der UniBw M verschiedene virtuelle Szenarien absolvierten (Abb. 3). Stressoren wie Umgebungsgeräusche, Feinddruck und körperliche Belastung wurden dabei gezielt variiert.

Die bisherigen Studienergebnisse weisen darauf hin, dass sich durch VR-Kriegsszenarien wirksam Stress bei Sdt erzeugen lässt und die Leistungsfähigkeit mit steigender Intensität applizierter Stressoren negativ beeinflusst wird. Allerdings deuten die Ergebnisse gleichzeitig auf deutliche interindividuelle Unterschiede im Stresserleben zwischen den Sdt hin. Ebenso scheint eine graduelle Erhöhung der Intensität applizierter Stressoren nicht zwangsläufig in stärkeren Stressreaktionen zu resultieren. Mit Blick auf den Stressor „Feinddruck“ wurden beispielsweise sowohl intensive Gefechtshandlungen als auch lange Gefechts-pausen und Aufklärungstätigkeiten im urbanen Umfeld als besonders stressig identifiziert (Abb. 4). Zukünftige Studien



Abb. 3: Virtuelles Szenario aus Probandenperspektive

OTL d.R. Prof. Dr. Annette Schmidt
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

werden daher den Einfluss verschiedener individueller Faktoren wie VR-Vorerfahrung, Ausbildungsstand und Persönlichkeitsmerkmale auf das Stresserleben genauer analysieren. Weiterhin sollen Analysen der Blutglucosekonzentration und Stresshormonausschüttung zusätzliche Erkenntnisse über die physiologischen Mechanismen der Stressreaktion liefern.

Langfristig tragen die Forschungsprojekte des SHL dazu bei, VR-Szenarien um adaptive Inhalte zu erweitern, wobei die Erfassung von Stressreaktionen eine flexible Anpassung der Szenarien ermöglichen soll, um Sdt der Bundeswehr eine individualisierte Ausbildung zu bieten und so ihre Kriegstüchtigkeit zu steigern.



Abb. 4: Virtuelles Szenario mit Verwundetenlage

Resttragfähigkeitsanalyse von Schraubverbindungen nach Druckwellenbelastung zur Sicherheitsbewertung kritischer Infrastrukturen wie Brücken

Um sichere Passagen für Militär- und Zivilfahrzeuge nach Druckwellenbelastung zu gewährleisten, untersucht dieses Projekt die Resttragfähigkeit strategisch wichtiger Brücken. Ein dafür entwickelter Versuchsstand zur Grundlagenforschung analysiert experimentell und numerisch die Belastung von Schraubverbindungen. Dafür wurden im Explosionstunnel typische Schrauben des modernen Stahlbaus getestet.

Der Schutz kritischer Infrastruktur gewinnt angesichts aktueller weltpolitischer Entwicklungen zunehmend an Bedeutung. Bisher lag der Fokus der Forschung auf beschädigten Stahlbetonbauteilen, da dieser Werkstoff im Hoch- und Brückenbau der bisherigen Krisenregionen dominiert. In Hochtechnologie-ländern spielen aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit jedoch Stahlkonstruktionen eine zentrale Rolle, weshalb die Bewertung ihrer Weiternutzung nach Explosionseinwirkungen zunehmend wichtiger wird.

Der Fähigkeitsaufbau in der Landes- und Bündnisverteidigung erfordert den Schutz kritischer Infrastruktur, insbesondere von Stahlkonstruktionen nach Explosionen, weswegen dieses Projekt in Zusammenarbeit mit dem BAIUDBw Abt. Infra entwickelt wurde. Militär- und zivile Fahrzeuge müssen Verkehrsstrecken und Brücken in Krisensituationen sicher passieren können.

Aufbauend auf das bereits seit mehreren Jahren laufende „BRASSCO“-Projekt der Universität der Bundeswehr zur Schnelleinstufung für Brücken, liegt die Herausforderung



Abb. 1: Entwickelter Versuchsstand zur Prüfung von Schraubverbindungen unter Explosionslast

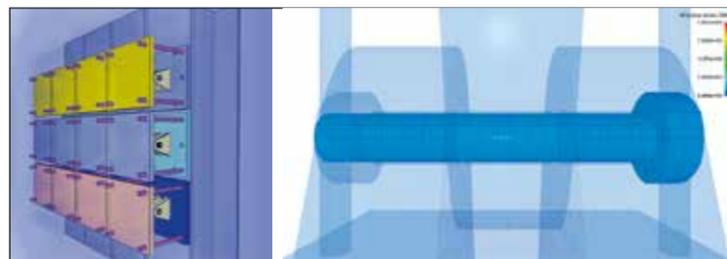


Abb. 2: FEM-Modell des Prüfstands mit verschiedenen Schraubvarianten (links) und beispielhafte Schraubverbindung Schertest M16 (rechts)

nun in der schnellen Einschätzung der Resttragfähigkeit beschädigter Bauwerke, um fundierte Entscheidungen zur Weiternutzung oder Sicherung zu treffen.

Um dieses kritische Problem anzugehen, wurden numerische und experimentelle Versuche angestellt, um das Verhalten von Schraubverbindungen unter hochdynamischer Einwirkung zu verstehen. Hauptmotivation der durchgeführten Studien war das Sammeln von Daten zur Beurteilung von Versagens-szenarien sowie die Entwicklung und Kalibrierung numerischer Berechnungsmodelle. Das grundlegende Strukturverhalten unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten wurde 2024 durch einen eigens dafür entwickelten Versuchsstand (Abb. 1) an der Wehrtechnischen Dienststelle 52 in Oberjettenberg untersucht. Geprüft wurden Schraubverbindungen aus verschiedenen Materialien, mit unterschiedlichen Durchmessern sowie vorgespannte und nicht vorgespannte Schrauben. Die Versuchsvarianten variieren in Bezug auf Belastung, Abstände, Vorspannung und Festigkeit (Abb. 2).

Die Sprengversuche fanden in der sogenannten kleinen Sprengkammer der WTD 52 statt, wo das Prüfgestell mit den Probestücken (Schraubverbindungen) einer kontrollierten Explosion ausgesetzt wurde. Dieses entwickelte Prüfverfahren basiert lose auf der Stoßrohr-Prüfung nach Glasbaunorm, bei der Glasflächen gegen Druckwellen getestet werden.

Die Kombination aus experimentellen und numerischen Methoden bestätigte, dass Schraubverbindungen unter Sprengbelastung erheblichen Deformationen und Versagensmechanismen unterliegen (Abb. 3). Ebenso dass hochfeste Stähle unter diesen extremen Bedingungen besser abschneiden als herkömmliche.



Abb. 3: Aus dem Teststand herausgezogene Schrauben nach Explosion M12 (oben) und M16 (unten)

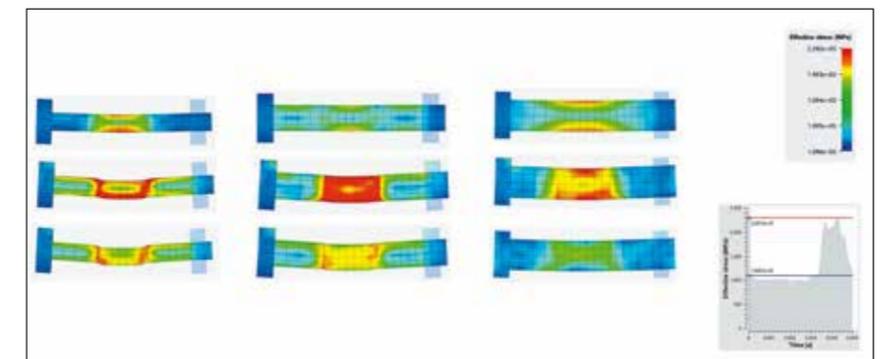


Abb. 4: Spannungsverteilung innerhalb der Schraubverbindung im FEM-Modell (M12, M16 und M20)

Die numerischen Simulationen lieferten zudem wertvolle Einblicke in die Spannungsverteilung innerhalb der Schraubverbindung, die nun mit den in den Experimenten gemessenen Daten weiter untersucht werden (Abb. 4).

Da diese Studie vor allem grundlegende Erkenntnisse generierte, eröffnet sich ein enormes zukünftiges Potenzial für diese Forschungsrichtung. Ziel der kommenden Arbeiten ist eine Erarbeitung einer umfassenden Guideline, die die Auswirkungen von Explosionsbelastungen auf Stahlbauten beschreibt. Dabei steht beispielsweise die Entwicklung innovativer Schutzsysteme für kritische Infrastrukturen im Vordergrund, um diese gezielt vor Blastbelastungen zu schützen – beispielsweise durch den Einsatz energieabsorbierender Komponenten. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Verfeinerung bestehender Modelle sowie der Untersuchung größerer Schraubverbindungen, um deren Verhalten unter extremen Belastungen noch präziser zu verstehen. Zur Validierung der Modelle sind zudem Freifeldversuche an maßstabsgetreuen Bauteilen oder sogar in Originalgröße geplant. Zudem wird angestrebt, internationale Kooperationen weiter auszubauen und zu vertiefen, um den Wissensaustausch zu fördern und von globalen Entwicklungen zu profitieren.

Dr. Annabell Reiner
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr, Hamburg
Hamburg

Prof. Dr. Jörg Felfe
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr, Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

forschungsbuero@hsu-hh.de

Künstliche Intelligenz – Akzeptanz und Nutzung im privaten und beruflichen Umfeld

In einer Pilotstudie wurden Wissen und Einstellungen zu künstlicher Intelligenz (kurz: KI) sowie die aktuelle und künftige Nutzung KI-basierter Aufgaben und Tools bei Studierenden und Führungskräften untersucht. Die Studie wurde von der Professur für Arbeits-, Organisations- und Wirtschaftspsychologie der Helmut Schmidt Universität Hamburg in Kooperation mit dem Streitkräfteamt der Bundeswehr durchgeführt.

Künstliche Intelligenz spielt heute in vielen beruflichen Bereichen eine zentrale Rolle und führt zu neuen Möglichkeiten, aber auch zu gesellschaftlichen Debatten über Chancen, Risiken und ethischen Aspekten. Aufgaben, die früher viel Zeit erforderten, lassen sich nun mit deutlich geringerem Aufwand bewältigen. Auch im Alltag nutzen immer mehr Menschen KI, sei es durch Sprachassistenten wie Siri oder Alexa, personalisierte Empfehlungen auf Streaming-Plattformen oder smarte Navigationssysteme. KI erleichtert viele Prozesse und wird zunehmend in verschiedenste Arbeits- und Lebensbereiche integriert, weshalb das Thema auch in der Bundeswehr von hoher Relevanz ist.

Die Professur für Arbeits-, Organisations- und Wirtschaftspsychologie der HSU Hamburg führte im Frühjahr 2024 gemeinsam mit dem Streitkräfteamt der Bundeswehr eine Pilotstudie zur Akzeptanz und Nutzung von KI-Systemen durch. Dabei sollte zunächst ein Fragebogeninstrument entwickelt und mit dessen Hilfe situative wie auch individuelle Faktoren identifiziert werden, die den Einsatz von KI begünstigen oder hemmen. Zudem sollte eruiert werden, welche



Abb. 1: Häufigkeit der Nutzung KI-gestützter Tools



Abb. 2: Wahrgenommener Aufwand und Risiken von KI

Oliver Daum
Streitkräfteamt SKA
Hamburg

Dr. Sarah Eberhardt
Streitkräfteamt SKA
Hamburg

Alexander Deppner
Streitkräfteamt SKA
Hamburg

SKAAbtPersGdsFordGrpMilPsychForschg
Dez3MilPsychFg@bundeswehr.org

SKAAbtPersGdsFordGrpMilPsychForschg
Dez3MilPsychFg@bundeswehr.org

SKAAbtPersGdsFordGrpMilPsychForschg
Dez3MilPsychFg@bundeswehr.org

KI-Anwendungen bereits breite Akzeptanz und Nutzung finden und wo umgekehrt noch Vorbehalte, mangelndes Wissen oder ungünstige Rahmenbedingungen bestehen.

Um diese Fragen zu beantworten, wurden in einer Pilotstudie insgesamt N = 62 Personen online befragt, wovon n = 24 Studierende einer Universität der Bundeswehr und n = 38 Führungskräfte aus verschiedenen Branchen waren. Dabei wurden neben Fragen zur individuellen Nutzung KI-basierter Anwendungen, der eigenen Einstellung zu KI sowie wahrgenommenen Vor- und Nachteilen auch Rahmenbedingungen der Nutzung sowie Einstellungen anderer Personen aus dem beruflichen Umfeld erfragt. Zudem sollte auch die zukünftige Nutzungsabsicht generell und bezogen auf konkrete Anwendungsszenarien von den Teilnehmenden eingeschätzt werden.

Die Ergebnisse der Pilotstudie zeigen, dass KI beruflich und privat bereits weit verbreitet ist, wobei die genutzten Tools variieren (Abb. 1). Die Mehrheit der Befragten empfindet KI als interessant und nützlich, äußert jedoch auch Bedenken hinsichtlich ethischer Fragen, Sicherheitsrisiken und der Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt (Abb. 2). Die Studierenden weisen höhere Werte in der Nutzung, Kompetenz und Akzeptanz von KI auf als die befragten Führungskräfte, was vermutlich mit dem jüngeren Alter der Studierendenstichprobe zusam-

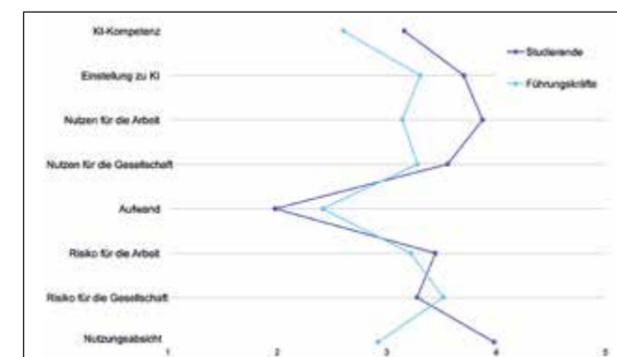


Abb. 3: Vergleiche zwischen den Stichproben

menhängt (Abb. 3). Insgesamt zeigt sich, dass eine hohe wahrgenommene Nützlichkeit die Bereitschaft zur KI-Nutzung unterstützt, während eine starke Risikowahrnehmung oder ein als hoch empfundener Aufwand diese eher hemmen. Auch die Rahmenbedingungen am Arbeitsplatz sowie Meinungen aus dem beruflichen Umfeld beeinflussen die aktuelle und zukünftige Nutzung erheblich (Abb. 4).

Um die Akzeptanz von KI im Arbeitskontext zu stärken, sollten benutzerfreundliche Technologien bereitgestellt und unterstützende Rahmenbedingungen geschaffen werden. Führungskräfte sollten gezielt geschult werden, um als Vorbilder zu agieren. Klare Richtlinien zur sicheren Nutzung und zum Datenschutz sind essenziell, um Bedenken zu minimieren. Künftige Forschung sollte die Ursachen für mangelnde Akzeptanz und Nutzung auf breiterer Datenbasis vertiefen und dabei verschiedene Arbeits- und Anwendungsbereiche differenziert betrachten. Die Befundlage soll in weiteren Studien erweitert und vertieft werden.

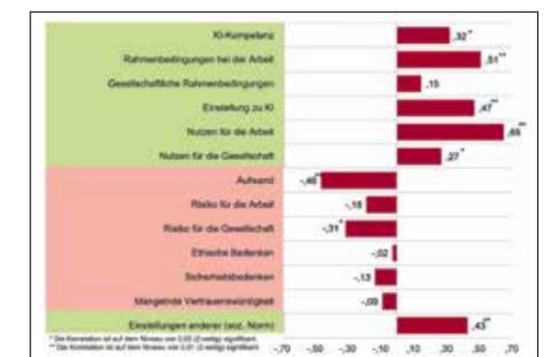
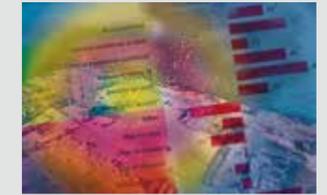


Abb. 4: Zusammenhänge mit Nutzungsabsicht von KI



8

Anhang





Bundesministerium
der Verteidigung

Bundesministerium
der Verteidigung
Postfach 13 28
53003 Bonn
Internet: www.bmvg.de

Abteilung Planung – Plg FIH AB III
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 75 30
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 89
E-Mail: BMVgPlgFIHABIII@bmvg.bund.de

Abteilung Planung – Plg FIH AB IV
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 66
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 75
E-Mail: BMVgPlgFIHABIV@bmvg.bund.de

Abteilung Cyber / Informationstechnik
– CIT I 2
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 2 61 22
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 3 35 61 21
E-Mail: BMVgCITI2@bmvg.bund.de

Abteilung Einsatzbereitschaft und Unter-
stützung Streitkräfte – EBU I 8
Tel.: +49 (0) 30 / 2004 - 2 48 38
Fax: +49 (0) 30 / 2004 - 18 03 68 13
E-Mail: BMVgEBUI8@bmvg.bund.de

Abteilung Einsatzbereitschaft und Unter-
stützung Streitkräfte – EBU III 1
Tel.: +49 (0) 30 / 20 04 - 2 48 54
Fax: +49 (0) 30 / 20 04 - 8 97 00
E-Mail: BMVgEBUIII1@bmvg.bund.de

Abteilung Personal – P I 5
Tel.: +49 (0) 30 / 18 24 - 2 31 57
Fax: +49 (0) 30 / 18 24 - 8 95 40
E-Mail: BMVgPI5@bmvg.bund.de

Abteilung Personal – P III 5
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 33 51
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 35 30
E-Mail: BMVgPIII5@bmvg.bund.de



Wehrtechnische Dienststelle
für Schutz- und Sondertechnik
(WTD 52)
Oberjettenberg
83458 Schneizlreuth
Tel.: +49 (0) 86 51 / 76 82 - 10 01
Fax: +49 (0) 86 51 / 16 00
E-Mail: WTD52posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wtd52



Wehrwissenschaftliches Institut
für Schutztechnologien – ABC-Schutz
(WIS)
Humboldtstraße 100
29633 Munster
Tel.: +49 (0) 51 92 / 136 - 201
Fax: +49 (0) 51 92 / 136 - 355
E-Mail: WISposteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wis



Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge
und Luftfahrtgerät der Bundeswehr
(WTD 61)
Flugplatz
85077 Manching
Tel.: +49 (0) 84 59 / 80 - 1
Fax: +49 (0) 84 59 / 80 - 20 22
E-Mail: WTD61posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd61



Wehrwissenschaftliches Institut
für Werk- und Betriebsstoffe
(WIWeB)
Institutsweg 1
85435 Erding
Tel.: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 0
Fax: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 39 02
E-Mail: WIWeBposteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wiweb



Wehrtechnische Dienststelle
für Schiffe und Marinewaffen,
Maritime Technologie und Forschung
(WTD 71)
Berliner Straße 115
24340 Eckernförde
Tel.: +49 (0) 43 51 / 467 - 0
Fax: +49 (0) 43 51 / 467 - 120
E-Mail: WTD71posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd71



Wehrtechnische Dienststelle
für Informationstechnologie und Elektronik
(WTD 81)
Bergstraße 18
91171 Greding
Tel.: +49 (0) 84 63 / 652 - 0
Fax: +49 (0) 84 63 / 652 - 607
E-Mail: WTD81posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd81



Wehrtechnische Dienststelle
für Waffen und Munition
(WTD 91)
Am Schießplatz
49716 Meppen
Tel.: +49 (0) 59 31 / 43 - 0
Fax: +49 (0) 59 31 / 43 - 20 91
E-Mail: WTD91posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd91



Zentrum für Geoinformationswesen
der Bundeswehr
Frauenberger Straße 250
53879 Euskirchen
Tel.: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 00
Fax: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 55
E-Mail: ZGeoBwChdSt@bundeswehr.org
Internet: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/cyber-und-informationsraum/kommando-und-organisation-cir/kommando-cyber-und-informationsraum/zentrum-fuer-geoinformationswesen-der-bundeswehr>



Zentrum für Militärgeschichte und
Sozialwissenschaften der Bundeswehr
Zeppelinstraße 127/128
14471 Potsdam
Tel.: +49 (0) 331 / 97 14 - 0
Fax: +49 (0) 331 / 97 14 - 507
E-Mail: ZMSBwZentralesManagement@bundeswehr.org
Internet: <https://zms.bundeswehr.de>



Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
Neuherbergstraße 11
80937 München
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 39 82
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 39 83
E-Mail: InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org
Internet: <https://www.instmikrobiobw.de/>



Institut für Pharmakologie und Toxikologie
der Bundeswehr
Neuherbergstraße 11
80937 München
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 29 26
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 23 33
E-Mail: InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org
Internet: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/unterstuetzungsbereich/sanitaetsdienst/kommando-gesundheitsversorgung-in-koblenz/sanitaetsakademie-der-bundeswehr/institut-fuer-pharmakologie-und-toxikologie-der-bw-in-muenchen>



Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
in Verbindung mit der Universität Ulm
Neuherbergstraße 11
80937 München
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 22 51
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 22 55
E-Mail: InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org
Internet: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/unterstuetzungsbereich/sanitaetsdienst/kommando-gesundheitsversorgung-in-koblenz/sanitaetsakademie-der-bundeswehr/institut-fuer-radiobiologie-der-bw-in-muenchen>



Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin
der Luftwaffe
Flughafenstraße 1
51147 Köln
Tel.: +49 (0) 22 03 / 9 08 - 16 10
Fax: +49 (0) 22 03 / 9 08 - 16 14
E-Mail: zentrulurmedlwprsse@bundeswehr.org
Internet: www.luftwaffe.de



Schiffahrtmedizinisches Institut
der Marine
Kopperpähler Allee 120
24119 Kronshagen
Tel.: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 01
Fax: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 78
E-Mail: SchiffMedInstM@bundeswehr.org
Internet: www.marine.de



Institut für Präventivmedizin
der Bundeswehr
Aktienstraße 87
56626 Andernach
Dienstorte:
Andernach und Koblenz
Tel.: +49 (0) 261 / 896 - 7 70 00
Fax: +49 (0) 261 / 896 - 7 70 99
E-Mail: InstPraevMedBw@bundeswehr.org
Internet: <https://www.instpraevmedbw.de/>



Deutsch-Französisches
Forschungsinstitut Saint-Louis
Postfach 27
79590 Binzen
F-68300 Saint-Louis
Tel.: +33 (0) 389 / 69 50 - 00
Fax: +33 (0) 389 / 69 50 - 02
E-Mail: isl@isl.eu
Internet: www.isl.eu



Psychotraumazentrum der Bundeswehr
Im Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Scharnhorststraße 13
10115 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 22 89
Fax: +49 (0) 30 / 28 41 - 10 43
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org
Internet: www.berlin.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Rübenacher Straße 170
56072 Koblenz
Tel.: +49 (0) 261 / 281 - 89
Fax: +49 (0) 261 / 281 - 26 69
E-Mail: BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org
Internet: www.koblenz.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Scharnhorststraße 13
10115 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 2 289
Fax: +49 (0) 30 / 28 41 - 10 43
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org
Internet: www.berlin.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
Lesserstraße 180
22049 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 / 69 47 - 0
Fax: +49 (0) 40 / 69 47 - 1 06 29
E-Mail: BwKrhsHamburg@bundeswehr.org
Internet: www.hamburg.bwkrankenhaus.de



Planungsamt der Bundeswehr
Oberspreestraße 61L
12439 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 67 94 - 19 13
Fax: +49 (0) 30 / 67 94 - 29 - 19 07
E-Mail: plgabwldi@bundeswehr.org
Internet: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/unterstuetzungsbereich/planung-zukunft/planungsamt-in-berlin>



Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
Postfach 70 08 22
22008 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 / 65 41 - 1
Fax: +49 (0) 40 / 65 41 - 28 69
E-Mail: forschung@hsu-hh.de
Internet: www.hsu-hh.de

Universität München

Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Tel.: +49 (0) 89 / 60 04 - 0
Fax: +49 (0) 89 / 60 04 - 35 60
E-Mail: info@unibw.de
Internet: www.unibw.de

 **Fraunhofer**
VVS
Fraunhofer-Leistungsbereich
Verteidigung, Vorbeugung und
Sicherheit VVS
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210
Fax: +49 (0) 721 / 60 91 - 413
E-Mail: info@iosb.fraunhofer.de
Internet: www.vvs.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
EMI
Fraunhofer-Institut für
Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI
Ernst-Zermelo-Straße 4
79104 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 27 14 - 101
Fax: +49 (0) 761 / 27 14 - 316
E-Mail: info@emi.fraunhofer.de
Internet: www.emi.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
FHR
Fraunhofer-Institut für
Hochfrequenzphysik und
Radartechnik FHR
Fraunhoferstraße 20
53343 Wachtberg
Tel.: +49 (0) 228 / 94 35 - 227
Fax: +49 (0) 228 / 94 35 - 627
E-Mail: info@fhr.fraunhofer.de
Internet: www.fhr.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
FKIE
Fraunhofer-Institut für
Kommunikation, Informations-
verarbeitung und Ergonomie
FKIE
Fraunhoferstraße 20
53343 Wachtberg
Tel.: +49 (0) 228 / 94 35 - 103
Fax: +49 (0) 228 / 94 35 - 685
E-Mail: kontakt@fkie.fraunhofer.de
Internet: www.fkie.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
IAF
Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik
IAF
Tullastraße 72
79108 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 51 59 - 458
Fax: +49 (0) 761 / 51 59 - 714 58
E-Mail: info@iaf.fraunhofer.de
Internet: www.iaf.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
ICT
Fraunhofer-Institut für
Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
76327 Pfinztal
phone +49 (0) 721 / 46 40 - 115
Fax: +49 (0) 721 / 46 40 - 111
E-Mail: info@ict.fraunhofer.de
Internet: www.ict.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
IOSB
Fraunhofer-Institut für
Optronik, Systemtechnik und
Bildauswertung IOSB
Standort Karlsruhe
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210
Fax: +49 (0) 721 / 60 91 - 413

Standort Ettlingen
Gutleuthausstraße 1
76275 Ettlingen
Tel.: +49 (0) 72 43 / 992 - 131
Fax: +49 (0) 72 43 / 992 - 299

E-Mail: info@iosb.fraunhofer.de
Internet: www.iosb.fraunhofer.de

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Programmdirektion Sicherheit und Verteidigung
(PD-S)
Linder Höhe
51147 Köln
Tel.: +49 (0) 2203 / 601 - 40 31
Fax: +49 (0) 2203 / 673 - 40 33
E-Mail: info-pds@dlr.de
Internet: www.dlr.de/sicherheit

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik DLR FT
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 26 00
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 28 64
E-Mail: info-pds@dlr.de
Internet: www.dlr.de/ft

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
DLR HR
Oberpfaffenhofen
82234 Weßling
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 23 05
Fax: +49 (0) 81 53 / 28 11 35
E-Mail: info-pds@dlr.de
Internet: www.dlr.de/hr

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Optische Sensorsysteme DLR OS
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin-Adlershof
Tel.: +49 (0) 30 / 6 70 55 - 0
Fax: +49 (0) 30 / 6 70 55 - 102
E-Mail: info-pds@dlr.de
Internet: www.dlr.de/os

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Responsive Space Cluster Competence Center
DLR RS
Eugen-Sänger-Str. 50
29328 Faßberg/Trauen
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 -714
Fax: +49 (0) 711 / 68 62 -788
E-Mail: info-pds@dlr.de
Internet: www.dlr.de/rs

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Technische Physik DLR TP
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 - 773
Fax: +49 (0) 711 / 68 62 - 788
E-Mail: info-pds@dlr.de
Internet: www.dlr.de/tp



HERAUSGEBER

Bundesministerium der Verteidigung
 Forschungs- und Innovationshub
 Fontainengraben 150
 53123 Bonn

INHALTLICHE BETREUUNG

Fraunhofer INT, Euskirchen

GESTALTUNG UND REALISATION

Konzeptbüro Schneider, Erfstadt

DRUCK

Warlich Druck Meckenheim GmbH, Meckenheim

STAND

Juli 2025



FOTOS

Seite

© Bundeswehr / Dirk Bannert; Evi Hufnagl; Tim Richter	01	Avilus GmbH, Ismaning
© Bundeswehr / Carl Schulze	08	Bundesministerium der Verteidigung, Bonn
© Bundeswehr / Nico Theska; Jana Neumann	09	Bundeswehrkrankenhaus Berlin
© Bundeswehr / Marco Dorow	10	Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
© Bundeswehr / Tom Kistenmacher; Tom Twardy	11	Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
		Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis
© iStock – Quardia	23	DLR, Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig
© iStock – Just_super / iStock – putilich	24	DLR, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Oberpfaffenhofen
© Fraunhofer EMI / Dr.-Ing. Christoph Grunwald	37	DLR, Institut für Optische Sensorsysteme, Berlin
© Bundeswehr / Martina Pump	43	DLR, Institut für Technische Physik, Stuttgart
© Bundeswehr / Michael Donaubaue	48	DLR, Responsive Space Cluster Competence Center, Faßberg
© Bundeswehr / Anika Bückendorf		Fraunhofer EMI, Freiburg i. Br.
© DLR / Dirk Frommholz	49	Fraunhofer FHR, Wachtberg
© Kaiser et al., 2023	100	Fraunhofer FKIE, Bonn
© Modifizierte Abbildung aus Kaiser et al., 2024		Fraunhofer FKIE, Wachtberg
© Kaiser et al., 2024		Fraunhofer IAF, Freiburg i. Br.
© Bundeswehr / Carsten Schulz	106	Fraunhofer ICT, Pfinztal
© Bundeswehr / Einsatzkameratrupp	116	Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Ettlingen
© Bundeswehr / PAO		Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
© Bundeswehr / Marc Tessensohn	117	Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
© Bundeswehr / Julia Dahlmann		Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr, München
© Bundeswehr / PAO		Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr, Andernach
© Bundeswehr / Nimpsch, 2025	122	Institut für Radiobiologie der Bundeswehr, München
© Bundeswehr / Modes, 1993	122 / 123	Planungsamt der Bundeswehr, Berlin
© Bundeswehr / Modes, 1999	123	Polaris Raumflugzeuge GmbH, Bremen
© Bundeswehr / Heinrichs, 2013		Psychotraumazentrum der Bundeswehr, Berlin
© https://ynside.extranet-bw.de/de/aktuelles/mediathek/audios-videos-galerien/woche-im-bild-kw-22-5437324	128	Schiffahrtmedizinisches Institut der Marine, Kronshagen
© Wikimedia Commons	130	Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
© www.bundeswehr.de		WIS, Munster
© www.lightpollutionmap.info	131	WIWeB, Erding
		WTD 52, Schneizdreuth
		WTD 61, Manching
		WTD 71, Kiel
		WTD 81, Greding
		WTD 91, Meppen
		Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Euskirchen
		Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Köln
		Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr, Potsdam