Bundesministerium
der Verteidigung

Jahresbericht Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation 2025



BUNDESWEHR

Bundesministerium
der Verteidigung

Jahresbericht
Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation 2025


uvex
6m @ +60°C
750
800
850
Projektilgeschwindigkeit (m/s)
Tri- und Tetranitro Centralite I

Ministerialdirigent Alexander Schott

Forschungs- und Innovationsdirektor
Bundesministerium der Verteidigung



Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte

Sehr geehrte Forschungsinteressierte!

Die sicherheitspolitischen Entwicklungen der vergangenen Jahre und die Dynamik technologischer Innovationen verändern die Anforderungen an die Bundeswehr grundlegend. Neue Fähigkeiten müssen schneller entwickelt, bewertet und verfügbar gemacht werden. Gleichzeitig entstehen viele sicherheits- und verteidigungsrelevante Technologien heute außerhalb klassischer wehrtechnischer Entwicklungsprozesse.

Innovation beginnt mit Forschung

Innovation ist mehr als die Entwicklung neuer Technologien. Sie beschreibt den Weg von der wissenschaftlichen Erkenntnis bis zur Einführung neuer Fähigkeiten in die Streitkräfte. Wehrwissenschaftliche Forschung bildet dafür das Fundament. Sie schafft die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen Innovation entsteht.

Gerade im Bereich der Dual-Use-Technologien gewinnen Zusammenarbeit und Vernetzung weiter an Bedeutung. Wissenschaft, Wirtschaft und Bundeswehr müssen ihre jeweiligen Stärken frühzeitig zusammenführen, um technologische Entwicklungen schneller zu erkennen, ihr Potenzial zu bewerten und für die Bundeswehr nutzbar zu machen. Dazu gehören Hochschulen und Forschungseinrichtungen ebenso wie etablierte Unternehmen, Start-ups und neue Akteure der Innovationsfinanzierung.

Innovation lebt vom Zusammenwirken

Innovation entsteht dort, wo wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklung, industrielle Umsetzung und militärische Anwendung zusammenwirken. Entscheidend ist dabei die frühe Einbindung der späteren Nutzer. Nur wenn Forschung, Entwicklung und militärischer Bedarf von Beginn an miteinander verbunden werden, entstehen Innovationen mit nachhaltigem Fähigkeitsgewinn.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die Bundeswehr ihr Innovationsverständnis konsequent weiter. Mit der Aufstellung des Innovationszentrums der Bundeswehr wird die wehrwissenschaftliche Forschung gezielt ergänzt. Das Innovationszentrum stärkt den Wissens- und Technologietransfer, erleichtert die Zusammenarbeit mit neuen Innovationspartnern und schafft zusätzliche Möglichkeiten, technologische Entwicklungen frühzeitig zu identifizieren, zu erproben und in die Streitkräfte zu überführen.

Zugleich fördert es das Zusammenwirken der Forschungsdomänen der Wehrwissenschaft. Wehrtechnische, wehrmedizinische, militärpsychologische, sozialwissenschaftliche, militärgeschichtliche und geowissenschaftliche Forschung bringen unterschiedliche Perspektiven und Kompetenzen ein. Ihre engere Vernetzung eröffnet neue Lösungsansätze für komplexe Fragestellungen und stärkt die Innovationsfähigkeit der Bundeswehr.





Innovation verläuft dabei nicht linear. Erkenntnisse aus Experimentierung, Erprobung und Nutzung führen zu neuen Forschungsfragen. Forschung und Innovation bilden einen kontinuierlichen Prozess des Lernens und Verbesserns.

Ein Jahresbericht mit erweitertem Anspruch

Diese Weiterentwicklung findet ihren Ausdruck erstmals auch im Titel des vorliegenden Berichts. Aus dem bisherigen Jahresbericht der wehrwissenschaftlichen Forschung wird der Jahresbericht „Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation“.

Der neue Titel verdeutlicht ein erweitertes Verständnis von Innovation. Forschung bleibt ihr wissenschaftliches Fundament. Innovation entsteht jedoch erst durch das Zusammenwirken aller Akteure, die wissenschaftliche Erkenntnisse aufnehmen, weiterentwickeln und in neue Fähigkeiten für die Bundeswehr überführen.

Die Expertenkommission Forschung und Innovation unterstreicht in ihrem Jahresgutachten 2026 die Bedeutung einer strategisch gestärkten sicherheitsrelevanten Forschung und leistungsfähiger Vernetzungsstrukturen.

Auch die Hightech-Agenda Deutschland hebt die Sicherheits- und Verteidigungsforschung als strategisches Forschungsfeld hervor. Beide Entwicklungen bestätigen den eingeschlagenen Weg.

Der vorliegende Jahresbericht dokumentiert exemplarisch die Leistungsfähigkeit der wehrwissenschaftlichen Forschung und gibt zugleich Einblick in ihre konsequente Weiterentwicklung. Die Beiträge zeigen, wie wissenschaftliche Exzellenz, interdisziplinäre Zusammenarbeit und ein modernes Innovationsverständnis gemeinsam dazu beitragen, die technologische Handlungsfähigkeit der Bundeswehr nachhaltig zu stärken.

Wehrwissenschaftliche Forschung schafft die wissenschaftlichen Grundlagen für die Fähigkeiten von morgen. Ihr Wert bemisst sich nicht allein an neuen Erkenntnissen, sondern daran, wie wirksam diese Erkenntnisse ihren Weg in Innovationen und schließlich in die Bundeswehr finden. Daran arbeiten wir gemeinsam mit unseren Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und den Streitkräften.

Ich danke allen Autorinnen und Autoren für ihre Beiträge zu diesem Jahresbericht. Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, wünsche ich eine anregende Lektüre.

Mit freundlichen Grüßen,

Alexander Schott





Vorwort **4** **Wehrwissenschaftliche Forschung und Innovation für deutsche Streitkräfte**

Teil 1 **11** **Innovationsvorhaben und Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung der Bundeswehr**
12 Prozessmodellierung für militärische und administrative Abläufe
14 Prognosefähigkeit trifft Private Cloud der Bundeswehr
16 Multi-Domain Operations Command & Control (MDO C2) - Basis für dimensionsübergreifende Operationsführung
18 KI-gestütze qualitative Datenanalyse
20 Computertomographie zur Abnahmeprüfung additiv gefertigter Raumfahrtprodukte: Möglichkeiten und Grenzen
22 Weltraumsicherheit – Unsere Handlungsfähigkeit im Orbit durch dynamische Operationen und Betankung
24 KI-gestützte Videoauswerteanlage KIOBS für den Objektschutz und die Absicherung von Schutzbereichen der Bundeswehr

Teil 2 **26** **Wehrtechnische Forschung und Technologie**
28 Alternative Stabilisatoren für Treibladungspulver
30 Alterungseffekte auf die Schockempfindlichkeit von Sprengstoffformulierung
32 ERNST im Orbit – erste Erfolge des ersten Kleinsatelliten für die Bundeswehr
34 Anormale EM-Ausbreitung und ihr Einfluss auf Radar-System-Performanz
36 Ergonomische Gestaltung einer standardisierten Bodenkontrollstation für Loitering Munition
38 Visuelle GNSS-lose Navigation
40 Integrierte Breitband-Frontend-Lösungen für multifunktionale Antennensysteme
42 Simulation des Abbrands von multimateriellen und komplex geformten Treibladungspulvern
44 Komponentenbasierte Objekterkennung am Beispiel militärischer Fahrzeuge





46 Visual Action – Bestimmung von Pilotenkompensation durch Blickerfassung
48 Simulation, Fertigung und experimentelle Validierung eines Multilayer-Radarabsorbers
50 Der Weg zur automatisierten Luft-zu-Luft Betankung im Projekt FARAO
52 OTTER-Mission - Optische Verkehrsüberwachung für den Responsive Space
54 KI-basierte Tarnbewertung mit ABACUS
56 Auswirkungen der geometrischen Dimensionierung auf die instationäre Aerodynamik von stark konturierten Luftfahrzeuglufteinlässen
58 Messung des akustischen Zielmaßes von Unterwasserobjekten an skalierten Modellen
60 Softwareschwachstellenanalyse
62 Laserwaffen im Kontext aktueller Bedrohungen aus der Luft

Teil 3 **64** **Wehrmedizinische Forschung und Militärpsychologische Forschung**
66 Interne Dosimetrie: Messung, Modellierung und Bewertung
68 Nachweis und Isolierung von Francisella tularensis mittels spezifischer Bindeproteine
70 Neuartiges humanes Neuronenmodell zur Entwicklung von Antidoten gegen Nervenkampfstoffe
72 Schwere Lungenverletzungen nach Thoraxtrauma sicher identifizieren – Photon-Counting-CT stärkt die Bildgebung in der Einsatz- und Notfallmedizin
74 Die Immunantwort als Prognose- und Therapiefenster: Cross-Species- Biomarkersignaturen nach schwerem Trauma
76 Erhalt der Dienstfähigkeit durch moderne Dermatologie: Eine Versorgungsforschungsstudie zur Schuppenflechte
78 Resilienz in der Grund- und Basisausbildung als Modell für die Landes- und Bundesverteidigung
80 Postshooting-Parallelen bei problematischem Ärger von Militär und Polizei: Wie sich unterschiedliche Einsätze auf die Psyche von Einsatzkräften niederschlagen
82 Auswirkungen rotierender und fester Arbeitszeiten im Wachbetrieb an Bord





Teil 4

84 **Sozialwissenschaftliche Forschung und Militärgeschichtliche Forschung**
86 Deutsches Militär im kolonialen Einsatz 1880–1918. Ein Kontinuum der Gewalt
88 Was kann und was leistet Militärseelsorge? Seelsorge und Religion in den deutschen Streitkräften

Teil 5

90 **Geowissenschaftliche Forschung**
92 Wenn Biologie auf Cyber trifft

Teil 6

94 **Forschung mit Bundeswehrbezug an den Universitäten der Bundeswehr**
96 Wargaming als Experiment
98 Hybride Verteidigung: Robuste KI als Innovationstreiber
100 Additiv gefertigter Stahlbeton für den baulichen Schutz bei extremen Belastungen
102 Verträglichkeit von Elastomeren mit Pyrolyseölen

Teil 7

104 **Anhang**
106 Adressen und Kontakte
112 Impressum





1

Innovationsvorhaben und Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung der Bundeswehr

Innovationsfähigkeit und diese schnell in der Truppe verfügbar zu machen, ist einer der Erfolgsgaranten für die Überlegenheit unserer Streitkräfte und deren Abschreckungsfähigkeit. Bei der Bw greifen hierzu das Innovationsmanagement und die Methoden der Zukunfts- und Weiterentwicklung ineinander. Die Innovationen und Forschungsprojekte des ersten Kapitels sind sehr vielfältig und spiegeln Aktivitäten aus verschiedenen Methoden und in unterschiedlichen Projektphasen wider. Gemeinsam ist ihnen, dass sie ihren Weg von der ersten Idee über eine mehrstufige Erprobung mit Weiterentwicklung in die Anwendung und Nutzung in der Truppe zielgerichtet gehen.

Der erste Forschungsbeitrag zeigt wie komplexe Arbeitsabläufe mittels klar strukturierter Modelle eindeutig Verantwortung und Ressourcen zuordnen. Erfolgreich bereits im Joint Support and Enabling Command und im Operativen Führungskommando der Bundeswehr umgesetzt, stehen die Ergebnisse für gelebte Veränderungskultur. Im nächsten Innovationsbeitrag prognostiziert ein IT-Service mit Nutzungsdaten, maschinellem Lernen und Cloud-Infrastruktur die materielle Einsatzbereitschaft von Waffensystemen. Seit 2025 im Interimsbetrieb, wird die Anwendung weiterentwickelt, um als zentraler, datengetriebener Dienst für alle Nutzer bereitzustehen.

Die Studie „Multi Domain Operations Command & Control“ zielt auf dimensionsübergreifende Koordination und beschleunigte Entscheidungen ab, um die Gefechtsfeldüberlebensfähigkeit zu steigern. Die übergreifende Operationsführung untersucht sieben verschiedene Use Cases und fokussiert Verteidigung als gesamtstaatliche Aufgabe. Im folgenden CD&E-Projekt wird berichtet, wie generative KI die qualitative Datenanalyse verändern kann, um informierte militärische Entscheidungen zu ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen auch, wie solche Dienste auf kontrollierter Hardware betrieben werden, um den Verteidigungsanforderungen zu entsprechen.

Für eine ganz andere Dimension entwickelt DeltaOrbit GmbH hochagile Satellitensysteme, die durch kryogene Antriebstechnik hohen Schub mit hoher Effizienz verbinden. Die dadurch ermöglichte Multi-Orbit-Agilität stellt eine völlig neue Fähigkeit dar und erweitert den Einsatzbereich für Weltraumoperationen maßgeblich. Anschließend zeigt DeltaVision GmbH, ebenfalls aus der DIANA-Kohorte 2025, die Entwicklung einer Tankinfrastruktur für Weltraumoperationen, deren Orbitübergangsdemo für 2026 vorgesehen ist. Das prototypische, hochmobile, tankbare Fahrzeug bedeutet einen entscheidenden Beitrag zur europäischen Souveränität im konkurrierenden Orbit. Abschließend wird eine KI-gestützte Videoauswerteanlage präsentiert, die Maschinenlernen aus der Forschung in die Einsatzreife bringt und den Nutzer von Routineaufgaben entlastet sowie gleichzeitig mit erweiterten Qualitäten aufwartet.

Die hier präsentierten Innovationen unterstreichen: Innovation ist ein integraler Bestandteil der strategischen Weiterentwicklung der Bundeswehr, um den sich wandelnden Herausforderungen des 21. Jahrhunderts erfolgreich zu begegnen und die technologische Souveränität unserer Streitkräfte zu sichern.

Major Steve Wilhelm
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (3) Systemanalysen
Taufkirchen

PlgABwI23SysAnalysen@bundeswehr.org

Prozessmodellierung für militärische und administrative Abläufe

Komplexe Arbeitsabläufe erfordern strukturierte Modellierungen mit klarer Verantwortungszuordnung und Ressourcenidentifizierung. Hierfür setzt das PlgABw Verfahren zur Prozesserhebung und -optimierung ein. Ergebnisse werden digital dokumentiert, sodass Architektur- und Softwareentwicklung möglich ist. Ziel: effektive Organisationen mit reibungslosen internen Abläufen und externer Kommunikation.

Die zunehmende Komplexität von Arbeitsabläufen in allen Dienststellen der Bundeswehr erfordert eine strukturierte, transparente und nachvollziehbare Gestaltung von Prozessen – unabhängig davon, ob es sich um operative, administrative oder führungsunterstützende Tätigkeiten handelt. Ohne klare Zuordnung von Verantwortlichkeiten, Ressourcen und Schnittstellen entstehen oft redundante oder ineffiziente Abläufe, die in Krisen- oder Hochlastsituationen zu Verzögerungen oder Fehlern führen können. Das Referat I 2 (3) Systemanalysen des Planungsamtes der Bundeswehr (PlgABw) bietet hierfür ein praxiserprobtes Instrumentarium zur Prozessmodellierung: die Beste-Kenntnis-Methode (BKM).

Die BKM wurde 1997 von Dr. Markus Gappmaier entwickelt und dient der ganzheitlichen Modellierung, Optimierung und Erneuerung von Geschäftsprozessen durch visuelle, kollaborative Arbeit mit standardisierten Karten (Abb. 1). Sie wird eingesetzt, um verteilt verfügbare Expertise zu bündeln, Prozesse systemisch zu analysieren und Lösungen gemeinsam mit allen Stakeholdern zu entwickeln bzw. zu optimieren. Innerhalb der Bundeswehr wird die BKM durch das PlgABw als strukturiertes Verfahren genutzt, um in enger Zusammenarbeit mit Subject Matter Experts komplexe Prozesse in übersichtliche Modelle zu überführen. Dabei können sowohl Ist-Zustände (Abb. 2) als auch zukünftige Soll-Prozesse abgebildet werden, mit dem Ziel, funktionale Zusammenhänge sichtbar zu machen, Zuständigkeiten eindeutig zu definieren und Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

Ein herausragendes Beispiel ist die Anwendung der BKM im NATO Joint Support and Enabling Command (JSEC). In mehreren Workshops mit internationalen Teilnehmern wurden die Hauptprozesse „How JSEC operates“ modelliert, dokumentiert und optimiert. Die Ergebnisse flossen direkt in die JSEC Enablement Coordination Directive ein und werden seitdem im Rahmen von Übungen evaluiert.

Ziel der Methode ist, Organisationen prozessorientiert zu gestalten – agiler, risikobewusster und reaktionsfähiger. Denn nur wenn Abläufe klar definiert, nachvollziehbar und kontinuierlich optimierbar sind, kann die Bundeswehr in allen Lagen effizient und zuverlässig handeln. Die Methode ist skalierbar und kann in allen Bereichen eingesetzt werden – von den internen Betriebsabläufen einer Wehrtechnischen Dienststelle bis zu den übergreifenden operativen Prozessen eines Führungskommandos. Sie ist ein flexibles Instrument, das sich an die jeweilige Organisation und ihre Herausforderungen anpasst. Die weiterführende Dokumentation erfolgt in Business Process Model and Notation 2.0 (BPMN 2.0) – einem international standardisierten Format, das nicht nur für die interne Prozesskommunikation geeignet ist, sondern auch den direkten Einstieg in Architektur- und Softwareentwicklung ermöglicht, um die Prozesse für alle Ebenen – von der Führung bis zur Ausführung – nutzbar zu machen (Abb. 3).

Die BKM und andere methodische Werkzeuge, die das PlgABw nutzt, werden nicht nur als „Modellierungswerkzeuge“, sondern als „Veränderungsprozess“ verstanden: Durch die gemeinsame Erhebung und Diskussion der Prozesse und Probleme entsteht ein gemeinsames Verständnis, das über die reine Dokumentation hinausgeht. Es schafft Transparenz, fördert den Austausch zwischen/in Dienststellen und trägt zur Kultur der kontinuierlichen Verbesserung bei. Die BKM ist somit mehr als eine Methode – sie ist ein Werkzeug zur Transformation von Organisationen. Sie schafft nicht nur Struktur, sondern auch Verständnis, Verantwortung und Veränderungsbereitschaft. Und genau das ist nötig, um die Bundeswehr resilient für die Zukunft zu machen – in Frieden, Krise und Krieg.

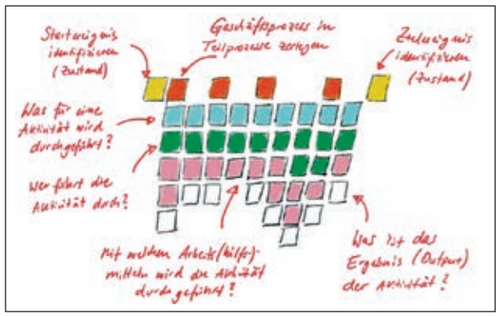


Abb. 1: Visualisierung der Beste-Kenntnis-Methode – strukturierte Erfassung von Prozessen mittels standardisierter Karten



Abb. 2: Beispielhafter Geschäftsprozess, gelegt mit der Beste-Kenntnis-Methode zur transparenten Darstellung von Teilprozessen, Aktivitäten, Verantwortlichkeiten und Outputs im Prozessablauf

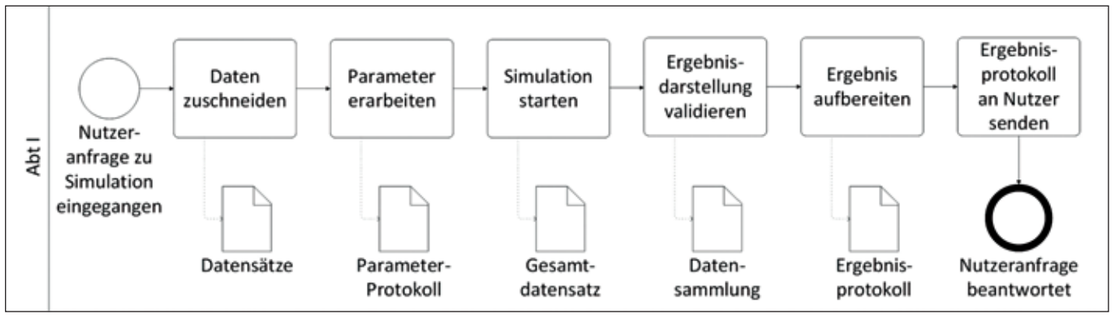


Abb. 3: Beispielhafter Geschäftsprozess als BPMN-2.0-Modell, überführt aus einer zuvor mit der Beste-Kenntnis-Methode erarbeiteten strukturierten Prozessdarstellung

Autorenteam
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (4) Datenanalysen
Taufkirchen

PlgABwI24DatAnalysen@bundeswehr.org

Prognosefähigkeit trifft Private Cloud der Bundeswehr

Die „Prognosefähigkeit für Großgeräte der Bundeswehr“ ist ein IT-Service zur simulationsgestützten Prognose der materiellen Einsatzbereitschaft von Waffensystemen. Mithilfe von Nutzungsdaten, maschinellem Lernen und Cloud-Infrastruktur ermöglicht er neben Verfügbarkeitsprognosen auch „Was-wäre-wenn“-Analysen als Entscheidungsunterstützung zur Optimierung der materiellen Einsatzbereitschaft. Seit 2025 im Interimsbetrieb auf der Private Cloud Bw, wird die „Prognosefähigkeit“ von einem bereichsübergreifenden Team PlgABw / BWI so weiterentwickelt, dass sie ab Oktober 2026 als zentraler, datengetriebener Dienst einem breiten Nutzerkreis zu Verfügung stehen wird.

Die Kaltstartfähigkeit ist eine zentrale Anforderung an die Bundeswehr und erfordert eine hohe materielle Einsatzbereitschaft. Seit Jahren liegt die tatsächliche Verfügbarkeit jedoch hinter den Erwartungen zurück – ein Zustand, der die Notwendigkeit datenbasierter Prognosen für Nutzung, Instandhaltung und Logistik verdeutlicht. Deshalb beauftragte das BMVg 2018 das Planungsamt der Bundeswehr mit der Entwicklung einer solchen Fähigkeit. Drei Studien mit industriellen Partnern untersuchten die Machbarkeit von Simulationsmodellen für repräsentative Systeme. Ergebnis: Es ist möglich, waffensystemspezifische Prognosen in separaten Simulationen abzubilden – die „Blaupause“ für Folgeprojekte war geschaffen.

Darauf aufbauend entstand das Projekt „Prognosefähigkeit für Großgeräte der Bw (PrognFä)“, das Simulationsmodelle für ausgewählte Großgeräte in einem gemeinsamen Softwaredemonstrator vereint. Dazu quantifiziert die Simulation den Einfluss von Nutzungsprofilen auf das Ausfallverhalten bis auf Hauptbaugruppenebene und simuliert zukünftige Instandhaltungsbedarfe über mehrere Jahre. Durch statistische Methoden und maschinelles Lernen werden Nutzungsmuster analysiert, Abnutzungsparameter berechnet und in die Simulation übertragen (Abb. 1). Durch die zusätzliche Möglichkeit, Eingangsparameter (geforderte Betriebsstunden, veränderte Wartungsintervalle, vorhandene Instandhaltungskapazitäten) zu variieren, lassen sich zudem „Was- wäre-wenn“-Szenarien rechnerisch testen.

Ein herausragendes Beispiel ist der Kampfhubschrauber TIGER: Trotz Einsatzbewährung litt er unter geringer Verfügbarkeit. Die PrognFä half, Ursachen zu identifizieren – insbesondere Wartungsplan und Instandhaltungskapazität erwiesen sich als limitierende Faktoren. Durch Simulation verschiedener Änderungsszenarien konnte das wirksamste Maßnahmenpaket ausgewählt werden. Wichtig: Änderungen wirken erst mit zeitlichem Verzug – daher ist die Vorab-Simulation entscheidend, um fundierte, kosteneffiziente Entscheidungen zu treffen. Die Ergebnisse flossen direkt in Zielvereinbarungen zwischen Bundeswehr und Industrie ein.

Aufsetzend auf diesen Erfolg wurden weitere Großgeräteprojekte wie der GTK BOXER, SPz Puma, NH90 und A400M auf diesen Service aufmerksam und kamen hinzu.

Bis 2024 lief die PrognFä in einer geschlossenen IT-Umgebung am Standort Taufkirchen. Mit der „Cloud First“-Strategie der Bundeswehr ergab sich 2024 die Chance, die PrognFä als Cloud-basierten Service in das Clusterprogramm „Analytics & Simulation“ für 2026 aufzunehmen. Ein gemeinsames Entwicklerteam aus Planungsamt und BWI wurde etabliert und arbeitet seitdem zielgerichtet auf ein „Go-Live“ des Cloudservice hin. Zunächst wurde eine Implementierung auf der Entwicklungsumgebung der pCloudBw realisiert, danach in die VS-NfD-akkreditierte Produktivumgebung überführt. Im Interimsbetrieb (bis Oktober 2026) steht der Service ausgewählten Nutzern zur Verfügung. Im Zielbetrieb wird die PrognFä dreistufig aufgebaut: Datenspeicherung auf der Big Data Plattform (Abb. 2), Analyse auf der Data Analytics Plattform (pCloudBw, Abb. 3) und bei Bedarf Simulation der Einsatzbereitschaft. Ein zentraler Vorteil: Daten aus unterschiedlichen Quellen und Formaten werden an einem Ort gespeichert – einzigartig im Vergleich zu bestehenden Systemen.

Die PrognFä ist heute ein experimenteller, aber bereits operational nutzbarer IT-Service zur simulationsgestützten Flottenanalyse. Er ergänzt die Expertise von Waffensystemfachleuten durch objektive, datenbasierte und reproduzierbare Prognosen. In Verbindung mit der Private-Cloud-Strategie der BWI wird der Service künftig vielen Projektleitungen ermöglichen, die Nutzung ihrer Systeme zielgerichtet zu steuern – und so die materielle Einsatzbereitschaft nachhaltig zu verbessern.



Abb. 1: Operations Research (OR) – eine Methode der Zukunfts- und Weiterentwicklung

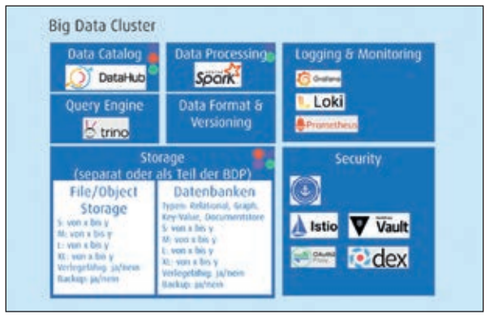


Abb. 2: Big Data Cluster – zentraler Speicherbereich für Daten (Quelle: BWI GmbH)

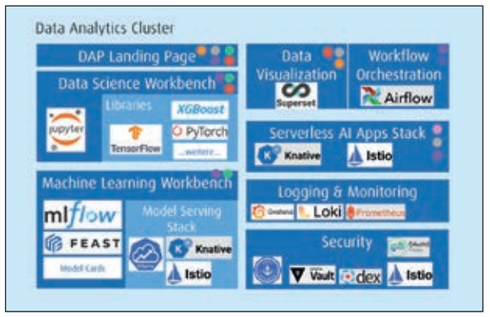


Abb. 3: State-of-the-Art Analyse-Werkbank (Quelle: BWI GmbH)

OTL Ortner
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (1) CD&E Exp
Taufkirchen

PlgABwI21CDEExp@bundeswehr.org

ORR´ in Krotki
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (3) Systemanalysen
Taufkirchen

PlgABwI23SysAnalysen@bundeswehr.org

Multi-Domain Operations Command & Control (MDO C2) - Basis für dimensionsübergreifende Operationsführung

Die Absicht von MDO C2 im Kontext datenzentrierter Gefechtsführung ist es, mittels abgestimmter, multinational anschlussfähiger Prozesse und Verfahren dimensions- und domänenübergreifende Koordination von Sensoren und Effektoren zu ermöglichen. Damit verbunden ist das Ziel der effektiven und beschleunigten Entscheidungsfindung um letztlich die Überlebensfähigkeit auf dem Gefechtsfeld zu steigern.

Die moderne Kriegführung erfordert eine nahtlose Koordination über alle militärischen Dimensionen – Land, Luft, See, Cyber und Weltraum – hinweg. MDO stellen dabei nicht nur eine taktische, sondern auch eine operative Notwendigkeit dar, um in einem zunehmend komplexen und vernetzten Gefechtsfeld überlegen agieren zu können.

MDO stehen in einer direkten Abhängigkeit zu Command and Control (C2), sowohl in Bezug auf die Verfahren als auch die Technologien. Die Verfügbarkeit der benötigten Informationen in einem resilienten Informations- und Kommunikationsverbund im richtigen Maße, zur richtigen Zeit, an den richtigen Orten bildet die Grundlage für ein einheitliches Lagebild.

Das Teilprojekt MDO C2 als operationeller Taktgeber innerhalb des Dach-CD&E-Projektes MDO greift mit seinen Leitfragen den Aspekt der dimensionsübergreifenden Operationsführung in verschiedenen Use Cases auf, unterstreicht die Forderung nach Plug-In Fähigkeit der technischen Beistellungen, respektive Tools, und stellt die Verteidigung



Abb. 1: MDO C2 im Kontext datenzentrierter Gefechtsführung



Abb. 2: Experimentierung Use Case „Zelle Taktische Integration Luftstreitkräfte (Zelle TIL)“ i.R.v. TIMBER EXPRESS 2025

im Szenar LV/BV als gesamtstaatliche Aufgabe heraus. Die Erhebung des Status Quo („Wie kämpfen wir heute?“) und die Experimentierung eines potentiellen SOLL-Zustands („Wie müssen wir zukünftig unter MDO kämpfen?“) bilden das Grundgerüst aller Aktivitäten innerhalb des Dach-CD&E-Projektes MDO.

Im Fokus der IST-Erhebung im Jahr 2025 standen Joint Fire C2-Prozesse. Dabei wurden neben Operationstempo und Qualität des Lagebilds sowohl bestehende technische Gegebenheiten als auch potenzielle Lösungen für identifizierte Fähigkeitsdefizite betrachtet.

Die im Rahmen von Workshops, Übungsteilnahmen (Timber Express / MFE ANDOJA) und eigens aufgesetzter Experimentierung im Rahmen des Durchgangs 20/25 am Gefechtsübungszentrum des Heeres erhobenen Daten dienen zudem als Vergleichsgrundlage für die in der Jahresscheibe 2026 vorgesehene SOLL-Erhebung.

Als ein wesentliches Element kristallisierte sich hierbei der Use Case „Zelle Taktische Integration Luftstreitkräfte (Zelle TIL)“ heraus, welche als Vermittler zwischen den Dimensionen zu sehen ist. Der stellvertretende Inspekteur der Luftwaffe, Generalleutnant Lutz Kohlhaus, äußerte sich zu dem auf experimenteller Basis entwickelten Prototypen der Zelle TIL wie folgt:

„Seine Mobilität gewährleistet den Anschluss der taktischen Führung der Luftstreitkräfte an die Gefechtsstände des Heeres, der Brigaden und Divisionsebene im beweglichen Einsatz. Er ermöglicht darüber hinaus die Einbindung des Weltraumkommandos, Cyber- und Informationsraums sowie der Marine im küstennahen Raum [...] durch die Nutzung, auch im NATO-Rahmen, standardisierter IT- Services, wie unter anderem der Software Sitaware, ist auch Interoperabilität im Bündnisrahmen gewährleistet.“

Mit diesem essentiellen Baustein als Basis sollen nun sukzessive die weiteren Schritte hin zu einer dimensionsübergreifenden multinationalen Vernetzung und Integration unter Einbindung ziviler Akteure auf dem Gefechtsfeld unternommen werden.

Im Jahr 2026 sollen dislozierte Prozesse aus verschiedenen Domänen synchronisiert und zu einem dimensionsübergreifenden Joint Fire C2-Prozess aggregiert werden. Das Ergebnis soll im Rahmen weiterer Übungen (Timber Express und Spartan Arrow) experimentiert und analysiert werden.

Insgesamt kann MDO C2 im Kontext datenzentrierter Gefechtsführung bereits jetzt erste Erfolge vorweisen. Zur iterativen Weiterentwicklung gilt es, die sich als zielführend erwiesenen technischen Lösungen zur Unterstützung der Prozesse weiter zu integrieren, insbesondere unter Einbindung ziviler Firmen und unter Berücksichtigung strenger Sicherheits- und Interoperabilitätsanforderungen. Neben Prozess und Technik müssen die Perspektiven Organisation und Mensch stärker berücksichtigt und im Zuge der verbleibenden Projektlaufzeit eng aufeinander abgestimmt werden, damit MDO C2 weiter operationalisiert und zukunftsfähig gestaltet werden kann.



Abb. 3: IST- Erhebung JFC C2-Prozess i.R.v. ANDOYA 2025



Abb. 4: Experimentierung mit Bodenradarsystem Ground Observer 12 mit Kräften LLBrig 1, AufklBtl 7 und AufklBtl 8

Oberstleutnant Dr. Andre Huthmann
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (6) IT-Ustg ZukE
Taufkirchen

PlgABwI26IT-UZukE@bundeswehr.org

Daniel Kallfass
AIRBUS Defense and Space
Immenstaad

defencedigital.sales@airbus.com

KI-gestütze qualitative Datenanalyse

Das Planungsamt der Bundeswehr untersucht in einem nationalen Forschungsprojekt, wie Generative KI (GenAI) die qualitative Datenanalyse im militärischen Kontext unterstützen kann. Ferner werden auch Aspekte der Informationssicherheit und des sicheren IT-Betriebs von KI-Systemen für die Verarbeitung eingestufter Daten betrachtet (Abb. 1).

Die systematische Analyse großer Mengen qualitativer Daten – wie Dokumente, Audiodateien oder visuelle Inhalte – ist für fundierte Entscheidungen in jeder Organisation von zentraler Bedeutung. Bisher erfolgte die Auswertung solcher Daten überwiegend manuell durch Experten. Fortschritte im Bereich der Generativen Künstlichen Intelligenz (GenAI) ermöglichen es nun, komplexe qualitative Datensätze automatisiert und kontextsensitiv zu analysieren – und damit bisher ungenutzte Informationsquellen KI-gestützt auszuwerten. Um das Potenzial dieser Technologien für die Bundeswehr nutzbar zu machen, wurde in Zusammenarbeit mit AIRBUS Defense and Space ein nationales Forschungsprojekt (Abb. 2) initiiert. Ziel ist es, zu ermitteln, wie GenAI in unterschiedlichen militärischen Szenarien effektiv eingesetzt werden kann, um qualitative Daten in wertvolle Erkenntnisse für Entscheidungsträger zu transformieren.

Die untersuchten Anwendungsfälle umfassen unter anderem:

- Strukturierung und Aggregation qualitativer Informationen
- Kontextsensitive semantische Suche über umfangreiche Dokumentenarchive

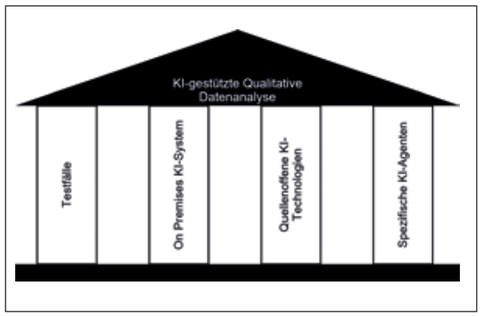


Abb. 1: Aspekte des Forschungsprojektes



Abb. 2: Projektlogo

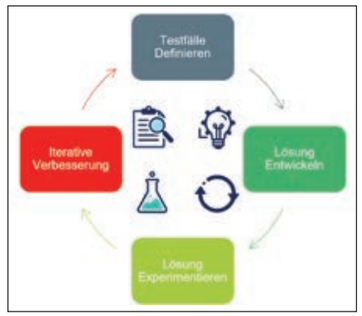


Abb. 3: Vorgehen im Projekt angelehnt an den GenAI Pilot Cycle von Gartner

Major Steve Wilhelm
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (3) Systemanalysen
Taufkirchen

PlgABwI23SysAnalysen@bundeswehr.org

Hauptmann Oliver Bornschlegl
Planungsamt der Bundeswehr
Referat I 2 (6) IT-Ustg ZukE
Taufkirchen

PlgABwI26IT-UZukE@bundeswehr.org

- Unterstützung des Enterprise Architecture Managements
- Optimierung und Analyse von Geschäftsprozessen

Das Vorgehen in diesem Projekt orientiert sich am „GenAI Pilot Cycle“ von Gartner (Abb. 3). Zunächst werden konkrete militärische Anwendungsfälle identifiziert und präzisiert. Anschließend werden agentenbasierte KI-Werkzeuge iterativ entwickelt und erprobt. Diese Agenten nutzen die Kernfähigkeiten multimodaler Large Language Models (LLMs), um unstrukturierte Daten in strategische und entscheidungsrelevante Informationen zu verwandeln.

Zur ganzheitlichen Analyse umfangreicher Dokumentensammlungen und zur Bewältigung komplexer Aufgabenstellungen wurde ein KI-Agent auf Basis des DeepAgent-Frameworks implementiert. Dieser überwindet die Kontextbegrenzung herkömmlicher Ansätze, indem er ein orchestriertes Zusammenspiel aus Subagenten (spezialisierte Teilagenten für Teilaufgaben), Skills (modellinterne Fähigkeiten), Tools (externe Schnittstellen zu Datenbanken oder APIs) sowie einem Memory (kontextübergreifendes Langzeitgedächtnis) zur Lösung komplexer Probleme einsetzt (Abb. 4).

Darüber hinaus wurde für die Analyse militärischer Prozesse im Kontext der Viewpoints C4 („Standard Processes“) des NAFv4-Frameworks ein mehrschichtiger, multimodaler KI-Agent entwickelt. Dieser nutzt die Fähigkeiten der Generativen KI (GenAI), visuelle, textuelle und strukturierte Daten kombiniert zu verarbeiten, um Business Process Model and Notation (BPMN)-konforme Prozesse zu generieren und Analysefragen zu beantworten.

Das Projekt demonstriert zudem, wie GenAI-Fähigkeiten mithilfe einer containerbasierten Architektur (Abb. 5) auf Basis von quellenoffenen Technologien isoliert betrieben werden können. Dies gewährleistet nicht nur die Einhaltung strenger sicherheitstechnischer Anforderungen, sondern macht die Lösung zudem unabhängig von Lizenzmodellen, skalierbar, flexibel und plattformunabhängig.

Unser Ziel ist es, den manuellen Aufwand bei der qualitativen Datenverarbeitung signifikant zu reduzieren und gleichzeitig die Genauigkeit, Konsistenz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu steigern. Auf diese Weise soll das transformative Potenzial der Generativen KI für eine agilere, datengetriebene Planung und Entscheidungsfindung in der Bundeswehr vollumfänglich genutzt werden.

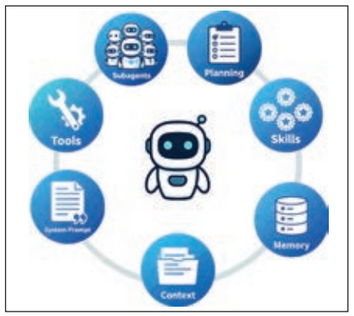


Abb. 4: Schematische Darstellung des DeepAgent



Abb. 5: Technologiestack mit OpenSource-Produkten

Dr.-Ing. Rahand Dalshad
DeltaOrbit GmbH
Garching

info@deltaorbit.com

Dr.-Ing. Christian Bauer
DeltaOrbit GmbH
Garching

info@deltaorbit.com

Sabrina Maier
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Computertomographie zur Abnahmeprüfung additiv gefertigter Raumfahrtprodukte: Möglichkeiten und Grenzen

DeltaOrbit – das einzige deutsche Start-Up in Phase 2 des NATO Diana Accelerators – entwickelt hochagile Satellitensysteme, die durch kryogene Antriebstechnik hohen Schub mit hoher Effizienz verbinden. Die dadurch ermöglichte Multi-Orbit-Agilität stellt eine völlig neue Fähigkeit dar und erweitert den Einsatzbereich für Weltraumoperationen enorm. Herausforderungen bestehen darin, die dafür notwendigen, hochkomplexen Komponentendesigns zu realisieren und zu prüfen. Dafür kommen Verfahren wie die additive Fertigung und zerstörungsfreie Mikro-Computertomographie (µCT) zum Einsatz.

In der aufstrebenden „New Space"-Ära ist Mobilität der Schlüssel zur strategischen Hoheit im All. Die DeltaOrbit GmbH entwickelt hierfür eine innovative Antriebslösung: einen Weltraumtransporter (Abb. 1) auf Basis kryogener Methalox-Treibstoffe, durch die sich hoher Schub mit hoher Effizienz kombinieren lassen.

Die Innovation liegt in der Lagerungsfähigkeit und Wiederzündbarkeit dieser Hochenergietreibstoffe im Orbit. Dies ermöglicht erstmals echte Multi-Orbit-Agilität: Satelliten können komplexe Manöver fliegen, z. B. die Bahnneigung (Inklination) oder die Bahnhöhe massiv verändern. Dadurch wird es möglich, in einem „Hub-and-Spoke"-Modell als zukünftiges Organisationsprinzip der Weltraumökonomie Nutzlasten kosteneffizient in einen Parkorbit zu bringen und von dort in Zielorbits zu verteilen (Abb. 2). Auch für Verteidigungszwecke ergeben sich daraus neue Strategien. Dank Multi-Orbit-Agilität können Satelliten in Parkorbits vorgehalten und im Ernstfall binnen Stunden in den Einsatzorbit verlegt werden.

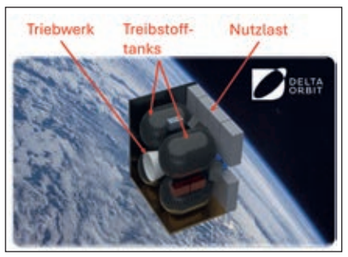


Abb. 1: Der DeltaOrbit-Weltraumtransporter (Space Tug-Konzeptvisualisierung) mit einem chemischen Antriebssystem



Abb. 2: Hub-and-Spoke-Konzept: Effizienter Transport von Nutzlast im Weltraum ausgehend von einem Parkorbit

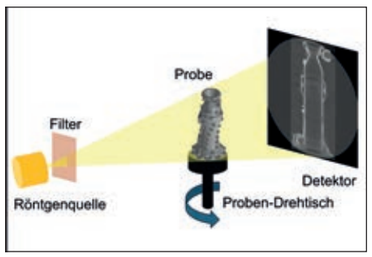


Abb. 3: Schematische Darstellung des µCT-Prüfaufbaus. Das Bauteil wird schrittweise rotiert und „durchstrahlt"

Perspektivisch ist diese Architektur auf lunare und interplanetare Missionen skalierbar, was den Weg für Anwendungen jenseits des Erdorbits ebnet. Damit schließt DeltaOrbit eine kritische Fähigkeitslücke im Einklang mit der Strategie der ESA und der EU-Kommission für eine souveräne, europäische Weltrauminfrastruktur. Auch in der neuen Weltraum-Sicherheitsstrategie der Bundesregierung wird „Multi-Orbit Agility" explizit gefordert.

Zur Realisierung dieser Multi-Orbit-Agilität ist es notwendig, hochkomplexe Komponentendesigns wie die spiralförmigen Kühlkanäle des Triebwerks sehr präzise fertigen zu können. Dafür setzt DeltaOrbit auf additive Fertigung. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass innere, unzugängliche, funktionale Strukturen strengsten Anforderungen unterliegen. Daher stellt die zerstörungsfreie Mikro-Computertomographie (µCT) eine wertvolle Option für die Abnahmeprüfung dar. Die hohe Auflösung aufgrund des kleinen Brennflecks kann Partikel, Risse oder Verstopfungen prozesssicher identifizieren, um die Testtauglichkeit der Hardware zu beurteilen. Der Prüfaufbau ist vereinfacht dargestellt in Abb. 3. Eine solche Prüfanlage wird beispielsweise vom WIWeB betrieben.

Im Rahmen einer Untersuchung wurde eine additiv gefertigte (Laser Powder Bed Fusion-Verfahren) Brennkammer aus einer Nickelbasislegierung betrachtet. Das verwendete Pulver wies eine standardisierte Partikelgrößenverteilung auf, die bei einer Schichtdicke von ca. 40µm verarbeitet wurde. Die Durchstrahlung erfolgte bei einer Röhrenspannung von 260kV und lieferte eine Voxelgröße von ca. 52µm.

Die anschließend mittels µCT aufgenommenen 2D-Röntgenbilder wurden erfolgreich zum 3D-Volumen rekonstruiert, sind jedoch aufgrund hoher Streustrahlung, vor allem in Bereichen dickwandiger Bauteilstrukturen, nur eingeschränkt als CAD-Modell zu verwerten. Fremdkörper ab 100µm sowie die 1mm breiten Kühlkanäle waren präzise darstellbar, was Verstopfungsanalysen ermöglicht (Abb.4). Grenzen zeigten sich bei der Maßhaltigkeit und Rauheitsquantifizierung. Letztere konnte aufgrund der vorliegenden Bauteildichte und -geometrie quantitativ nicht bestimmt werden. Zudem sind Bilddaten in Bereichen großer Wandstärken und Materialanhäufungen durch Streustrahlung beeinträchtigt, was deren quantitative Auswertung erschwert (Abb. 5).

Die µCT bietet also für diese Bauteile eine effiziente Option zur Detektion von Defekten und Materialrückständen höherer Dichte wie z. B. Kühlkanalverstopfungen und -verschmutzungen, welche mindestens die Größe der verwendeten Voxelgröße aufweisen. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Werkstoffzusammensetzung und Bauteilgeometrie sowie auftretender Streustrahlung (Abb. 5) kann sie dennoch als komplementäres Prüfverfahren vor Bauteiltests eingesetzt werden. Zur Überwindung physikalischer Durchstrahlungsgrenzen bei massiven Strukturen bieten Systeme mit höherer Energie, wie 450kV-Röhren oder Linearbeschleuniger, weiterführende Möglichkeiten zur Detektion von Makrodefekten. Dies geht jedoch mit Einbußen bei der räumlichen Auflösung einher.

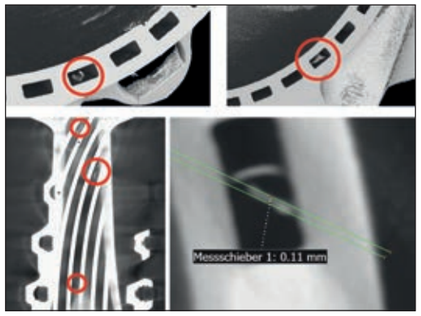


Abb. 4: Beispielhafte µCT -Aufnahmen mit Fremdkörpern in den Kühlkanälen

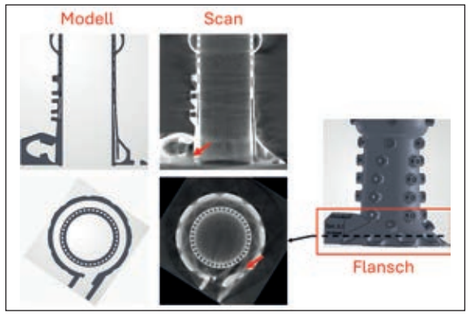


Abb. 5: Vergleich zwischen CAD-Modell (links) und µCT -Scan (rechts): Einfluss von Streustrahlung in Bereichen großer Wandstärken (Flanschbereich). Beispielhafte Bereiche mit geringer Bildqualität sind angedeutet

Autorenteam deltaVision GmbH
Abteilung Orbital Systems & Services
München

info@deltavision.space

Palladion Defense Accelerator
Universität der Bundeswehr München
München

palladion@unibw.de

Weltraumsicherheit – Unsere Handlungsfähigkeit im Orbit durch dynamische Operationen und Betankung

DeltaVision, Innovator im NATO-DIANA-Programm, entwickelt sukzessive Technologien für dynamische Weltraumoperationen und eine europäische Betankungsinfrastruktur. Die OPTRA-Demonstration 2027 bereitet dabei den Weg für DOVE – ein hochbewegliches, betankbares Raumfahrzeug für Erdbeobachtung, Weltraumlageerkennung, Inspektion und elektronische Kampfführung. Dieser Ansatz stärkt Resilienz und Souveränität.

Der Weltraum ist zu einer umkämpften, operativen Domäne geworden. Handlungsfähigkeit im Weltraum ist entscheidend für Abschreckung und Schutz kritischer orbitaler Infrastruktur. Um Handlungsfähigkeit herzustellen, müssen Deutschland und Europa auf Dynamic Space Operations (DSO) umstellen – ermöglicht durch manövrierfähige Plattformen, die ihre Position häufig ändern, schnell reagieren und dank Betankungsinfrastruktur länger betrieben werden können (Abb. 1).

deltaVision verfolgt hierzu einen praxisorientierten, phasenweisen Fahrplan für eine orbitale Betankungsinfrastruktur (Abb. 2). Betankungsservicevehikel, ausgestattet mit Betankungsmodulen und Versorgungsschnittstellen, liefern Treibstoff an kooperative Raumfahrzeuge. Parallel dazu werden kurzfristige Treibstofflager (“Drop Depots”) eingeführt, sodass sowohl Betankungsservicevehikel als auch bewegliche Verbraucher im Orbit betankt werden können – und damit wiederholte Nutzbarkeit und schnelle Turnarounds möglich werden. Auf dieser Basis lässt sich die Infrastruktur schrittweise auf zusätzliche Logistikfahrzeuge und langlebigere Depots skalieren, wodurch in mehreren Umlaufbahnen ein gesicherter Zugang zu Treibstoffen entsteht. Zusammen machen diese Schritte orbitale Betankung zu einer routinemäßigen Versorgungsaktivität, vergleichbar mit Nachschuboperationen zur See oder in der Luft.

Die OPTRA-Flugdemonstration (Orbital Propellant Transfer) (Abb. 3) bildet die Brücke zwischen Komponenten und realen Operationen. Unterstützt im Rahmen des DIANA Programms demonstriert OPTRA wiederholte, leckagefreie Transfers in Mikrogravitation unter Nutzung von deltaVision’s Fluidkupplung und Treibstoff-Management-Technologie. OPTRA verifiziert Dichtungen, Durchflusssteuerung und sicherheitskritische Funktionen, die für routinemäßige Betankung notwendig sind. Damit ist OPTRA der Schlüsselbaustein zur Risikoreduzierung – sowohl für kurzfristige Servicing-Missionen als auch für zukünftige Hochmanövermissionen.

Aufbauend auf diesem Fundament entwickelt deltaVision DOVE (Dynamic Operations Vehicle) – eine universelle, betankbare Plattform für Dual Use Missionen (Abb. 4 und 5). Mit einer Δv Fähigkeit von ~4 km/s, der Kompatibilität zu allen wichtigen europäischen Trägerraketen und Rideshare Umgebungen sowie kooperativen und nicht kooperativen RPOD Fähigkeiten (Rendezvous, Proximity Operations, and Docking) kann DOVE:

- schnell zwischen Bahnebenen und Höhen wechseln,
- Nutzlasten für Erdbeobachtung (EO, optisch oder Radar), SSA Unterstützung und Inspektion tragen,
- Schlepp und Servicing Aufgaben übernehmen,
- elektronische Kampfführung und weitere verteidigungsrelevante Anwendungen insbesondere in Nahbereichsoperationen ermöglichen.

Um anspruchsvolle Missionen nachhaltig zu unterstützen, integriert DOVE leistungsstarke Energieerzeugung, aktive Thermalkontrolle, sichere Kommunikationskanäle sowie Phased Array Antennen für hohe Datenraten und robuste C2 Fähigkeiten. Mehrere Nutzlastschnittstellen, eine Betankungsfähigkeit und eine vielseitige Versorgungsschnittstelle (mechanisch, fluidisch, Energie, Daten) ermöglichen modulare Erweiterungen und Interoperabilität.

DOVE kann ein breites Spektrum flexibler Missionen ausführen – von Friedenszeiten über hybride Konflikte bis hin zu erklärten militärischen Auseinandersetzungen (Abb. 6). Vielseitigkeit muss dabei von Anfang an im Design verankert sein, da DSO die Art des operativen Satellitenbetriebs grundlegend verändern wird.

Kurz gesagt:

- OPTRA beweist die „Leitungs- und Fluidtechnik“;
- der Infrastruktur Fahrplan schafft die operative Betankungslogistik;
- und DOVE macht Manöverfähigkeit zu einer wiederholbaren Fähigkeit.

Gemeinsam verleihen sie Europa Resilienz, Flexibilität und Souveränität im Weltraum – und stellen sicher, dass zukünftige Missionen durch Absicht und Design bestimmt werden, nicht durch die verbleibende Treibstoffmenge.



Abb. 1: Roadmap für die orbitale Betankungsinfrastruktur – von Fluidkontrolltechnologien zur DSO

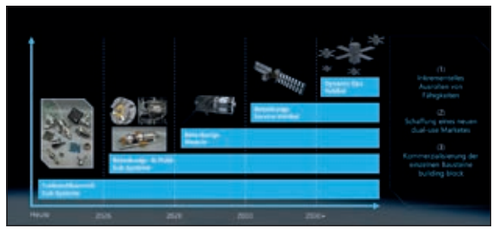


Abb. 2: Architekturkonzept von DOVE



Abb. 3: deltaVision – Sicht auf die grundlegende Ebene der Betankungsinfrastruktur und Endverbraucher

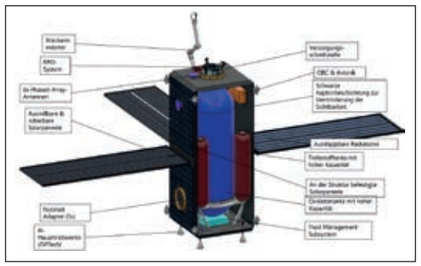


Abb. 4: Für den Flug 2026 vorgesehener OPTRA-Betankungsdemonstrator

Eigenschaft	Wert
Startmasse	1500 kg
Delta V	Bis zu 4 km/s (betankbar)
Nutzlasttypen	Erdbeobachtung, Betankungsmodul, militärische Nutzlasten, optische Nutzlasten, ELOKA, Kinetische Impaktoren, etc.
Nutzlastservices	2 kW, aktive Kühlung, hohe Datenrate
Orbitale Dienste	> 5 Jahre Lebensdauer, Erweiterbarkeit
Manövrierfähigkeit	**Treibstoffmasse**
Transit LEO zu GEO	1 x transfer ohne Betankung
Inklination	~ 15° (umkehrbar)/ ~ 30° (einfach)
Schneller RAAN-Wechsel in orbit Manövrierfähigkeit	Vergleichbar mit ΔV ermöglicht nicht-kooperative Operationen

Abb. 5: Leistungsparameter von DOVE



Abb. 6: DSO-Missionskategorien und Vielseitigkeit der Einsatzmöglichkeiten

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

info@iosb.fraunhofer.de

Jochen Ring
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

KI-gestützte Videoauswerteanlage KIOBS für den Objektschutz und die Absicherung von Schutzbereichen der Bundeswehr

Der Schutz von Objekten wird immer wichtiger und erfordert Personal, das kaum verfügbar ist. Forschungsergebnisse des Fraunhofer IOSB im Bereich der Deep Learning-Verfahren tragen hier zur Entlastung der Operateure von Routineaufgaben bei. Das Fraunhofer IOSB hat hierzu im Auftrag des BAAINBw unter Mitwirkung der WTD 91 zentrale Komponenten eines Objektschutzsystems zur Auswertung und Steuerung von Videosensorik erstellt.

Die Abteilung „Videoauswertesysteme" des Fraunhofer IOSB entwickelt Videoauswerteverfahren zur Detektion und Verfolgung von Personen und Fahrzeugen unter erschwerten Randbedingungen wie großen Entfernungen, eingeschränkter Sicht und widrigen Wetterverhältnissen. Dabei spielt insbesondere die Auswertung von Daten thermischer Infrarot-Sensorik eine wesentliche Rolle (Abb. 1). Ebenso gehören Verfahren zur Detektion von Personen- und Gruppenverhalten zum Forschungsbereich.

Auf Basis dieser Forschungsarbeiten wurde die Videoanalyseanlage KIOBS (KI-gestütztes Objektschutz-System) für den KI-gestützten Objektschutz und die Absicherung von Schutzbereichen der Bundeswehr erstellt (Abb. 2). Dieses unterstützt den Beobachter bei seiner Überwachungstätigkeit mit mehreren Hochleistungs-Sensorsystemen mit Kameras im visuell optischen- und thermischen Infrarotbereich.

Die KI-Verfahren (speziell: Deep Learning-Verfahren) analysieren dabei parallel z.B. acht Full-HD-Videoströme (visuell optisch (VIS) und thermisches IR) auf definierte sicherheitsrelevante Geschehen. Hierzu werden die Kameras von der Software aktiv über automatisierte, programmierte Kamerafahrten – entsprechend Patrouillengängen – gesteuert und softwaregestützt die Bilddaten auf sicherheitsrelevante Ereignisse hin analysiert, Bilddaten zur besseren Übersicht für den Beobachter aufbereitet und optimiert, sowie Videosequenzen zur späteren, erneuten oder weiteren Analyse in einer Datenbank abgespeichert (Abb. 3). Die zu detektierenden Geschehen werden über geografische Bereiche und relevante Aktivitäten, wie z.B. unerlaubtes Betreten oder Befahren oder Gruppenverhaltensmuster definiert (Abb. 4). Zur Erkennung von Aktivitäten kommen vom Fraunhofer IOSB entwickelte KI-Videoauswerteverfahren zum Einsatz. Diese analysieren die Videosignale in abgesetzt arbeitenden KI-Prozessoren und erzeugen die jeweiligen spezifischen Hinweise auf die Aktivitäten. Beim Auftreten einer solchen Aktivitätsdetektion werden die Geokoordinaten des Ereignisses aufgrund der Metadaten des Schwenk-, Neige- sowie Zoomsensors ermittelt und so eine geografische Verortung des Ereignisses und ein Einzeichnen in die Lagedarstellung ermöglicht – siehe Abbildung 5. Die aufgetretenen Benachrichtigungen werden in einer Liste erfasst, die der Operator abarbeitet, um systematisch alle Ereignisse zu bewerten. Dadurch ermöglicht die realisierte KIOBS-Videoanalyseanlage dem Bedienpersonal, mehrere Videosensoren automatisch parallel auszuwerten und relevante Ereignisse in Live-Videostreams zu erfassen. Dies reduziert den Personalbedarf und entlastet das Personal von mühsamen Routineaufgaben. Weiterhin werden zusätzliche Aspekte der Interoperabilität abgedeckt, um die Integration der Systeme und ihrer generierten Ergebnisse über STANAG-konforme Schnittstellen in die Informationsinfrastruktur der Bundeswehr zu ermöglichen.

Die fünf flexibel konfigurierbaren Serienanlagen werden gegenwärtig – nach in 2025 erfolgter Abnahme – an die Bundeswehr ausgeliefert. In Zukunft kann das Leistungsspektrum der Anlagen flexibel durch weitere Elemente gesteigert werden. Der Einsatz von Drohnen als Sensorträger ermöglicht es nach einer Alarmsituation, Geschehnisse auch hinter Verdeckungen und im luftgestützten Überblick zu klären. Alternativ können Drohnen auch als Fesseldrohnen permanent bei schwierigen Sichtbarkeitsverhältnissen oder im mobilen Einsatz die Anlagensensorik ergänzen. Mit den vorhandenen Verfahren zur Drohnendetektion können auch Bedrohungen durch anfliegende Drohnen detektiert und verfolgt werden. Weiterhin ist geplant, KIOBS als eine Kernkomponente im Projekt „Technischer Objekt- und Zugangsschutz (TOZ)" einzusetzen.



Abb. 1: Hochleistungssensorik RBA 5-15/Hensoldt NightOwl

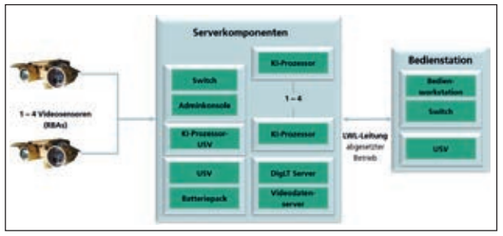


Abb. 2: Aufbau der Videoanalyseanlage KIOBS für 1-4 Hochleistungssensoren (IOSB-Anteil grau hinterlegt)



Abb. 3: KIOBS-Arbeitskonsole



Abb. 4: Videoboard: Live-Videoüberwachung der VIS- und IR-Videostreams mit Darstellung der speziellen Überwachungsbereiche



Abb. 5: Auswertungssoftware KIOBS mit Sensorsteuerung und Lagedarstellung



2

Wehrtechnische Forschung und Technologie

Das Jahr 2025 markiert einen weiteren wichtigen Schritt in der Entwicklung der wehrtechnischen Forschung und Technologie (F&T) der Bundeswehr. Das Forschungs- und Innovationssystem hat sich weiter gefestigt und ist nun besser auf die dynamische sicherheitspolitische Lage und die Bedürfnisse der Truppe ausgerichtet.

Institutionelle Weiterentwicklung

In der neuen Abteilung Innovation und Cyber des BMVg und der Konzentration der Referate für wehrtechnische Forschung und Innovations-management wird die Vernetzung zwischen Forschenden, Bedarfsträgern und Anwendern – den Soldatinnen und Soldaten – weiter gefördert. Dieser „Bedarf-zu-Ergebnis-Kreislauf“ verkürzt die Zeit bis zur Anwendungsreife neuer Technologien und überwindet das klassische „Tal des Todes“.

Kooperationslandschaft und internationale Arbeitsteilung

Die Zusammenarbeit mit nationalen Partnern wie Fraunhofer-Gesellschaft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) bildet weiterhin die Basis der Innovationskraft. Gleichzeitig wird die Beteiligung an EU- und NATO-Programmen verstärkt. Deutschland hat 2025 im Rahmen des Europäischen Verteidigungsfonds (EVF) erneut erhebliche Mittel für gemeinsame Projekte bereitgestellt, um Synergien zu nutzen und Ressourcen effizient einzusetzen.

Technologische Schwerpunkte

Im Jahr 2025 lag der Fokus auf folgenden Technologiegebieten:

- Technologien für die Luftverteidigung: Abwehr unbemannter Luftfahrtsysteme und Schutz vor Lenkflugkörpern.
- Autonome und vernetzte Plattformen: Unbemannte Luft- und Wasserfahrzeuge sowie robotikgestützte Logistiklösungen.
- Technologien für die Elektronische Kampfführung: Schutz und Ausbau eigener Fähigkeiten.
- Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen: Autonome Systeme, Entscheidungsunterstützung und Datenanalyse, insbesondere automatisierte Bildauswertung.
- Unbemannte Wirksysteme: Teaming und Schwärme.
- Quantentechnologien: Quantenkommunikation und Quantensensorsysteme für sichere Kommunikation und präzise Wahrnehmung, sowie resiliente Kommunikationsverbünde.
- Weltraum: Schutz der Weltraum-Infrastruktur.

Ausblick und strategische Ausrichtung

Die anhaltenden geopolitischen Spannungen sowie globale technologische Konkurrenz erfordern Resilienz und Flexibilität. Das BAAINBw, das Planungsamt der Bundeswehr und das BMVg koordinieren ein breites Portfolio von Forschungsprogrammen, um die Analyse- und Bewertungskapazitäten der Bundeswehr zu sichern. Durch die Förderung von Projekten mit schneller Skalierbarkeit wird die Fähigkeit gestärkt, Bedrohungen frühzeitig zu erkennen und darauf zu reagieren. Die Streitkräfte werden dabei eng einbezogen. Ziel ist es, die Innovationskraft der Bundeswehr nachhaltig zu sichern und auszubauen. Wir hoffen, dass der Bericht Ihnen einen Überblick über die erreichten Fortschritte und die laufenden technologischen Innovationen bietet. Das gesamte Netzwerk aus Ministerium, Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und internationalen Verbündeten bleibt entschlossen, die Innovationskraft der Bundeswehr nachhaltig zu sichern und weiter auszubauen.

Dr. Kyung-Tae Han
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Silke Braun
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Alexandre Dufay
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Alternative Stabilisatoren für Treibladungspulver

Klassische nitrocellulosebasierte Treibladungspulver (TLP) sind aufgrund der autokatalytischen Zersetzung von Nitrocellulose nicht langfristig lagerfähig. Um eine Langzeitlagerung zu ermöglichen, ist eine geringe Zugabe von Stabilisatoren notwendig, die die Zersetzungsprozesse von Nitrocellulose deutlich verlangsamen. Es werden organische Moleküle auf deren Eignung als TLP-Stabilisatoren untersucht.

Die traditionellen Stabilisatoren für Treibladungspulver, wie etwa Centralit-I und -II, Diphenylamin oder Akardit-II, finden bereits seit geraumer Zeit Anwendung. Allerdings bergen diese Stoffe oder deren Abbauprodukte gesundheitsgefährdende Risiken. Die Hauptursache ist die Bildung von N-Nitrosaminen in relativen Mengen während der Lagerung, vor allem bei Treibladungspulvern, die Centralit-I oder -II und Diphenylamin enthalten (Abb. 1). Eine Vielzahl von N-Nitrosaminen wurde als karzinogen klassifiziert, sodass von einer krebserzeugenden Wirkung auszugehen ist.

Akardit-II bildet um ein Vielfaches weniger an N-Nitrosaminen als die beiden vorher genannten Stabilisatoren, aber auf Grund des hohen Beschaffungspreises, eventueller zukünftiger REACH-Regularien bei der Akardit-II-Synthese und die ungünstige Beschaffungssituation (Single-Source-Problematik in Europa) sind Untersuchungen zu günstigeren und/oder besseren Stabilisatoren notwendig.

Das ISL befasst sich seit geraumer Zeit mit der Suche nach alternativen Stabilisatoren für zwei- und mehrbasige Treibladungspulver. Zu diesem Zweck wurden Derivate aus diversen organischen Klassen untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung als TLP-Stabilisatoren analysiert.

Alternative Stabilisatoren müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- keine Bildung von N-Nitrosaminen
- sehr effizient, um eine lange Lebensdauer des Treibladungspulvers zu gewährleisten
- chemische Verträglichkeit mit Weichmachern, Nitrocellulose und weiteren TLP-Bestandteilen
- REACH-konform

Die Suche nach potenziellen Stabilisatoren erfolgt durch die Herstellung eines zweibasigen Treibladungspulvers, dem ein Gewichtsprozent des jeweiligen Stabilisatorkandidaten beigemengt wird. Im Anschluss erfolgt eine Warmlagerung bei 90 °C über einen Zeitraum von 18 Tagen. Dieser Prozess findet im Rahmen eines Screening-Verfahrens statt, bei dem mehrere Proben simultan untersucht werden. Als primäres Ausschlusskriterium wird die Gewichtsbilanzierung herangezogen. Hierbei sollte der Gewichtsverlust nach Abschluss der 18-tägigen Warmlagerung bei 90 °C weniger als drei Prozent betragen.

Proben, die das Screening-Verfahren erfolgreich absolviert haben, werden einer weiteren detaillierten Untersuchung unterzogen, um den NATO-Standard AOP48 („Explosives - Nitrocellulose Based Propellants - Stability Test Procedures and Requirements Using Stabilizer Depletion“) zu erfüllen. In dieser detaillierten Analyse ist der Nachweis der Abbaukinetik sowie der Abbauprodukte des eingesetzten Stabilisators erforderlich. Zu diesem Zweck werden zehn Probegläschen mit TLP befüllt und einer achtzehntägigen Warmlagerung bei 90 °C unterzogen. In zweitägigem Abstand erfolgt die Entnahme einer Probe, die anschließend einer Gewichtsbilanzierung sowie einer visuellen Beobachtung unterzogen wird. Darüber hinaus werden HPLC (Hochleistungsflüssigkeitschromatographie)- und NMR (Kernspinresonanz)-Analysen der warmgelagerten Proben durchgeführt (Abb. 2 u. 3).

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurde eine Vielzahl alternativer Stabilisatoren für zwei- und mehrbasige Treibladungspulver identifiziert. Die Wirksamkeit dieser Substanzen ist geringer als die des derzeit am effektivsten wirksamen Stabilisators Akardit-II. Ihre Anwendung ist jedoch für kurzfristige oder mittelfristige Verwendungen, wie sie beispielsweise in Krisenzeiten erforderlich sind, möglich.

Die Arbeiten werden sowohl aus der Grundfinanzierung, durch amtsseitige Zusatzfinanzierung als auch durch Drittmittel der deutschen wehrtechnischen Industrie finanziert.

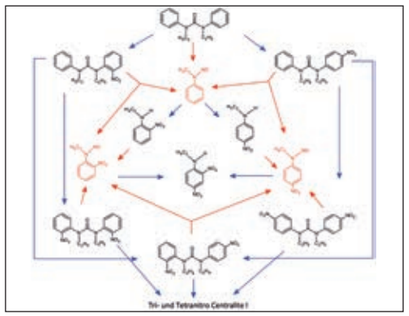


Abb. 1: Abbauschema von Centralit I und Bildung von Nitrierungsprodukten in Centralit I-Formulierungen. Rot markierte Strukturen: Karzinogene



Abb. 2: Warmlagerung (90 °C) eines Stabilisatorkanditaten (1 Gewichts-%) nach 0 bis 18 Tagen

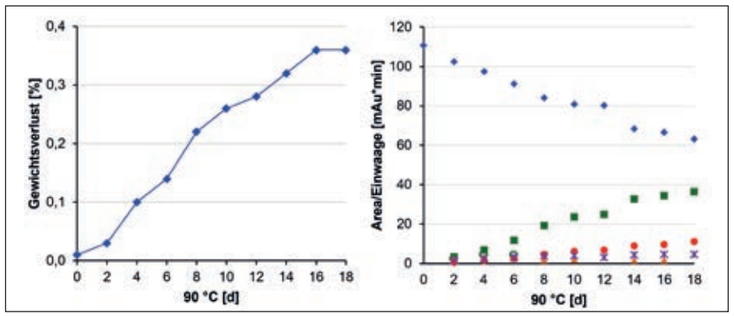


Abb. 3: Gewichtsbilanzierung und HPLC-Analytik. Abbaukinetik eines Stabilisators (blau) und Nachweis von Abbauprodukten

Dr. Stefan Nau
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr.-Ing. Moritz Heil
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Alterungseffekte auf die Schockempfindlichkeit von Sprengstoffformulierung

Die Identifizierung von Alterungsmechanismen energetischer Materialien ist zentraler Teil dieses Projekts. Eine Kombination aus thermischer Alterung und mechanischer Belastung wird auf einen Plastiksprengstoff angewandt, um die Auswirkungen auf die chemischen und mechanischen Eigenschaften zu untersuchen sowie Aussagen zur Lebensdauer sowie zur Schockempfindlichkeit zu treffen.

Das Projekt TVESIM (Thermal & Vibrational loading Effects on Structural Integrity of energetic Materials) ist eine deutsch-französische Kooperation zwischen ArianeGroup CRB in Vert-le-Petit, DGA-TT in Bourges, Fraunhofer ICT in Pfinztal, WTD91 in Meppen und ISL in Saint-Louis. Es entstand nach dem Erfolg des europäischen Projekts IMA (Insensitive Munitions for Ageing) mit dem gemeinsamen Ziel Frankreichs und Deutschlands, die Zusammenarbeit im Bereich der Alterung energetischer Materialien fortzusetzen. Das Hauptziel ist die Untersuchung des Einflusses einer Kombination aus thermischer Alterung und mechanischer Belastung, wie sie z.B. durch Vibrationen bei Rücklaufmunition auftreten kann, auf die chemischen und mechanischen Eigenschaften verschiedener energetischer Materialien. Ein Hauptaugenmerk liegt auf einer neuen Plastiksprengstoffmischung (PBX), die vom ICT hergestellt und dann 180 Tage lang bei +60 °C thermisch gealtert wird. Die anschließende mechanische Belastung wird an der WTD91 auf drei Proben unterschiedlich angewendet: Während sechs Stunden erfolgt die Belastung entsprechend bei Temperaturen von -20 °C, +20 °C bzw. +60 °C. Die Stoßempfindlichkeitsanalyse wird am ISL unter Anwendung des Projektilaufpralltests (PIT) durchgeführt. Dazu wird die Probe mit einer Pulverkanone von einem flachen Projektil beschossen. Die Projektilgeschwindigkeit (PV) und die Schockübergangszeit durch die Probe werden durch Röntgenradiographie bzw. über Kurzschlüsse gemessen. Es gibt eine Geschwindigkeitsschwelle, bei deren Überschreitung die Probe nicht mehr nur deflagriert, sondern es zu einer Detonation kommt. Durch Variieren von PV lässt sich diese Schwelle anhand einer starken Abnahme der Schockübergangszeit ermitteln. In der Regel werden für jede Probe acht Versuche durchgeführt, wobei die niedrigste PV, die zu einer Detonation führt, in Kombination mit der höchsten PV, die nicht zu einer Detonation führt, die Stoßempfindlichkeit der Probe charakterisiert.

Der erste Vergleich zwischen ursprünglichen und unbelasteten Proben ist in Abbildung 1 dargestellt. Unbelastet bedeutet hier, dass nur die thermische Alterung, jedoch keine zusätzliche mechanische Belastung vorgenommen wurde. Der Übergang vom Deflagrations- zum Detonationsbereich der unbehandelten Probe erfolgt zuerst, d.h. bei geringerer PV. Daher scheint das nicht gealterte PBX etwas stoßempfindlicher zu sein. Der Unterschied ist jedoch zu gering, um als signifikant angesehen zu werden. Im Gegensatz dazu sind alle zusätzlich mechanisch belasteten Proben stoßempfindlicher, da sie bereits bei niedrigerer PV detonieren (siehe Abb. 2-4). Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt bei der bei +20 °C belasteten Probe. Ein weiterer bemerkenswerter Punkt ist die äußerst ungewöhnliche Art des Übergangs bei allen drei mechanisch belasteten Proben. Die Unregelmäßigkeit innerhalb der Übergangszone steht in starkem Kontrast zu den typischen PIT-Ergebnissen in Abbildung 1. Die Materialeigenschaften sind daher innerhalb dieser zusätzlich sehr breiten Übergangszone nicht genau definiert. Daher sind die Empfindlichkeitsergebnisse bisher nicht zuverlässig. In Anbetracht der niedrigsten ausgewerteten PV in den Abbildungen 3 und 4 besteht keine Gewissheit, dass der Deflagrationsbereich überhaupt erreicht wurde, und es gibt keine weiteren Detonationen unterhalb von 724 m/s bzw. 754 m/s.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich ein klarer Trend zu erhöhter Empfindlichkeit nach mechanischer Belastung ergibt. Es sind jedoch weitere Analysen erforderlich, um die zugrunde liegenden Ursachen zu verstehen. Das Ziel eines zukünftigen Folgeprojekts ist es, zusätzlich mithilfe der Mikro-Computertomographie die Mikrostruktur der Proben nach mechanischer Belastung zu untersuchen. Zudem sind weitere PIT für einen größeren Bereich von PV geplant, um ein genaueres Bild der Stoßempfindlichkeit und verbesserte Statistiken zu erhalten.

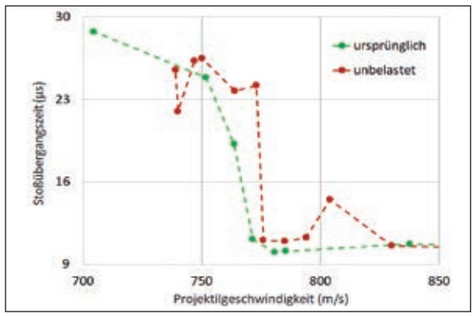


Abb. 1: PIT-Ergebnisse für ursprüngliches und unbelastetes PBX. Der Übergang vom Deflagrations- zum Detonationsbereich findet für Letzteres bei leicht höheren Projektilgeschwindigkeiten statt. Thermisch gealtertes PBX ist also in geringem Maße weniger schockempfindlich. Die Kurvenformen beider Übergänge zeigen deutliche Stufen in der Stoßübergangszeit und entsprechen somit den Erwartungen

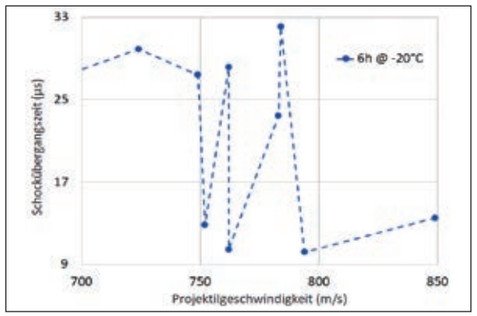


Abb. 2: PIT-Ergebnisse für während 6 Stunden bei -20 °C mechanisch belastetes PBX. Die Schockempfindlichkeit ist erhöht im Vergleich zu den unbelasteten Proben. Der Übergangsbereich ist untypischerweise sehr irregulär und deutlich verbreitert

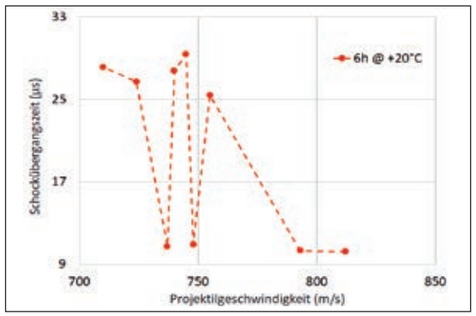


Abb. 3: Die PIT-Ergebnisse für während 6 Stunden bei +20 °C mechanisch belastetes PBX zeigen die höchste Schockempfindlichkeit. Der Übergangsbereich ist erneut irregulär und extrem breit

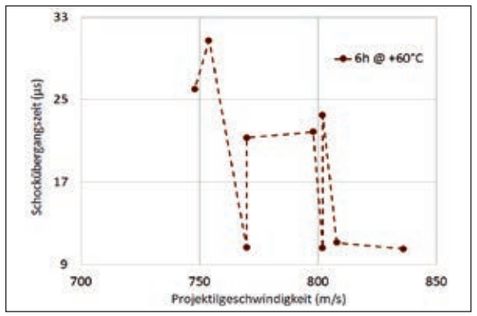


Abb. 4: PIT-Ergebnisse für während 6 Stunden bei +60 °C mechanisch belastetes PBX. Da leider Ergebnisse aus dem geringeren Geschwindigkeitsbereich fehlen, kann nicht mit Sicherheit bestimmt werden, ob die Schockempfindlichkeit nicht noch größer ist

Dr. Martin Schimmerohn
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Clemens Horch
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Dr. Stephan Busch
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Konstantin Schäfer
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

ERNST im Orbit – erste Erfolge des ersten Kleinsatelliten für die Bundeswehr

Der Start des Satelliten ERNST am 16. August 2024 markiert den Beginn der Nutzung von Kleinsatelliten für die Bundeswehr. Seitdem hat der experimentelle Satellit nicht nur die Agilität der Satellitenplattform unter Beweis gestellt, sondern leistet mit der Detektion von Raketenstarts und hypersonischen Flugkörpern einen wichtigen Beitrag für zukünftige satellitenbasierte Frühwarnsysteme.

Die Dimension Weltraum ist essenziell für Frühwarnfähigkeiten zur Detektion und Nachverfolgung von ballistischen Raketen und hypersonischen Flugkörpern. Satelliten übernehmen im vernetzten Luftverteidigungssystem die Aufgabe der Zielvoreinweisung für bodengestützte Radarsysteme, noch bevor die Bedrohung in deren Reichweite gelangt. Mit Infrarotsensoren an Bord von Satelliten wird der Abgasstrahl des Triebwerks und ggf. der erhitzte Flugkörper detektiert. Aus dem Orbit wird die Trajektorie der Rakete von deren Start auf feindlichem Gebiet nachverfolgt, um so die entscheidende Zeit für die Einleitung erfolgreicher Abwehrmaßnahmen zu gewinnen. Für den Betrieb der Systeme Patriot oder Arrow 3 fließen über eine NATO-Kooperation Satellitendaten von US-Satelliten ein. Eigene Satellitendaten von Infrarotsignaturen von Raketen für die Frühwarnung existierten in Deutschland bislang nicht.

Der Satellit ERNST hat diesen Umstand geändert und in den ersten anderthalb Jahren seiner Mission bereits wertvolle Daten geliefert. Die Mission ERNST verfolgt zwei wesentliche Ziele. Zum einen demonstriert sie das Potenzial von Kleinsatelliten zur schnellen Erprobung von Technologie und neuen Anwendungsfeldern mit responsiven, kostengünstigen Missionen. Zum anderen untersucht ERNST Frühwarnkonzepte durch die Beobachtung und Nachverfolgung von Raketen. Für beide Ziele verläuft die Mission bislang äußerst erfolgreich.

Die Satellitenplattform hat das Format eines 12U-CubeSats mit Außenmaßen von 24 × 24 × 36 cm^3 bei 20 kg Masse. Der Satellit und dessen Nutzlast wurden gemäß des New-Space-Ansatzes entwickelt, der durch den Einsatz kommerzieller Komponenten und eine höhere Risikobereitschaft bei der Entwicklung geprägt ist und den Schwerpunkt gemäß dem Motto „Validieren über Zertifizieren“ auf umfangreiches Testen setzt. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung der Datenverarbeitungseinheit (Data Processing Unit, DPU). Diese setzt auf kommerzielle FPGA-Chips, deren Leistungsfähigkeit deutlich über denen von strahlungsharter Raumfahrtelektronik liegt. Die Robustheit des Gesamtsystems wird durch Redundanz in Hardware und Software und umfangreiche Labortests erreicht, und das System kommt inzwischen auf zahlreichen Satellitenmissionen erfolgreich zum Einsatz, unter anderem auf denen der EMI-Ausgründung constellr. Auf ERNST übernimmt die DPU neben seiner eigentlichen Aufgabe der Datenprozessierung und -übermittlung inzwischen auch einen Großteil der Steuerungsaufgaben des On-Board-Computers, einer kommerziellen CubeSat-Komponente. Diese Umstellung erfolgte während des Satellitenbetriebs und zeigt die Agilität des Designs, welche die Leistungsoptimierung und Resilienz des experimentellen Satelliten beim Auftreten eventueller Anomalien gewährleistet. Eine Zielsetzung für den weiteren Missionsverlauf ist die Umsetzung einer weitgehenden Automatisierung des Satellitenbetriebs von ERNST.

ERNST umrundet die Erde auf einem neunzigminütigen Orbit auf inzwischen etwas weniger als 500 km Höhe. In einem Vorhaltemodus wird das in Nadir-Richtung 96 km x 77 km große Sichtfenster um 30° in Voraussicht geschwenkt, um so auch Objekte über dem Erdhorizont zu erkennen. Dies ist ein wichtiger Vorteil der erdnahen Detektion, da sich gegen den kalten Weltraumhintergrund auch Signaturen von kühleren oder kleineren Objekten deutlich absetzen, die im Rauschen des Erdhintergrundsignals ansonsten schwerer zu erkennen sind. Für den Fall der Detektion gegen den Erdhintergrund wechselt ERNST zwischen verschiedenen Spektralbändern, um eine eindeutige Zielerkennung zu gewährleisten. Damit liefert die Mission wichtige Erkenntnisse für die Konzeption von Frühwarnsatelliten in niedrigen und geosynchronen Umlaufbahnen, deren Zusammenspiel in einem zukünftigem Luftverteidigungssystem die erforderliche Leistungsfähigkeit und Abdeckung sicherstellt. Mit der laufenden ERNST-Mission ist der erste Schritt getan.



Abb. 1: Finale Integration von ERNST im Jahr 2024 am Fraunhofer EMI



Abb. 2: Payload-Stack der Rideshare-Mission Transporter-11 mit ERNST im CubeSat-Deployer in der Mitte (links) und Raketenstart am 16. August 2024 (rechts) (Quelle: SpaceX)

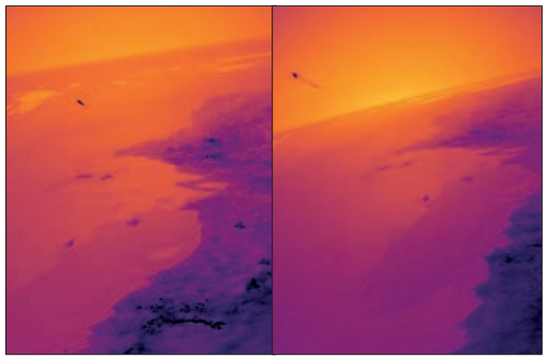


Abb. 3: Detektion eines Falcon-9-Starts (NASA TRACERS) von Vandenberg durch ERNST. Im Videoauszug sind der Aufstieg (links) und die Trennung der Oberstufe (rechts) in Pseudofarbendarstellung als schwarze Objekte in den oberen Bildhälften zu erkennen

Noah Ledford
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Dr. René Kiefer
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Frank Schäfer
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Felix Casser
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

Anormale EM-Ausbreitung und ihr Einfluss auf Radar-System-Performanz

Die Atmosphäre beeinflusst die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und damit die Leistungsfähigkeit von Radarsystemen. Temperaturinversionen und Luftfeuchtigkeitsgradienten können anomale Ausbreitung und sogenanntes Ducting verursachen und so Signaturen sowie Reichweiten verändern. Das Fraunhofer FHR untersucht diese Effekte und entwickelt eigene Ausbreitungsmodelle für verlässliche Abdeckungsprognosen.

Radar ist aufgrund seiner herausragenden Fähigkeit, Objekte über große Entfernungen und in unterschiedlichen Umgebungen zu erkennen, zu verfolgen und zu analysieren, für zahlreiche militärische Systeme von zentraler Bedeutung. Unser intuitives Verständnis dieser Technik setzt voraus, dass sich Radarwellen geradlinig ausbreiten. Nur so lassen sich aus der Laufzeit und der Einfallsrichtung der Radarrückstreuung zuverlässig Entfernung und Richtung eines Ziels bestimmen.

Insbesondere über großen Wasserflächen wie dem Meer gilt die Annahme geradliniger Ausbreitung oft nicht. Wetterphänomene wie Temperaturinversionen oder aufsteigender Wasserdampf führen dazu, dass sich elektromagnetische Wellen (EM) von der Erdoberfläche weg oder zu ihr hin brechen. In extremen, aber nicht unbedingt seltenen Fällen können sogenannte Ducts (Refraktionskanäle) entstehen, die die Sichtbarkeit gegnerischer Kräfte und die eigene Verwundbarkeit erheblich beeinflussen. Diese nicht geradlinige Ausbreitung wird anomale Ausbreitung genannt. Eine Übersicht über die verschiedenen Ausbreitungsformen zeigt Abbildung 1.

In einem Duct werden Anteile der EM-Wellen entlang der Erdoberfläche hinter den Horizont geleitet. Dadurch werden Ziele jenseits des geometrischen Horizonts sichtbar. Gleichzeitig erreichen die in den Duct gebrochenen Wellen andere Bereiche, die sie bei geradliniger Ausbreitung erreichen würden, nicht mehr. Es entstehen sogenannte Radarlöcher, in denen die Detektion von Zielen stark erschwert ist. Lage und Existenz dieser Radarlöcher sind hochdynamisch und hängen von den konkreten atmosphärischen Bedingungen ab. Zudem kann die Annahme geradliniger Ausbreitung bei tatsächlich anomaler Ausbreitung zu fehlerhaften Positions- und Entfernungsschätzungen führen. Die Konsequenzen anomaler Ausbreitung sind in Abbildung 2 visualisiert.

Gerade bei maritimen Operationen muss anomale Ausbreitung zwingend berücksichtigt werden. Sie kann die Signatur eigener Kräfte ebenso verschleiern wie hervorheben – und umgekehrt die gegnerische. Ein fundiertes Verständnis anomaler Ausbreitung ist daher essenziell, um die eigene Verwundbarkeit zu reduzieren und Schwachstellen des Gegners auszunutzen.

Das Fraunhofer FHR forscht intensiv zur anomalen Ausbreitung. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein neuartiger Simulationsansatz auf Basis von Raytracing entwickelt und in ein eigens entwickeltes Tool integriert, das auf Grundlage von Atmosphärendaten die Radarabdeckung vorhersagt. Ein beispielhaftes Simulationsergebnis für eine Beispielatmosphäre zeigt Abbildung 3. Darüber hinaus führt das Fraunhofer FHR Messkampagnen durch, um anomale Ausbreitung besser zu verstehen und Simulationen zu validieren. Zudem wird an einem Verfahren (Refractivity from Clutter, RFC) gearbeitet, aus Clutter-Daten Informationen über den Atmosphärenzustand abzuleiten, um aufwendige meteorologische Messungen während militärischer Operationen zu minimieren.

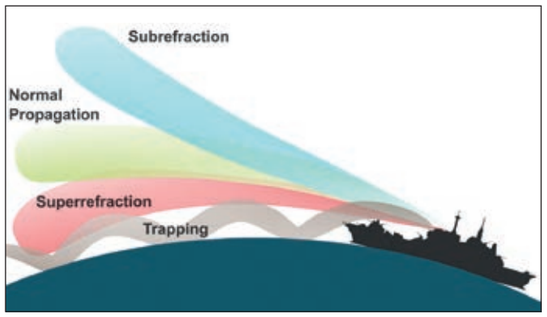


Abb. 1: Arten der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre

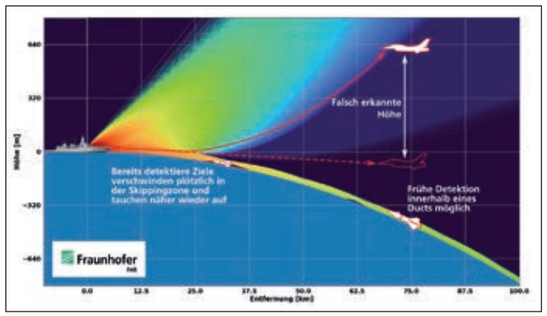


Abb. 2: Mögliche Konsequenzen anomaler Ausbreitung

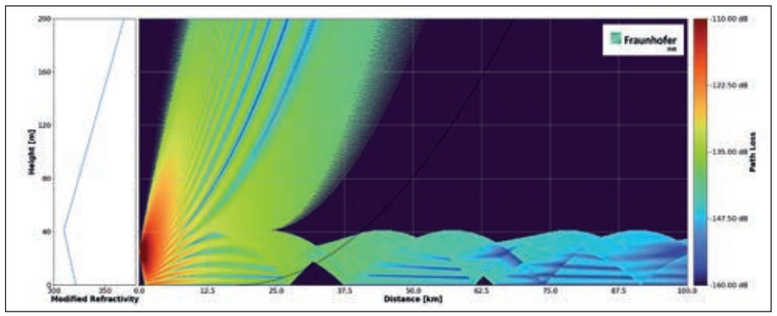


Abb. 3: Rechts: Simulierte EM-Ausbreitung in einer Atmosphäre mit dem beispielhaften Brechungsindexverlauf (links dargestellt)

Laurenz Burlage, M. Eng.
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Philipp Scheffler, M. Sc.
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Ergonomische Gestaltung einer standardisierten Bodenkontrollstation für Loitering Munition

Loitering Munition (LM) ist eine Zukunfts- und Schlüsseltechnologie der Sicherheit und Verteidigung. Das Fraunhofer FKIE entwickelt hierfür eine mobile, modulare und standardisierte Bodenkontrollstation unter Berücksichtigung ergonomischer und technischer Anforderungen und neuartiger Methoden zur Risikoanalyse, um die Usability, Erlernbarkeit und Fehlervermeidung von LM-Systemen zu steigern.

Loitering Munition ist eine Schlüsseltechnologie für die nationale und europäische Sicherheit und Verteidigung. Die F&T-Bedarfe für Loitering Munition werden im Projekt „Zukunftstechnologien für Medium Range Loitering Munition“ der WTD 91 adressiert. Das Fraunhofer FKIE wurde beauftragt, ein Konzept für eine standardisierte Bodenkontrollstation (BKS) zum Führen von LM zu entwickeln, um eine einheitliche und ergonomische Mensch-Maschine-Schnittstelle über verschiedene Systeme zu ermöglichen. Hierbei sollen beim Einsatz von LM die Menschen weiterhin als zentrale und verantwortliche Akteure fungieren, d. h., der Soldat trifft kritische Entscheidungen und stellt als Kontrollinstanz im Sinne der „Meaningful Human Control“ sicher, dass u. a. menschliche Normen und Werte gewahrt sowie die geltenden Rechtsvorschriften eingehalten werden. Die Gestaltung der standardisierten BKS erfolgte iterativ unter Einbindung relevanter Stakeholder (Abb. 1). Auf Basis von Anforderungen und Gestaltungsparametern wurde ein möglichst mobiles und modulares BKS-Konzept für das weitere Vorgehen ausgewählt. Als zentrale Schnittstelle wurde ein Tablet oder Handheld ausgewählt. Zudem sind bedarfsspezifische Funktionalitäten durch die Möglichkeiten erweiterter Schnittstellen zur NATO Generic Vehicle Architecture oder zum Battle Management System vorgesehen. Die wesentliche Forschungsarbeit stellt allerdings das Design und die Implementierung der Benutzeroberfläche für die standardisierte BKS dar. In diesem Kontext wurde zusammen mit der deutschen Industrie ein Layout-Konzept ausgearbeitet (Abb. 2), welches als Style-Guide für eine vereinheitlichte Benutzeroberfläche dienen soll. Ein erster Prototyp der Benutzeroberfläche wurde bereits implementiert (Abb. 3) und mit Soldaten der PzBrig 21 wissenschaftlich evaluiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Konzept eine benutzerfreundliche und funktionale Benutzeroberfläche für den Soldaten darstellt, die in der verbleibenden Zeit des Projekts jedoch im Hinblick auf die Anforderungen der Soldaten und der LM-Systeme weiter ausgebaut und angepasst werden soll.

Neben der ganzheitlichen Berücksichtigung der identifizierten Anforderungen ist bei der Systemgestaltung ein besonderer Fokus auf die Zuverlässigkeit der Systemführung zu legen, da die Auswirkungen von Fehlern ein hohes Schadenspotenzial besitzen. Die Systemführung von LM ist komplex und damit geht auch eine erhöhte Prävalenz potenzieller Ursachen für menschliche Fehler einher. Aus einer methodischen Perspektive berücksichtigen die Analysen der Systemzuverlässigkeit jedoch vor allem technische Aspekte, da sie auf Methoden der technischen Risikoanalyse basieren. Die Analyse von Ursachen menschlicher Fehler lassen sich mit bekannten Methoden nicht ganzheitlich systematisch untersuchen, mit der Folge, dass eine vollständige Erfassung potenzieller menschlicher Fehlerursachen nicht möglich ist. Deshalb wurde am Fraunhofer FKIE in Anlehnung an die Human Factors Hazard Analysis eine strukturierte Methode entwickelt, die potenzielle Ursachen menschlicher Fehler in Waffensystemen hinsichtlich schwerwiegender Fehlerzustände in Bezug auf die Gestaltungsparameter des Systems identifiziert. Die Ergebnisse der Analyse werden für die Gestaltung der standardisierten BKS genutzt.

Das erstellte Layout-Konzept für eine standardisierte BKS für Loitering Munition wird bis Mitte 2026 in einer ersten Version finalisiert. Aufbauend darauf kann das Konzept in folgenden Iterationen zur Vereinheitlichung erweitert werden, wie z. B. durch standardisierte Softwareschnittstellen und eine einheitliche Systemarchitektur. Die standardisierte BKS soll insbesondere durch ihre ergonomische Gestaltung die Erlernbarkeit, die Usability und die Zuverlässigkeit verbessern und ermöglicht dadurch geringere Trainingszeiten sowie einen sicheren Einsatz des Systems.

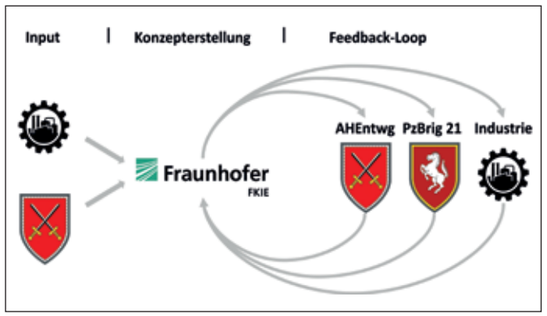


Abb. 1: Darstellung der Methodik zur Entwicklung der standardisierten BKS

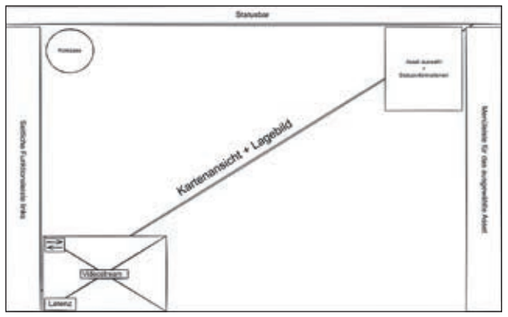


Abb. 2: Beispielhafter Auszug aus dem Layout-Konzept für die vereinheitlichte BKS-Oberfläche



Abb. 3: Darstellung einer möglichen Handheldlösung mit der ersten Implementierung der Benutzeroberfläche

Dr.-Ing. Christopher Brandl
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Marcel Baltzer
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Henry Hölzemann, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Torsten Fiolka, Dipl.-Inform.
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Prof. Dr. Wolfgang Koch
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Visuelle GNSS-lose Navigation

Störungen des globalen Satellitennavigationssystems (GNSS) durch Jamming und Spoofing gefährden zunehmend die Navigation von UAS. Als Alternative kann eine visuelle Eigenlokalisierung eingesetzt werden. Am Fraunhofer FKIE wird hierzu ein Demonstrator zur GNSS-losen Navigation entwickelt und erprobt, der kamerabasierte Verfahren mit Satellitenbildern und digitalen Höhenmodellen zur robusten Positionsbestimmung kombiniert.

Mit dem zunehmenden Einsatz von Unmanned Aerial Systems (UAS) in militärischen Konflikten haben die Aktivitäten des Jammings (gezieltes Überlagern von Signalen durch Störsender) und Spoofings (Aussenden manipulierter Signale zur Täuschung des Empfängers) des globalen Satellitennavigationssystems (GNSS) weltweit deutlich zugenommen. Ziel davon ist es, die Lokalisierung und Navigation der Systeme gezielt zu stören. Diese Angriffe auf GNSS betreffen neben UAS auch bemannte Luftfahrzeuge, maritime Plattformen sowie zivile Land und Luftfahrzeuge, deren GNSS gestützte Navigation beeinträchtigt wird. In solchen Situationen sind alternative Verfahren zur Eigenlokalisierung erforderlich.

Anstelle von GNSS kann die Eigenpositionierung eines UAS durch optische Sensorik erfolgen, etwa mittels Tageslicht oder Infrarotkameras. Hierfür nimmt eine an Bord befindliche Kamera fortlaufend die Erdoberfläche auf, um die Bildfolgen dann sequenziell abgleichen zu können. Dabei werden markante Merkmalspunkte getrackt. Durch die Fusion mit Inertialsensorik lässt sich so die Eigenbewegung des UAS schätzen. Die Fehler dieser relativen Schätzungen kumulieren sich jedoch im Zeitverlauf und führen zu einem Drift. Ebenso kann ein Tracking-Verlust die Lokalisierung unterbrechen oder zum Abbruch bringen.

Um die Lokalisierung robuster zu gestalten oder eine Relokalisierung zu ermöglichen, können Fernerkundungsdaten wie Satellitenbilder und digitale Höhenmodelle verwendet werden, die typischerweise breit verfügbar sind und eine flächendeckende, häufig globale Abdeckung bieten. Zunächst können die absoluten Referenzen genutzt werden, um Orte visuell wiederzuerkennen und das UAS grob zu lokalisieren. Durch den Einbezug digitaler Höhenmodelle sind anschließend präzise Positions und Orientierungsbestimmungen möglich. In Kombination mit relativen Schätzverfahren entsteht so eine robuste Navigation, die relative und absolute Informationen nutzt (Abb. 1).

Aufgrund der sich abzeichnenden Entwicklungen im UAS Bereich wird am Fraunhofer FKIE seit mehreren Jahren ein Demonstrator zur GNSS losen Navigation in Form einer Sensornutzlast fortlaufend weiterentwickelt und evaluiert (Abb. 2). Hierfür wurde ein Ultraleichtflugzeug als Trägerplattform der Nutzlast verwendet und über mehrere Jahre und Jahreszeiten hinweg ein umfangreicher Datensatz zur GNSS-losen Navigation erhoben. Die Nutzlast umfasst neben einer Tageslichtkamera ein Inertialnavigationssystem mit integrierter inertialer Messeinheit sowie ein barometrisches Altimeter. Auf Basis der erhobenen Felddaten wurden umfangreiche Experimente zur GNSS losen Navigation durchgeführt und Verfahren zur visuell(-inertialen) Odometrie (VO/VIO) sowie zur visuellen Geo Lokalisierung (VGL) entwickelt (Abb. 3). Abhängig von der Qualität der verfügbaren Referenz und Sensordaten, erreichen diese Verfahren In Kombination typischerweise eine Positionsgenauigkeit im Bereich weniger Meter und eine Orientierungsgenauigkeit unter 1°. Zusätzlich wurde die Leistungsfähigkeit der Verfahren zur GNSS-losen Navigation hinsichtlich der Einsetzbarkeit zu verschiedenen Jahreszeiten und in unterschiedlichen Einsatzgebieten analysiert. Dabei erwies sich die Aktualität der Referenzdaten gegenüber dem Aufnahmezeitpunkt der Sensordaten als entscheidender Faktor. Zudem weisen sowohl relative als auch absolute visuelle Lokalisierungsverfahren in städtischen und bebauten Gebieten eine höhere Genauigkeit auf als in bewaldeten oder landwirtschaftlichen Regionen.

Mit dem entwickelten Demonstrator konnte die Realisierbarkeit robuster GNSS loser Navigation unter verschiedenen Umweltbedingungen nachgewiesen werden. Diese Fähigkeit soll weiter ausgebaut und auch im Kontext kleiner, agiler Plattformen unter Extrembedingungen untersucht werden.

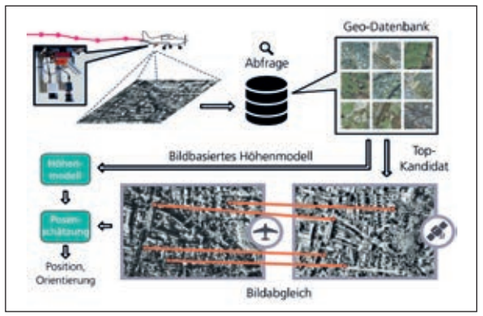


Abb. 1: Visuelle Geo-Lokalisierung durch Hinzunahme von Fernerkundungsdaten



Abb. 2: Sensor-Nutzlast zur GNSS-losen Navigation, angebracht am Ultraleichtflugzeug „Delphin“



Abb. 3: Beispiel einer vollständigen Posenschätzung durch Fernerkundungsdaten

Dr. Sébastien Chartier
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

Integrierte Breitband-Frontend-Lösungen für multifunktionale Antennensysteme

Künftige militärische Plattformen werden auf multifunktionale Antennen für Kommunikation, Radar und Electronic Warfare (EW) unter strengen „Size, Weight and Power“ (SWaP)-Vorgaben setzen. Millimeter- und Submillimeterbänder bieten hohe Bandbreite, Auflösung und nutzbare Ausbreitungseffekte für Tarnung und erfordern hochintegrierte Breitband-HF-Frontends (RF). Ein ultra breitbandiger metamorphic High Electron Mobility Transistor (mHEMT) Empfängerchip des Fraunhofer IAF belegt die Machbarkeit.

Militärische Einsätze finden zunehmend in hochdynamischen, verteilten und informationsintensiven Umgebungen statt. Mobile Führungselemente, autonome Plattformen und Sensornetzwerke müssen große Datenmengen austauschen und dabei ihre elektromagnetischen Signaturen minimieren sowie unter Störung, Abhörversuchen oder reaktiven elektronischen Angriffen funktionsfähig bleiben. Die Überlebensfähigkeit moderner Systeme wird maßgeblich durch ihre Fähigkeit bestimmt, kurzzeitig, adaptiv und verdeckt im elektromagnetischen Spektrum zu operieren. Diese Randbedingungen treiben den Übergang zu hochintegrierten Hochfrequenz-(HF)-Architekturen, in denen Kommunikations-, Radar- und Funktionen des elektronischen Kampfs in gemeinsamen Aperturen und Frontends zusammengeführt werden.

Parallel schrumpft der verfügbare Antennenraum auf luftgestützten, unbemannten und bodengebundenen Plattformen kontinuierlich, während die funktionalen Anforderungen weiter steigen. Ultra-breitbandige HF-Frontends werden damit zu einem entscheidenden Enabler: Große Bandbreiten im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich ermöglichen kurze, hochkapazitive Sende- und Erfassungsfenster, sehr feine Entfernungsauflösung, schnelle Szenenaktualisierung sowie geringe Abhörwahrscheinlichkeit. Die Integration von Radar- und Kommunikationsfunktionen in derselben Hardware reduziert Systemkomplexität, Platzbedarf und elektromagnetische Exposition und erlaubt eine missionsadaptive Nutzung spektraler Ressourcen.

Eine Schlüsseltechnologie für diese Konzepte ist ein am Fraunhofer IAF demonstrierter ultra-breitbandiger Empfangs-MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit). Der in einer 35-nm-InGaAs-metamorphic-HEMT-Technologie realisierte Chip integriert einen rauscharmen Verstärker, einen LO (Lokaloszillator)-Buffer und einen fundamentalen Mischer (Abb. 1) auf nur 1,25 × 1 mm² (Abb. 2). Im Gegensatz zu schmalbandigen oder mehrchipbasierten Empfängerlösungen arbeitet der MMIC kontinuierlich im Frequenzbereich von 140 bis 330 GHz und stellt damit über 190 GHz HF-Bandbreite in einem einzigen monolithischen Frontend bereit.

Die Architektur basiert auf einem gemeinsamen Distributed-Amplifier-Kern für Low-Noise-Amplifier (LNA) und LO-Buffer und gewährleistet eine flache Verstärkungscharakteristik bei exzellenter Rauschperformance über extreme Bandbreiten. Ein resistiver HEMT-Mischer erlaubt eine effiziente Frequenzumsetzung bei moderatem LO-Leistungsbedarf, was insbesondere für elektronisch strahlgesteuerte Arrays, verteilte Aperturen und mobile Systeme von hoher Relevanz ist. Über den gesamten Messbereich erreicht der Empfänger eine mittlere Umsetzungsverstärkung von 16 dB sowie eine durchschnittliche Rauschzahl von 6,8 dB und setzt damit einen neuen Maßstab für ultra-breitbandige Submillimeterwellen-Empfänger dieser Integrationsstufe (Abb. 3). Die Leistungsaufnahme beträgt lediglich 352 mW und erfüllt strenge SWaP-Vorgaben. Simulationen zeigen zudem eine äquivalente Leistungsfähigkeit bis 400 GHz ohne Hardwareänderungen.

Der besondere Mehrwert dieses MMIC liegt in der bislang unerreichten Kombination aus großer Bandbreite, niedriger mittlerer Rauschzahl und vollständiger monolithischer Integration in einem kompakten Einzelchip. Erstmals vereint ein Single-Chip-Empfänger mehr als 190 GHz Bandbreite mit einer durchschnittlichen Rauschzahl unter 7 dB und macht band-spezifische Empfänger, umschaltbare HF-Ketten und parallele Frontends überflüssig. Dies ermöglicht eine echte frequenzagile Nutzung, bei der Kommunikations-, Radar- und elektronische Kampffunktionen flexibel und situationsabhängig mit identischer Hardware realisiert werden können.

In Kombination mit multifunktionalen Antennenarchitekturen bildet dieser MMIC die technologische Grundlage für zukünftige militärische Plattformen (Abb. 4) mit extremen Bandbreitenanforderungen, geringer Beobachtbarkeit und hoher Rekonfigurierbarkeit selbst unter anspruchsvollsten elektromagnetischen Bedingungen.

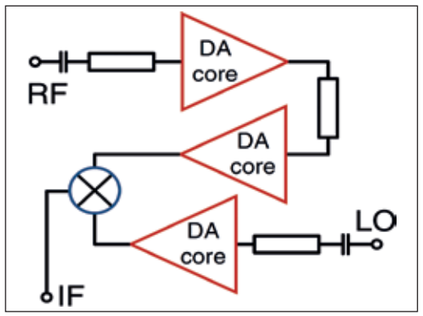


Abb. 1: Blockschaltbild des InGaAs-mHEMT-Breitbandempfänger-MMICs einschließlich LNA, Mischer und Lokaloszillator-Pufferverstärker

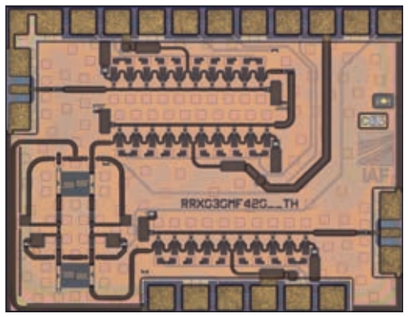


Abb. 2: Chipfoto des mit dem 35-nm InGaAs mHEMT-Prozess des Fraunhofer IAF prozessierten Breitbandempfängers. Der Chip hat die Maße 1,25 x 1 mm²

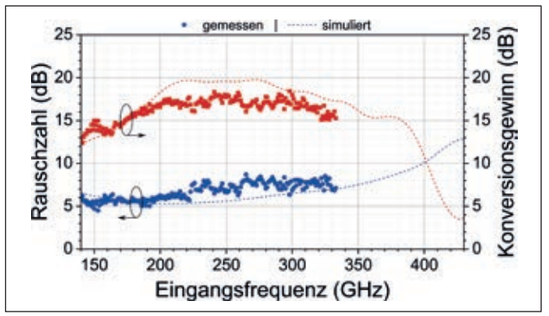


Abb. 3: Gemessene Verstärkung (rot) und Rauschzahl (blau) über der Frequenz für den realisierten Breitbandempfänger



Abb. 4: Drohnenschwarm- und Feldlagerszenario (KI generiert)

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

info@ict.fraunhofer.de

Simulation des Abbrands von multimateriellen und komplex geformten Treibladungspulvern

Neue Fertigungsverfahren ermöglichen es die Geometrie und Materialstruktur von Treibladungspulvern (TLP) neu zu gestalten, um die Leistungsfähigkeit von Rohrwaffen zu steigern. Zur Prognose der Leistungsfähigkeit wurde daher am Fraunhofer ICT der MMGPS-Algorithmus entwickelt und implementiert, mit dem erstmals der Abbrand von multimateriellen und komplex geformten TLP beschrieben werden kann.

Die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Rohrwaffen ist auch heute noch Forschungsgegenstand und von großer militärischer Relevanz zur Sicherstellung der Überlegenheit im Gefecht. Die Mündungsgeschwindigkeit eines Geschosses wird durch die Form der Druckkurve aufgrund der Verbrennung eines TLPs bestimmt. Um die Mündungsgeschwindigkeit zu steigern, gilt es, die Fläche unter der Druck-Weg-Kurve zu maximieren. Gleichzeitig sind Randbedingungen einzuhalten, etwa der zulässige Maximaldruck und ein möglichst niedriger Mündungsdruck. Daraus folgt, dass ein möglichst hoher Druck über eine möglichst lange Zeit vorliegen muss (Abb. 1).

Zur Beschreibung der Druckentwicklung in einem gegebenen System muss bekannt sein, wie viel TLP-Masse in die Munition geladen werden kann und wie viel Gas in welcher Zeit produziert wird. Die wesentlichen Stellschrauben hierfür sind die TLP-Schüttdichte und die Beschreibung der druckabhängigen Oberflächenregression des TLP-Korns.

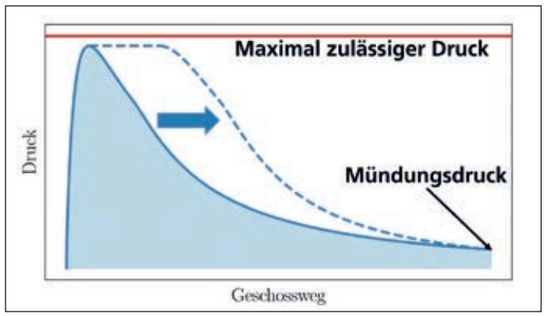


Abb. 1: Schematische Darstellung einer herkömmlichen Druckkurve (durchgezogene Kurve) und optimierten Druckkurve (gestrichelte Kurve) unter Berücksichtigung der Randbedingungen eines zulässigen Maximaldrucks und eines möglichst niedrigen Mündungsdrucks

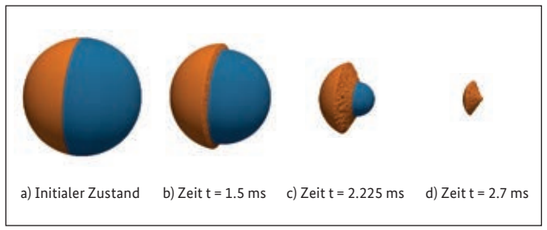


Abb. 2: Multimaterielles Kugelpulver bestehend aus zwei Halbkugeln als Materialstruktur mit unterschiedlichen Abbrandkoeffizienten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Abbrandsimulation

Die Schüttdichte des TLPs wird bisher experimentell in standardisierten Schüttversuchen bestimmt. Diese sind zum einen zeit- und kostenintensiv und vernachlässigen zum anderen bauart- und prozessbedingte Einflüsse, wie z. B. das ins Pulverbett ragende Penetratorheck. Deshalb wird i. d. R. für TLP, die mittels etablierter Verfahren gefertigt werden, auf Erfahrungswerte zurückgegriffen und anschließend die erreichbare Ladedichte experimentell ermittelt. Bei komplexen TLP-Geometrien, wie sie durch moderne Fertigungsverfahren möglich sind, existieren diese Erfahrungswerte nicht. Deswegen wurde am Fraunhofer ICT erstmalig die Diskrete-Element-Methode dazu verwendet, die TLP-Schüttdichte simulativ zu bestimmen, wie im Jahresbericht 2024 vorgestellt.

Herkömmliche TLP-Körner bestehen aufgrund der etablierten Fertigungsverfahren aus einer einzelnen Formulierung. Dies ermöglicht, die Oberflächenregression des TLP-Korns unabhängig von der Druckentwicklung im System zu beschreiben. Moderne Fertigungsverfahren, z. B. Koextrusion oder 3D-Druck, bieten die Möglichkeit komplex geformte und aus mehreren Formulierungen bestehende TLP-Körner, sogenannte multimaterielle TLP-Körner, zu fertigen. Dies ermöglicht eine vielseitigere Optimierung der Druckkurve. Um das verfügbare Potenzial zu nutzen, benötigt es jedoch neue Simulationsmethoden zur Beschreibung der Oberflächenregression. Bei multimateriellen TLP-Körnern können mehrere Formulierungen gleichzeitig auf der brennenden Oberfläche vorliegen. In diesem Fall kann die Oberflächenregression nicht mehr getrennt von der Druckentwicklung beschrieben werden, da sie aufgrund der unterschiedlichen Abbrandeigenschaften der TLP-Formulierungen von der Druckhistorie abhängt.

Zur Beschreibung des Abbrands von multimateriellen und komplex geformten TLPs wurde deshalb am Fraunhofer ICT der Multi-Material-Gun-Propellant-Simulation-Algorithmus (MMGPS-Algorithmus) entwickelt und implementiert. Mit diesem kann zum ersten Mal der Abbrand von multimateriellen und komplex geformten TLP in Rohrwaffen beschrieben werden. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Abbrand eines multimateriellen Kugelpulvers zu verschiedenen Zeitpunkten während des Abbrands, wobei die blaue Formulierung schneller abbrennt als die orange Formulierung.

Aufgrund der unterschiedlichen Abbrandeigenschaften der einzelnen Formulierungen kann die Druckkurve in einer Rohrwaffe gezielt optimiert werden. Abbildung 3 zeigt ein mögliches multimatrielles TLP-Korn und eine entsprechende schematische Druckkurve. Nach Erreichen des Druckmaximums ist die blaue, langsamer abbrennende Formulierung vollständig verbrannt. Durch die nun freigelegte, schneller abbrennende, orange Formulierung steigt der Druck wieder an. Durch den erneuten Druckanstieg wird die Fläche unterhalb der Druckkurve und damit die Geschossenergie vergrößert.

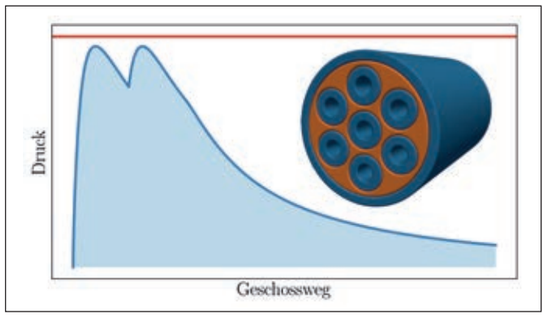


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Druck-Weg-Kurve mit einem entsprechenden beispielhaften multimateriellen TLP-Korn

Marcel Henkel, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Dr. Nadia Burkart
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Komponentenbasierte Objekterkennung am Beispiel militärischer Fahrzeuge

Die komponentenbasierte Objekterkennung am Beispiel militärischer Fahrzeuge identifiziert Fahrzeuge, indem charakteristische Bauteile wie etwa ein Geschützturm oder Sensoraufbauten detektiert und anschließend mithilfe einer Wissensbasis zu einem Gesamtfahrzeug zusammengeführt werden. Das Verfahren lässt sich ohne hohen Trainingsdatenbedarf auf andere Plattformen wie Schiffe übertragen.

Die Identifikation militärischer Plattformen erfordert hohe Robustheit und Nachvollziehbarkeit. Einsatzbilder variieren stark hinsichtlich Perspektive, Auflösung, Sichtbedingungen, Tarnung, Teilverdeckung oder kurzfristiger Modifikationen. Rein datengetriebene Verfahren liefern oft nur eine Klassifikation ohne transparente Begründung. In sicherheitsrelevanten Anwendungen sind solche Blackbox-Entscheidungen problematisch, da sie nicht überprüfbar sind.

Die komponentenbasierte Objekterkennung verfolgt daher einen hybriden Ansatz, der datengetriebene mit wissensbasierten Verfahren kombiniert. Das Verfahren orientiert sich an der Vorgehensweise erfahrener Bildauswerter: Aus erkennbaren, fahrzeugspezifischen Komponenten wird auf das Gesamtfahrzeug geschlossen.

Statt nur globale Bildmuster auszuwerten, lokalisiert das Verfahren zunächst charakteristische, unterscheidungskräftige Komponenten militärischer Landfahrzeuge, wie etwa Bewaffnung, Sensorik, Schutz- und Anbauelemente, Aufbauten, Antennen oder spezifische Strukturen (Abb. 1). Diese für Bildauswerter nachvollziehbaren Komponenten bilden gemeinsam mit einer Wissensdatenbank die Grundlage zur Überprüfung der Modellvorhersage.

Um die Informationslage in den Bildern ausgiebig zu nutzen, werden die Informationen bzgl. der Komponenten mit zusätzlichen, datengetriebenen Bildklassifikatoren zusammengeführt, um auch unter eingeschränkter Sicht robuste Entscheidungen zu treffen.

Um auch bei unvollständiger Informationslage belastbare Aussagen zu treffen, werden mehrere Informationsquellen kombiniert: erkannte Komponenten und deren räumliche Anordnung, die Detektionssicherheit der einzelnen Komponenten, Qualitäts- und die Auflösungsindikatoren des Bildmaterials. Diese Hinweise werden gemeinsam bewertet und gewichtet. Dadurch bleibt das Verfahren auch bei eingeschränkter Sicht, Tarnung oder niedriger Bildqualität einsatzfähig (Abb 2). Bei unvollständiger Informationslage sinkt die Entscheidungssicherheit graduell und nachvollziehbar, anstatt abrupt zu kippen.

Ein zentrales Element ist die zugrunde liegende Wissensbasis der Software Recceman®. Diese bildet typische Kombinationen von Komponenten und deren Zuordnung zu Fahrzeugklassen strukturiert ab. Dies ermöglicht eine transparente Herleitung: Anwender können nachvollziehen, welche detektierten Komponenten eine Hypothese stützen, und die zugrunde liegenden Zuordnungen bei Bedarf nachschlagen. Als zusätzlicher Nutzen kann das System aus dem Komponentenstrom eine detaillierte Beschreibung der Fahrzeuge erstellen (z. B. externe Waffen, Sensorpakete, Schutzvorrichtungen), welches die Lagebildarbeit unterstützt.

Aus methodischer Sicht bietet der Ansatz mehrere Vorteile: Durch die Einbindung von Vorwissen sinkt der Trainingsdatenbedarf. Auch bislang nicht spezifisch trainierte Fahrzeuge können erkannt werden, wenn ihre charakteristischen Bauteile detektierbar sind. Modifizierte Objekte lassen sich zudem schnell durch Aktualisierung der Wissensbasis integrieren. Dies ist ein entscheidender Vorteil in dynamischen Einsatzkontexten. Die Kombination mehrerer unabhängiger Hinweisquellen erhöht darüber hinaus die Robustheit gegenüber Störungen und gezielten Manipulationsversuchen.

Das Verfahren erreicht bei den Landfahrzeugen bereits die differenzierte Identifikation von rund 150 Fahrzeugklassen. Die Grundidee ist domänenübergreifend übertragbar, sofern Objekte durch charakteristische Komponenten unterscheidbar sind. Diese Übertragbarkeit wird aktuell in der maritimen Domäne weiter vertieft. Typische Anwendungsfelder sind Drohnen- und Satellitenbildaufklärung, mobile Fernspäher, die Automatisierung der Auswerte-Software Recceman®, sowie Assistenzsysteme, die explizit über relevante oder verwundbare Komponenten informieren müssen.

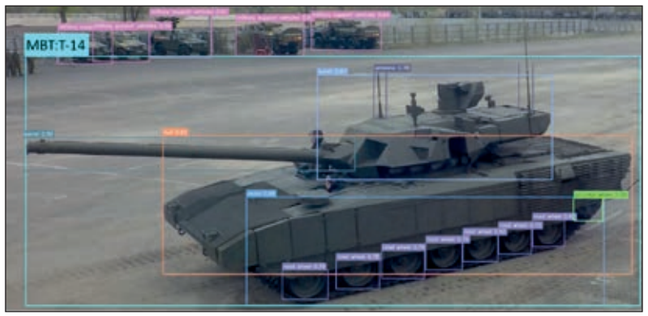


Abb. 1: Automatische Erkennung militärischer Landfahrzeuge anhand ihrer Komponenten

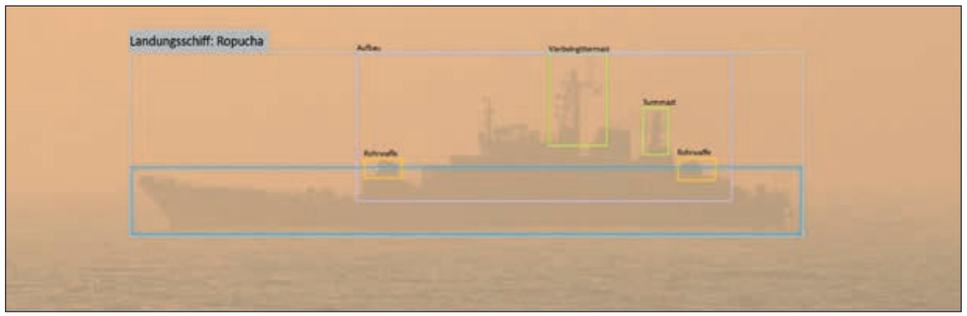


Abb. 2: Automatische Erkennung der Schiffsklasse Ropucha anhand ihrer Komponenten in anspruchsvoller Wetterlage

Daniel H. Greiwe
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

pd-s@dlr.de

Tim Jusko
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

pd-s@dlr.de

Visual Action – Bestimmung von Pilotenkompensation durch Blickerfassung

Das Institut für Flugsystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt entwickelte die Methode „Visual Action“, die aus Blickerfassungsdaten die Pilotenkompensation bei Hubschrauberflugmanövern objektiv quantifiziert. Eine Simulatorstudie belegt eine hohe Übereinstimmung mit den subjektiven Bewertungen der Piloten. Die Methode bietet Potenzial für Beanspruchungsüberwachung und adaptive Assistenzsysteme in militärischen Hubschraubern.

Im Rahmen des Projektes EASINESS wurden Werkzeuge zur Systementwicklung sowie innovative Systeme selbst mit dem Ziel der Erweiterung der taktischen Einsatzfähigkeit von militärischen Hubschraubern untersucht. Darüber hinaus wurden Methoden zur Bewertung der untersuchten Systeme unter anderem in Hinblick auf die Pilotenbeanspruchung entwickelt.

Bei der Durchführung von Flugmanövern müssen Hubschrauberpiloten stets einen mentalen und motorischen Mehraufwand erbringen, um eine sichere Fluglage zu gewährleisten – die sogenannte Pilotenkompensation. Je höher diese Kompensation, desto schlechter die Bewertung der Flugeigenschaften. Bislang wurde Pilotenkompensation vorrangig über Steuereingriffsdaten oder subjektive Pilotenratings erfasst. Am Institut für Flugsystemtechnik des DLR in Braunschweig wurde daher die Methode „Visual Action“ entwickelt, die Blickerfassungsdaten erstmals für die objektive Quantifizierung der Pilotenkompensation nutzbar macht.



Abb. 1: ACT/FHS-Nachbaucockpit in der AVES-Forschungseinrichtung des DLR

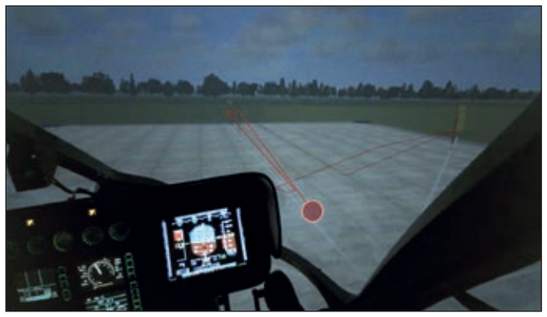


Abb. 2: Blickbewegungen eines Hubschrauberpiloten beim Präzisionsschweben

Grundlage der Methode ist die Analyse der Blickbewegungen des Piloten im Cockpit. Dabei wird gezählt, wie häufig der Pilot pro Sekunde seinen Blick gezielt von einem Informationspunkt zu einem anderen verlagert – kleine, unwillkürliche Augenbewegungen werden dabei herausgefiltert. Aus der anspruchsvollsten Teilphase des jeweiligen Manövers wird ein mittlerer Blickaktivitätswert berechnet. Eine individuelle Kalibrierung auf den jeweiligen Piloten ermöglicht schließlich einen pilotübergreifenden Vergleich.

Die tragende Hypothese lautet: Bei niedriger Pilotenkompensation steht mehr kognitive Kapazität für aktive Blicksteuerung zur Verfügung – die Visual Action steigt. Bei hoher Kompensation hingegen verengt sich die Aufmerksamkeit auf wenige visuelle Fixpunkte, die Visual Action sinkt. Es ergibt sich damit ein inverser Zusammenhang zwischen Blickaktivität und der Pilotenkompensation.

Zur Validierung absolvierten Testpiloten am Flugsimulator AVES des DLR Braunschweig (Abb. 1) vier standardisierte Flugtestmanöver – Schweben, Slalom, Pirouette sowie Beschleunigung/Verzögerung – jeweils mit Flugreglern unterschiedlicher Charakteristik. Die Blickbewegungen wurden mit einer Blickerfassungsbrille aufgezeichnet (Abb. 2).

Die Auswertung zeigt eine starke Korrelation zwischen der gemessenen Blickaktivität und dem Pilotenrating – mit einer ausgezeichneten Übereinstimmung unabhängig vom jeweiligen Manöver. Darüber hinaus lassen sich zwei klare Schwellenwerte ableiten, die den Übergang von minimaler zu moderater sowie von moderater zu erheblicher Pilotenkompensation markieren.

Für militärische Anwendungen ist diese Methode von besonderem wehrtechnischem Interesse: Hubschrauberpiloten operieren unter extremen Bedingungen – eingeschränkte Sicht (DVE), Decklandungen, Tiefflugprofile –, in denen eine zu hohe Beanspruchung sicherheitskritisch wird. Diese Methode bietet Potenzial für Beanspruchungsüberwachung, Ausbildungsbewertung und adaptive Assistenzsysteme in militärischen Hubschraubern.

Die Methode „Visual Action“ eröffnet neue Möglichkeiten zur berührungslosen, kontinuierlichen Bewertung der Pilotenbeanspruchung. Zukünftige Arbeiten sollen die Übertragbarkeit auf reale Hubschrauberflüge und Simulatoren mit Bewegungsplattform prüfen sowie untersuchen, ob der Ansatz auf weitere Mensch-Maschine-Schnittstellen verallgemeinert werden kann.

Marcel Littig
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
Stuttgart

pd-s@dlr.de

Georg Doll
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
Stuttgart

pd-s@dlr.de

Erik Buchenau
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

pd-s@dlr.de

Stefan Thurner
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

pd-s@dlr.de

Simulation, Fertigung und experimentelle Validierung eines Multilayer-Radarabsorbers

In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der DLR-Institute HR und BT wurde ein Multilayer-Radarabsorber vom DLR-HR simulativ entworfen, am DLR-BT gefertigt und anschließend am DLR-HR elektromagnetisch vermessen. Der Fokus der Arbeiten lag auf der Demonstration der Fähigkeit, komplexe Radarabsorber digital auszulegen, innerhalb enger Toleranzen zu fertigen und anschließend experimentell zu validieren.

Radarabsorbierende Materialien (RAM) stellen eine Gruppe funktionalisierter Materialien dar, die die elektromagnetische Signatur von Objekten im GHz-Bereich (Radarsignatur) reduzieren. Solche Materialien aus mehreren Schichten werden als Multilayer-RAM bezeichnet. Die nötige Multidisziplinarität, die nötig ist, um solche Multilayer-RAM für die Luftfahrtanwendung auszulegen, zu fertigen und experimentell zu validieren, wird von den Instituten für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme (DLR-HR) sowie für Bauweisen und Strukturtechnologie (DLR-BT) demonstriert:
Um die einfallende elektromagnetische Energie zu verbrauchen, werden Füllstoffe mit elektrischen oder magnetischen Verlusten benötigt. In der hier vorliegenden Arbeit werden Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT) verwendet, die bereits bei niedrigen Konzentrationen für hohe elektrische Verluste sorgen. Im ersten Schritt werden Platten aus PEEK-CNT, einem Kunststoffkomposit-Werkstoff, der mit CNT gefüllt ist, mit verschiedenen Füllgraden gefertigt und elektromagnetisch vermessen, um eine Zuordnung zwischen den CNT-Füllgraden und den elektromagnetischen Eigenschaften zu erhalten. Anschließend können beliebige Kombinationen aus den vermessenen Schichten gebildet und deren Absorptionsverhalten analytisch berechnet werden. Mögliche Freiheitsgrade sind dabei die Füllgrade, die Dicke der Einzelschichten und die Gesamtanzahl bzw. Anordnung der Schichten. Innerhalb der Randbedingungen wie der Maximaldicke des Gesamtaufbaus, der minimal herstellbaren Einzelschichtdicke sowie den Materialtoleranzen können dabei alle Kombinationen gebildet und analytisch berechnet werden. Die Absorptionsfähigkeit jeder Kombination wird dabei bewertet und die optimale Kombination ausgewählt, auf deren Basis der finale Multilayer-Aufbau festgelegt wird.
Basierend auf den Anforderungen an die Dicke werden dann die einzelnen Lagen des Multilayer-Aufbaus aus dem jeweiligen Hochtemperatur-Thermoplastgranulat in der Heißpresse (Abb. 1) vorgefertigt (Abb. 2). Die Einhaltung der Toleranzen wird in einem zweiten Schritt für die beiden Platten aus (1) PEEK und (2) PEEK-CNT überprüft. Bevor die Einzellagen in der Presse verklebt werden, erfolgt eine Plasmaaktivierung der Oberflächen, um die Anhaftung zu verbessern. Die Multilayer-Platte wird dann besäumt und anschließend elektromagnetisch vermessen.
Die Vermessung findet in einem Freiraum-Messaufbau statt, der sich in einer echofreien Kammer befindet. Die Probe wird dabei senkrecht von einer Antenne beleuchtet, welche die Reflexionseigenschaften misst, woraus Rückschlüsse auf die Absorptionsfähigkeit der Probe gezogen werden können. Damit die Randbereiche der Probe das Messergebnis nicht verfälschen, wird vor der Antenne eine Linse platziert, die die Energie auf die Probenmitte fokussiert.
Die Messergebnisse können anschließend aufbereitet werden und mit den analytischen Ergebnissen, die vorab in der Auslegung berechnet wurden, verglichen werden (Abb. 3).
Der demonstrierte Workflow kann in Zukunft auf weitere Auslegungen von Absorbern angewendet werden. Die Vielfalt an Fertigungstechnologien am DLR-BT erlaubt zudem, den Einfluss der Fertigungsparameter auf die elektromagnetischen Eigenschaften direkt zu quantifizieren. Herausforderungen wie beispielsweise abweichende Wärmeausdehnungskoeffizienten bei hybriden Fügungen sind Bestandteil aktueller Forschung. Die hierzu erarbeiteten Lösungsansätze werden ebenfalls stets durch HR elektromagnetisch abgesichert. Die Zusammenführung der Kompetenzen beider beteiligter Institute ermöglicht es auch in Zukunft, Herausforderungen beispielsweise bei der Fertigung und Integration solcher RAM-Technologien zu bewältigen. Das Kernelement der Zusammenarbeit ist es, sowohl die elektromagnetischen Randbedingungen als auch die fertigungsbedingten Rahmenbedingungen gemeinsam zu betrachten, um so RAM-Aufbauten zu erhalten, die sowohl ihren mechanischen als auch ihren radarabsorbierenden Anforderungen gerecht werden.



Abb. 1: Heißpresse der Firma Rucks am DLR-BT in Stuttgart

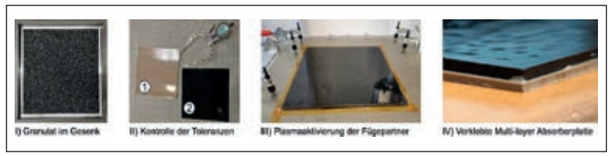


Abb. 2: Fertigungsschritte der Multilayer-Absorberplatte aus (1) PEEK und (2) PEEK-CNT

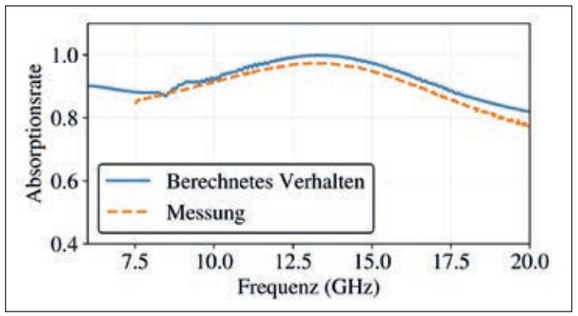


Abb. 3: Abgleich von Simulation und experimentellen Ergebnissen der Multilayer-Absorberauslegung

Benedikt Max Dannbeck
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Manching

pd-s@dlr.de

Der Weg zur automatisierten Luft-zu-Luft-Betankung im Projekt FARAO

Die Luft-zu-Luft-Betankung nach dem sogenannten Probe-and-Drogue-Verfahren stellt ein anspruchsvolles Manöver für Pilotinnen und Piloten dar. Im Forschungsprojekt FARAO werden Assistenz- und Automatisierungssysteme sowie die hierfür notwendigen Technologien entwickelt und in Simulatoren getestet. Neben Kampfflugzeugen werden auch Transportflugzeuge, Hubschrauber und unbemannte Luftfahrzeuge betrachtet.

Die Luft-zu-Luft-Betankung stellt eine essentielle Fähigkeit von Luftstreitkräften dar, um ihrem Anspruch gerecht zu werden, in kurzer Zeit über große Distanzen Wirkung erzielen zu können. Hierbei wird bei Verwendung des Probe-and-Drogue-Verfahrens eine Luftbetankungssonde des Empfängerflugzeuges durch die Besatzung manuell in einen Betankungskorb geflogen, welcher über einen Schlauch vom Tanker geschleppt wird. Dieses Verfahren ist sehr trainingsintensiv und stellt eine hohe Anforderung an die Konzentration der Besatzungen. Daher ist das Ziel des Forschungsprojekts Future Air-to-Air Refueling Augmented, Assisted and Automated Operations (FARAO), Unterstützungs-, Assistenz- und Automatisierungssysteme zu entwickeln, welche die Arbeitsbelastung der Besatzung reduzieren und die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Kopplung erhöhen. Angesichts der weiter zunehmenden Bedeutung unbemannter Systeme in den Luftstreitkräften wird darüber hinaus die Technologie zur Vollautomatisierung der Luftbetankung in Zukunft unverzichtbar sein.

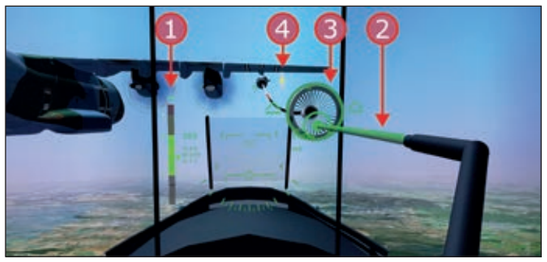


Abb. 1: Funktionen eines Assistenzsystems in Mixed-Reality-Ansicht: (1) OS-Scale; (2) Pointer; (3) Korbhologramm mit Status und Trendanzeigen; (4) AR Pod Lights

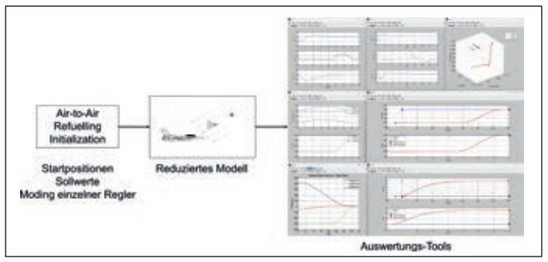


Abb. 2: Aufbau einer Entwicklungsumgebung für Teil- und Vollautomatisierungssysteme in der Luftbetankung

Zunächst wurden in diesem Projekt wichtige Beiträge zur Weiterentwicklung der Luftbetankungssimulation im DLR erarbeitet. Dies betrifft unter anderem die Implementierung von Fehlerfällen des Betankungssystems, eine umfassende Verbesserung der Hubschraubersimulation und eine 3D-Visualisierung von Schlauch und Betankungssonde mittels der Mixed-Reality-Brille HoloLens zur Verbesserung der Tiefenwahrnehmung.

Anschließend konnten unterschiedliche visuelle Assistenzsysteme entworfen, mit den Operateuren der Plattformen im Rahmen von Workshops diskutiert, optimiert und schließlich die vielversprechendsten Varianten implementiert werden. Die technische Basis bildet auch hier eine Mixed-Reality-Brille, mit der abhängig von der Phase des Betankungsvorgangs die relevanten Informationen schnell erfassbar werden können. Dadurch können zum einen Pilotinnen und Piloten eine hohe Situational Awareness erreichen, zum anderen besteht nicht mehr die Notwendigkeit, auf die internen Anzeigen im Cockpit zu blicken. Beispielhaft ist eine Darstellung der Assistenz in der Phase „Kontakt herstellen“ in Abbildung 1 zu sehen.

Um eine strukturierte Entwicklung von Teil- und Vollautomatisierungssystemen zu ermöglichen, wurden in diesem Themenfeld zunächst die relevanten NATO-Standards studiert und ein Missionssteuerungssystem sowie eine vereinfachte Entwicklungsumgebung aufgebaut (Abb. 2). Beides bildete die Basis der weiteren Arbeiten. Anschließend wurden umfassende Regelungskonzepte, notwendige Sensoren und Sensormodelle erstellt, um die technische Machbarkeit unterschiedlicher Lösungen schnell bewerten zu können. Der nächste Schritt war das Untersuchen und Optimieren der Annäherungsverfahren, auch unter Berücksichtigung von Mindestabständen, wie in Abbildung 3 dargestellt.

Im Bereich der Basistechnologien für die Automatisierung konnte nachgewiesen werden, dass ein KI-Modell, welches mit synthetischen Daten aus einer virtuellen Umgebung trainiert wurde, in der Lage ist, anschließend auf realen Fotos von Luftbetankungssituationen den Betankungskorb zu identifizieren sowie dessen Position zu erkennen (Abb. 4). Weiterhin wird in einem Ansatz zur Heranführung von zu betankenden Plattformen an einen Tanker und zur relativen Positionsbestimmung beider Luftfahrzeuge die Einrüstung eines GLASS (GLS approaches based on SBAS)-Systems in einen A400M der Luftwaffe untersucht. Dieses System nutzt sogenannte SBAS-Satellitensignale um einen GLS (GBAS Landing System)-Gleitpfad hinter dem Tanker auszustrahlen, welcher anschließend von allen GLS-fähigen Luftfahrzeugen aufgefasst werden kann (Abb. 5).

Besonders hervorzuheben ist im Projekt FARAO die direkte Zusammenarbeit mit dem Bedarfsträger Bundeswehr und den Pilotinnen und Piloten der einzelnen Plattformen. Dadurch können Konzepte schnell iteriert und die Forschung auf die Anforderungen der Truppe ausgerichtet werden.

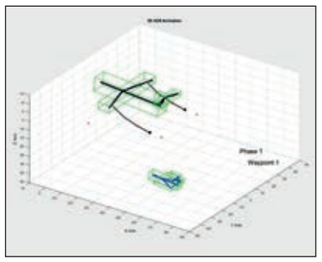


Abb. 3: Untersuchung von Annäherungsverfahren mit Kollisionsboxen

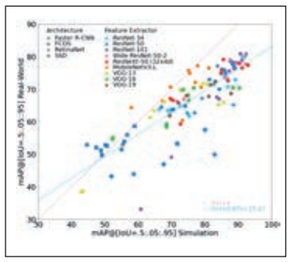


Abb. 4: Eine Bewertung von 144 Trainingsmodellen zeigt gute Ergebnisse zur Korberkennung in der realen Welt nach synthetischem Training



Abb. 5: Geplante Einrüstung einer GLASS (GLS approaches based on SBAS)-Station in einen A400M

Dipl.-Ing. David Freiknecht
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung
Trauen

pd-s@dlr.de

OTTER-Mission - Optische Verkehrsüberwachung für den Responsive Space

Der geopolitische Wandel fordert in der Forschung zu Weltraumtechnologien rasche Anpassungsfähigkeit. Die einst am Boden liegenden Primärziele der Kleinsatellitenmission OTTER verschieben sich somit in den Orbit: Mit Abschluss der Forschung an Responsive-Space-Fähigkeitslücken im Satellitenentwicklungsprozess kann nach erfolgtem Launch mit der Generierung eines maritimen Lagebilds begonnen werden.

Das Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung (RSC³) des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) führt im engen Austausch mit Industrie, Nutzer und Forschungseinrichtungen ein Nanosatellitenprojekt, genannt OTTER (Optical Traffic Tracking for Responsive Space), durch. Nanosatelliten, insbesondere sogenannte CubeSats, sind annähernd mit der Größe eines Schuhkartons vergleichbar und wiegen unter 10kg. Aufgrund ihres standardisierten Formfaktors sind sie oftmals kostengünstiger und schneller herzustellen sowie in den Orbit zu verbringen als tonnenschwere Satelliten.

Die OTTER-Mission setzte sich 2022 zum Ziel, eine Marktabfrage unter Satellitenherstellern durchzuführen zur reaktionsschnellen Bereitstellung von Nanosatelliten, die mit einem AIS-Receiver und einer Kamera als Nutzlast mittels Verifizierung der Position von Schiffen per AIS und optischer Bildaufnahme zum maritimen Lagebild beitragen sollen.

Der Hauptfokus der Mission lag zu Beginn auf der Analyse und Bewertung eines beschleunigten Satellitenentwicklungsprozesses. So war es bei der initialen Beauftragung der Industrie Voraussetzung, dass das RSC³ die Entwicklungsschritte bei dem Industriepartner in Form von Workshops begleiten konnte und etwaige Fähigkeitslücken sowie Verbesserungs- bzw. Beschleunigungspotential analysieren durfte. Der angestrebte Zeitraum von 6 Monaten bis zum Launch konnte aus regulatorischen, technischen und Ressourcen-Gründen nicht erreicht werden. Die zwei größten Verzögerungsfaktoren lagen in den Verschiebungen des Mitflugs auf der geplanten Rakete und technischen Herausforderungen. Die zahlreichen gewonnen Erkenntnisse während der Entwicklung fanden erfolgreich Anwendung bei der Erstbefähigung des RSC³ und im Aufbau eigener Forschungsinfrastruktur.

Während dieser Verzögerungen bis 2025 änderte sich durch die geopolitische Lage die Erwartungshaltung an die Mission: Die Fähigkeit des Satelliten, zum maritimen Lagebild beizutragen, rückte gegenüber dem Lernen aus der Entwicklung in den Vordergrund. So wanderte die Gewichtung der Zielsetzung der OTTER Mission vom Boden in Richtung Orbit und Betrieb. Umso wichtiger wurden klare Betriebsprozeduren und durchgetestete, funktionierende Hardware sowie ein eingespieltes Betriebsteam. Weniger erprobte Hardware, wie das Ultrahochfrequenz (UHF)-Radio, wurde gegen Hardware mit höherem Technology Readiness Level (TRL) ausgetauscht und aufwendige System Validation Tests durchgeführt, um die Ausfallwahrscheinlichkeit im Orbit zu verringern. Auch der Raketenstart wurde vom geplanten Startup (zu diesem Zeitpunkt noch nicht orbital geflogen) zu SpaceX gewechselt, um höchstmögliche Erfolgschancen zu gewährleisten. Der Launch Ende 2025 war erfolgreich und die Kommissionierung des OTTER-Satelliten im 500 km-sonnensynchronen Orbit hat begonnen.

Im Rahmen der deutschen Teilnahme an einer multinationalen F&T-Studie soll OTTER seinen Beitrag zur Datenfusionierung aus mehreren Datenquellen und mit denen weiterer Nationen leisten. Gemeinsame Zielsetzung ist die Entwicklung und Generierung eines unabhängigen maritimen Lagebildes für eine künftige operationelle Nutzung auf Basis der multinational erprobten Erkenntnisse.

Der OTTER-Betrieb erfordert daher sowohl eigene präzise Lage- und Orbitinformationen, die Verarbeitung der empfangenen kooperativen AIS-Schiffsinformationen als auch deren Kombination mit den Daten der Sensorik für die optische Erdbeobachtung. Neben der maritimen Lageerfassung hat die OTTER-Mission zum Ziel, einen Nachweis über die Verwendbarkeit eines cloudbasierten Missionskontrollsystems zu erbringen. Dabei soll das im RSC³ entwickelte Konzept zum dezentralen Satellitenbetrieb im Rahmen von Übungen auch im internationalen Rahmen erprobt und OTTER echtzeitnah und ortsunabhängig kommandiert werden können.

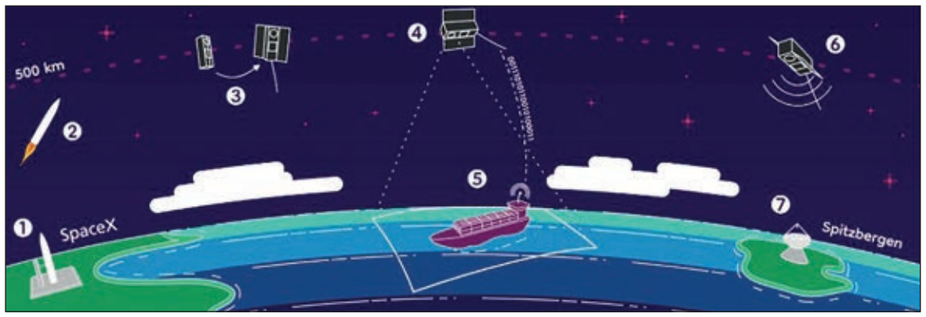


Abb. 1: Die OTTER-Mission: (1) Launch mit Space X, (2) Verbringung und Auswurf auf 500km-Orbit, (3) Ausklappen der Solarpaneele, Antennen und des Magnetometers. Es folgen Aufnahmen von Schiffen und deren Signalen (4,5) und der Downlink der Daten an die Bodenstation, sowie Upload der nächsten Kommandos (6,7)



Abb. 2: Launch der Falcon9-Rakete mit dem OTTER an Board im November 2025 (Quelle: SpaceX)

Dr. Andreas Specker
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Lukas Freudenmann
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Maik Fröchtenicht
Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52)
Schneizlreuth

wtd52posteingang@bundeswehr.org

KI-basierte Tarnbewertung mit ABACUS

Der massenhafte Einsatz von unbemannten Luft- und Bodenfahrzeugen (UxV) mit KI-gestützter Sensordatenauswertung im Gefechtsfeld führt zu einer dauerhaften Beobachterpräsenz. Dies beschleunigt den Sensor-to-Shooter-Zyklus und erhöht den Druck, Tarnung und Täuschung ständig zu verbessern. Das Fraunhofer IOSB erforscht dafür KI-Verfahren zur Analyse der Tarnqualität und der Entdeckungswahrscheinlichkeit und bietet mit ABACUS einen einsatzfähigen Demonstrator.

Die rasanten Fortschritte bei UxV-Technologie und Künstlicher Intelligenz (KI) bringen völlig neue Herausforderungen für Tarnung, Signaturmanagement und Täuschung mit sich. Im Ukraine-Krieg zeigt sich, dass zahlreiche UxVs mit bildgebender Sensorik für Angriff und Aufklärung eingesetzt werden. In Kombination mit leistungsfähigen KI-Algorithmen entsteht so eine dauerhafte Beobachtung in einem bisher nie dagewesenen Ausmaß. Daraus resultieren erhebliche Risiken für das Verbergen von Soldatinnen und Soldaten, Fahrzeugen und Stellungen.

Moderne KI-Verfahren zur Objekterkennung sind vielfach frei verfügbar und einfach anwendbar. Sie können eine weitgehend automatisierte Aufklärung und Enttarnung unterstützen. Diese Systeme sind sehr leistungsfähig und können selbst stark getarnte Objekte aus großer Entfernung zuverlässig erkennen (Abb. 1). Deshalb spielen die Entwicklung von Gegenmaßnahmen sowie die Überprüfung der eigenen Tarnmaßnahmen gegenüber KI-gestützter Aufklärung eine essenzielle Rolle.



Abb. 1: Obwohl die Person mit einem Ghillie-Suit getarnt ist, wird sie von der KI zuverlässig erkannt (vergrößerter Ausschnitt)

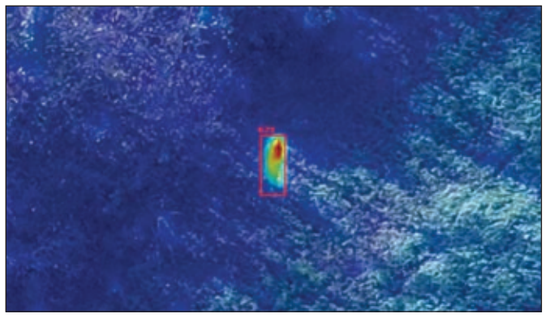


Abb. 2: Farben zeigen, welche Bildbereiche für die KI-Erkennung einer Person in 60 m Entfernung wichtig sind: Rot markiert entscheidende Bereiche, Blau unwichtige. Vor allem Kopf und Schultern sind für die KI sichtbar und sollten deshalb getarnt werden

Das Fraunhofer IOSB erforscht hierzu in Zusammenarbeit mit der WTD 52 KI-basierte Verfahren für die Tarnbewertung. Dafür werden moderne KI-Modelle für die Objekterkennung mit militärischen Bilddaten trainiert und mit sogenannten Erklärbarkeitsverfahren kombiniert. Die Objekterkennung übernimmt dabei die automatische Aufklärung und ermöglicht eine Einschätzung der Tarnqualität. Die eingesetzten Erklärbarkeitsverfahren zeigen, welche Bereiche eines Objekts (z. B. Extremitäten bei Personen, Laufwerk und Bewaffnung bei gepanzerten Kettenfahrzeugen) besonders zur Entdeckung beigetragen haben und für die KI besonders „auffällig“ sind (Abb. 2). Dadurch lässt sich sowohl die entfernungsabhängige Entdeckungswahrscheinlichkeit durch KI-Verfahren abschätzen als auch ableiten, wie Tarnmaßnahmen gezielt verbessert werden können.

Um die KI-Modelle und die Tarnbewertung einfach nutzbar zu machen, wurde mit der ABACUS-Software ein Demonstrator entwickelt (Abb. 3). ABACUS ermöglicht das Laden entsprechender Bilddaten, die Bewertung der Tarnqualität mit verschiedenen KI-Verfahren sowie die detaillierte Analyse der Bildbereiche, die für eine Entdeckung ausschlaggebend sind. Die Möglichkeit, in ABACUS Tarnungen direkt zu simulieren, erlaubt einen schnellen und interaktiven Prozess, um verschiedene Optimierungsmaßnahmen zu testen, ohne sie real umsetzen zu müssen.

Ergebnisse aus komplementären Forschungsprojekten zum Verhalten von Tarnmaßnahmen im Kontext der KI deuten auf eine signifikante Bedrohung („Enttarnung“) durch UxV-getragene Sensoren mit KI-basierter Bildanalyse hin. Bei Feldmesskampagnen konnte so beispielsweise gezeigt werden, dass gepanzerte Fahrzeuge auch aus großen Distanzen sicher durch ABACUS der korrekten Klasse zugeordnet werden konnten (Abb. 4).

ABACUS bietet eine effiziente, weniger subjektive Alternative zu den klassischen Beobachterversuchen zur Bewertung der Tarngüte eines Objekts. Außerdem lassen die Erklärbarkeitskarten in ABACUS direkte Rückschlüsse auf Bildbereiche eines Objekts zu, welche hinsichtlich der Tarnung optimiert werden müssen. Dieser Prozess wird umso wichtiger, da KI-Modelle eine äußerst präzise Erkennung auch von getarnten Objekten in großen Entfernungen ermöglichen. Abbildung 5 zeigt hierzu an einem Beispiel die Sicherheit eines KI-Modells in ABACUS, welches eine nicht getarnte und eine getarnte Person erkennt. Die Tarneigenschaften der Bekleidung der getarnten Person zeigen erst ab ca. 110 m Entfernung vom Sensor einen messbaren Vorteil.

Aktuell wird die Tarnbewertung um eine tarnspezifische Umgebungsbewertung erweitert. Ziel ist es, insbesondere aus von UxV aufgenommenen Bildern der Umgebung abzuschätzen, welche Geländebereiche sich gut oder weniger gut für eine Tarnung eignen. Dadurch ist bereits im Voraus eine fundierte Einschätzung möglich, welche Areale sich für Stellungen oder Bewegungen anbieten und so einen möglichst hohen Schutz vor Entdeckung gewähren. Umgekehrt kann diese Fähigkeit auch dafür genutzt werden, Bereiche zu identifizieren, die ein Gegner vorzugsweise für die eigene Tarnung nutzen würde.



Abb. 3: Benutzeroberfläche der ABACUS-Software für die KI-basierte Tarnbewertung



Abb. 4: Fehlerfreie Zuordnung zweier gepanzerter Fahrzeuge durch ABACUS in einer UAV-Aufnahme (stark vergrößerter Ausschnitt). Das Vertrauen des KI-Modells in seine Vorhersage ist mit 100 % äußerst hoch

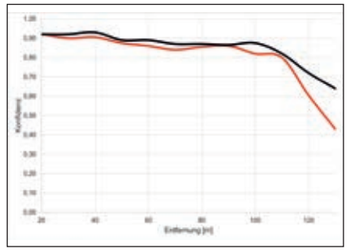


Abb. 5: Darstellung der Modell-Konfidenz (y-Achse) gegenüber der Entfernung (in Metern, x-Achse) bei der Tarnbewertung einer nicht getarnten Person (schwarze Linie) und einer Person mit Tarnbekleidung (rote Linie).

Luis Oberthür
Universität der Bundeswehr München
Institut für Strahlantriebe
München

isa@unibw.de

Dr.-Ing. Marcel Stößel
Universität der Bundeswehr München
Institut für Strahlantriebe
München

isa@unibw.de

Auswirkungen der geometrischen Dimensionierung auf die instationäre Aerodynamik von stark konturierten Luftfahrzeuglufteinlässen

Für Luftfahrzeuge mit hoch integrierten Antriebsanlagen beeinflusst die Einlaufaerodynamik das Betriebsverhalten des Verdichtersystems eines Flugzeugtriebwerks maßgeblich. Die vorliegende Skalierungsstudie untersucht, ob kleiner skalierte Experimente die instationäre Einlaufaerodynamik größerer Testkörper abbilden können, was zu Zeit- und Kosteneinsparungen in der Forschung und Entwicklung führt.

Die Verwendung von gekrümmten Triebwerkseinläufen ist eine notwendige Maßnahme, um die Low-Observability-Eigenschaften eines Luftfahrzeuges zu sichern. Grund dafür ist, dass durch eine S-förmige Kontur des Lufteinlasses der direkte Blick auf die vorderste Verdichterstufe eines Triebwerks verblockt ist, was die Reflexion von Radarwellen am Verdichter stark vermindert. Allerdings entstehen in solchen gekrümmten Einlaufkanälen auch sekundäre Strömungsphänomene wie Wirbel oder Rückströmungsgebiete, in denen die Strömung nicht mehr der Einlaufgeometrie folgen kann. Solche Zonen gestörter Strömung beeinflussen das Betriebsverhalten und die Effizienz des Verdichters des stromabliegenden Triebwerks negativ und begrenzen die Flugbereiche, in denen ein stabiler Betrieb des Antriebs möglich ist. Solche stark gekrümmten Einläufe sind am Institut für Strahlantriebe (ISA) an der Universität der Bundeswehr München wesentlicher Bestandteil numerischer und experimenteller Forschung. Dafür wurde eine eigene, stark gekrümmte, kompakte Einlaufgeometrie namens Military Engine Inlet Research Duct (MEIRD) entworfen, um an diesem eine Vielzahl an Untersuchungen durchzuführen. Der MEIRD wurde

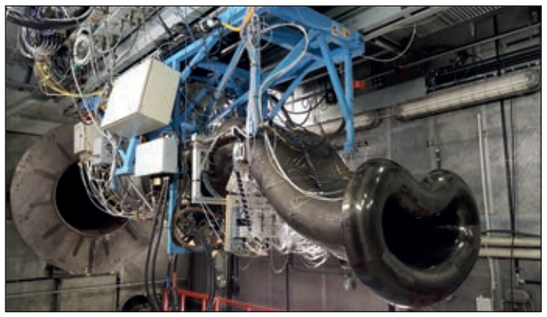


Abb. 1: Versuchsaufbau MEIRD in Realgröße

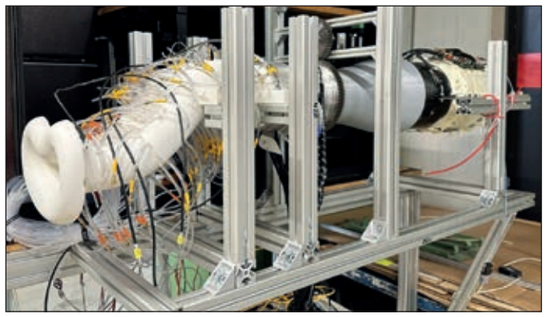


Abb. 2: Versuchsaufbau MediMEIRD mit einem Auslassdurchmesser von 120 mm

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dragan Kožulović
Universität der Bundeswehr München
Institut für Strahlantriebe
München

isa@unibw.de

TRDir Michael Krummenauer
Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät der Bundeswehr (WTD 61)
Manching

WTD61AntriebFuT@Bundeswehr.org

in erster Linie für die Verwendung in der Triebwerksversuchsanlage des ISA vorgesehen. Dabei wird er in Verbindung mit einem Triebwerk des Typen Larzac 04 C5 erforscht, das im Alpha Jet Verwendung gefunden hat. Solche Tests mit einem Triebwerk in Realgröße sind mit hohem Zeitaufwand und Kosten verbunden, weswegen Prüfstände mit kleineren, skalierten Versionen des MEIRD konzeptioniert wurden. Bei Untersuchung des zeitgemittelten Verhaltens wurde festgestellt, dass dieses mit Hilfe der kleinen Kopien gut abgebildet werden kann, was zu einer großen Zeit- und Ressourcenersparnis führt. Die Wirbel und Ablösungen, welche in einem S-förmigen Einlauf entstehen, führen allerdings zu starken zeitlichen Schwankungen in der Zuströmung zum Verdichter. Diese Schwankungen können die Strömungsstabilität im Verdichter gefährden, auch wenn in zeitlich gemittelter Betrachtung keine Auffälligkeiten vorliegen. Das hier vorgestellte Experiment vergleicht drei verschiedene Versuchsreihen mit dem MEIRD in verschiedenen Größen. Neben dem MEIRD in voller Größe in Abbildung 1, kommen zwei skalierte Versionen, MediMEIRD und MiniMEIRD, mit verkleinerten Auslassdurchmessern von 120 mm und 60 mm zum Einsatz (Abb. 2 und 3). Ziel ist es herauszufinden, ob das instationäre Verhalten der Einlaufaerodynamik in allen drei Größen des MEIRD Ähnlichkeiten aufweist.

Die drei Versuchsträger werden dafür mit Hochfrequenzdruckaufnehmern an vier geometrisch ähnlichen Stellen instrumentiert, die Abbildung 4 entnommen werden können. Für alle drei Größen werden nun Triebwerksläufe mit ähnlichen Strömungsgeschwindigkeiten, gemessen am Eintritt des jeweiligen Einlaufs, durchgeführt. Anschließend werden die aufgenommenen Signale mithilfe einer Fast-Fourier-Transformation auf ihren Frequenzgehalt der gemessenen Druckschwankungen hin verglichen und die Signale der verschiedenen Messaufnehmer werden auf die Kohärenz untereinander untersucht. Aus der resultierenden Kreuzleistungsdichte kann ein Phasenversatz zwischen den verschiedenen Messstellen berechnet werden, welcher dabei hilft die räumliche und zeitliche Ausbreitung von Druckschwankungen innerhalb des Einlaufkanals zu charakterisieren. Obwohl der grundlegende Aufbau der Spektralverteilung in der Frequenzanalyse sich zwischen MEIRD und den skalierten Modellen unterscheidet, konnte für jede Größe ein charakteristisches Strömungsphänomen identifiziert werden, das sich vom hinteren Ende des Einlaufs nach vorne ausbreitet. Die zugehörige Frequenz ändert sich mit der Größe der Einlaufgeometrie. Eine genauere Charakterisierung dieses Phänomens und die Bestimmung von Einflussfaktoren auf die Änderung der Frequenz bei Skalierung sind Bestandteil von geplanten Untersuchungen.

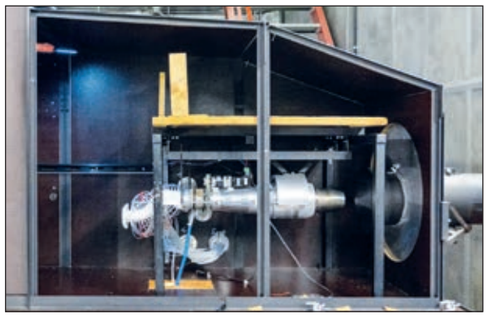


Abb. 3: Versuchsaufbau MiniMEIRD mit einem Auslassdurchmesser von 60 mm

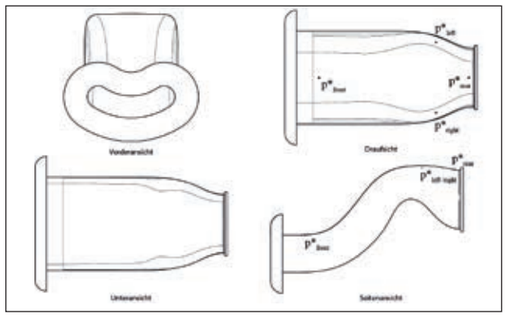


Abb. 4: MEIRD-Geometrie mit Position der Hochfrequenzdruckaufnehmer

Dr. Arne Stoltenberg
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)
Kiel

WTD71620@bundeswehr.org

Messung des akustischen Zielmaßes von Unterwasserobjekten an skalierten Modellen

Die wesentliche Größe für die Ortbarkeit von Unterwasserobjekten mittels Aktivsonaren ist deren akustisches Zielmaß. Das Zielmaß beschreibt die spektrale und richtungsabhängige Schallreflektivität eines Unterwasserkörpers. Um das Zielmaß von mittelgroßen Objekten unter Wasser bestimmen zu können, wurde der Zielmaßmessplatz der WTD 71 im Großen Plöner See ertüchtigt und zur Vermessung erster definierter Ziele genutzt.

Die spektrale und richtungsabhängige Charakteristik des Zielmaßes eines Unterwasserkörpers bildet seine individuelle Signatur, mit der er von Sonaren erfasst und klassifiziert werden kann. Daher ist die Kenntnis des eigenen und des gegnerischen Zielmaßes essenziell. Das Zielmaß wird ermittelt, indem das Objekt mit einem bekannten Schallsignal bestrahlt und die zurückgeworfene Schallintensität erfasst und analysiert wird.

Um das Zielmaß von Körpern mittlerer Baugröße (1 – 5 m Länge) bestimmen zu können, wurde an der Messstelle der WTD 71 im Großen Plöner See ein Zielmaß-Messplatz realisiert und im Rahmen des internationalen TESSMEx-Projektes (Target Echo Strength Scaled Model Experiments) zur Messung definierter Objekte genutzt. Teilnehmende Nationen sind NL, UK, CAN, AUS und DEU. Die Ziele basieren auf den Rechenmodellen der internationalen Workshopserie zur Berechnung von Zielmaßen BeTSSi I, II und IIb und wurden als skalierte physikalische Modelle im Maßstab 1:10 realisiert. Die Zielmaße der Modelle „M32“ und „M32T“ (truncated = verkürzt) wurden vermessen, mit den Ergebnissen der eigenen numerischen Modellierungen verglichen und beides als deutscher Beitrag dem TESSMEx-Projekt zur Verfügung gestellt.

Der in Abbildung 1 dargestellte Messplatz bietet eine Ausbreitungsstrecke zwischen dem im See auf Stelzen stehenden Messhaus und einem im Wasser verankerten Prahm in 220 m Entfernung. Ein Vorteil dieser großen Entfernung ist die Vergleichbarkeit zu den im Einsatz vorkommenden Gegebenheiten eines flachen Meeres, die ein einfacherer, kompakter Versuchsaufbau (etwa in einem Wassertank) nicht bieten kann.

Die Wassertiefe beträgt am Messplatz zwischen 12 und 18 m, das Ziel muss in der halben Wassertiefe unter dem Prahm aufgehängt werden. Damit ist eine maximale vertikale Schallstrahlbreite von wenigen Metern vorgegeben, auf die die Schallenergie fokussiert werden muss. Daraus ergibt sich eine minimale wirksame Länge des Schallwandlers von etwa 3 m zur notwendigen Nebenkeulenunterdrückung in der Zielentfernung.

Durch das Umschalten zwischen Sende- und Empfangsbetrieb des Schallwandlers kann diese vorteilhafte Strahlfokussierung auch im Empfang genutzt werden. Dadurch werden Umgebungsgeräusche und Reflexionen vom Prahm, der Wasseroberfläche oder dem Boden weiter unterdrückt.

Es wurde das TESSMEx-Ziel „M32“ (Abb. 2) in halber Wassertiefean den Prahm aufgehängt und kontrolliert gedreht. Dabei wandte es stets wechselnde Aspekte seiner Reflektivität dem Sonarkopf zu und konnte so über eine volle Umdrehung im Aspektwinkel abgetastet werden. Sinnvollerweise ordnet man per Definition bestimmte feste Aspektwinkel den Richtungen des Ziels zu: 0°: Bug (vorn), 90°: Backbordseite (links), 180°: Heck (hinten) und 270°: Steuerbordseite (rechts).

Abbildung 3 zeigt die reflektierte Impulsantwort des M32-Zieles während einer Umdrehung als Reflexion des Sendesignals. Neben der äußeren Hülle sind auch Teile der inneren Strukturen akustisch wirksam und in den Reflexionen deutlich erkennbar, z.B. die fünf Verstärkungsspanten der Hülle bei Aspektwinkel 0°. Aus diesen Impulsantworten kann die spektrale Reflektivität über dem Aspektwinkel als Frequenz-Aspekt-Plot (Abb. 4) ermittelt werden. Dieser erlaubt es, bestimmte Frequenzen den Eigenschaften des Ziels zuzuordnen.

Diese Messungen dienen dem Erkenntnisgewinn und vor allem der Validierung, dem Vergleich (Abb. 5) und der Verbesserung der numerischen Vorhersagemethoden des Zielmaßes. Mit dem neu eingerichteten Zielmaßmessplatz in Plön steht der WTD 71 ein wichtiges Hilfsmittel zur Zielmaßbestimmung von skalierten Modellen und von AUVs/UUVs zur Verfügung.

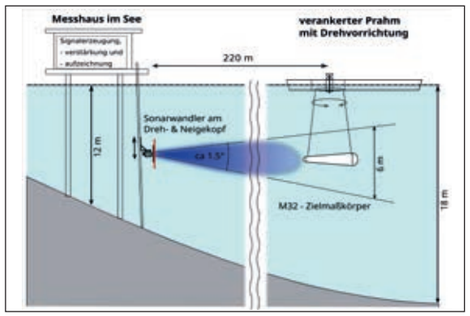


Abb. 1: Der Zielmaßmessplatz in Plön besteht aus dem Messhaus mit dem in Höhe und Ausrichtung einstellbaren Sonarwandler (links) und dem in einer Entfernung von 220 m verankerten Prahm, unter dem der Zielmaßtestkörper drehbar aufgehängt ist (rechts)

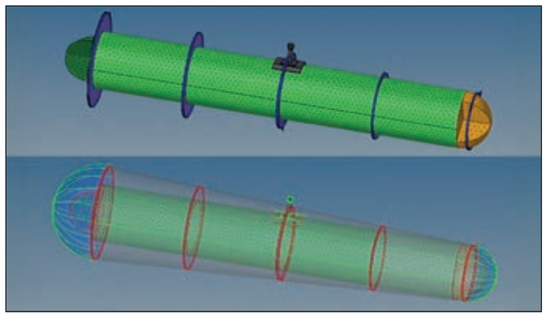


Abb. 2: Der M32-Testkörper besteht aus einem inneren Stahlrohr (10 mm Dicke) mit den abstützenden Spanten (oben) und einer konischen äußeren Hülle (2 mm Stahl, unten) mit halbkugelförmigen Endkappen. Er hat eine Gesamtlänge von 4,9 m und einen maximalen Durchmesser von bis zu 1 m

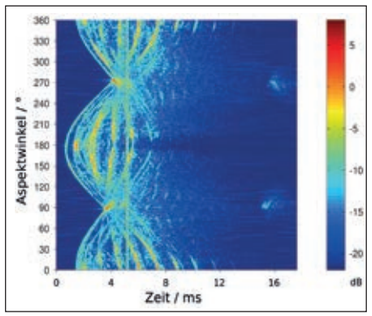


Abb. 3: Die Impulsantwort des Zielmaßtestkörpers M32 hängt stark von dem Aspektwinkel ab und zeigt Reflexionen sämtlicher innerer Strukturen des Testkörpers

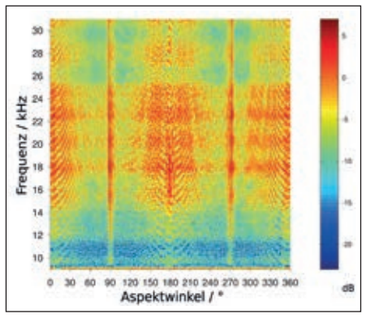


Abb. 4: Aus den reflektierten Signalen kann die Reflektivität als Funktion von Frequenz und Aspektwinkel bestimmt werden (Frequenz-Aspekt-Plot)

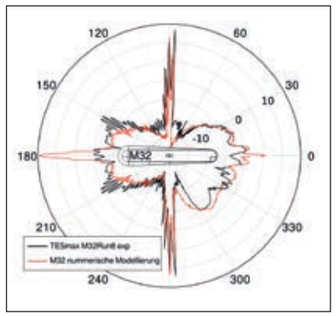


Abb. 5: Im Polarplot des ermittelten Zielmaßes können akustische Effekte den internen Strukturen des M32 im Vergleich mit der nummerischen Modellierung zugeordnet werden

Kai-Uwe Steuer
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik (WTD 81)
Greding

wtd81210@bundeswehr.org

Ralf Pfrogner
Hensoldt AG
Fürstenfeldbruck

info@hensoldt.net

Softwareschwachstellenanalyse

In der Studie „Softwareschwachstellenanalyse“ hat die WTD 81 Geschäftsfeld 210 zusammen mit HENSOLDT nach Werkzeugen und Vorgehensweisen zu Softwareschwachstellenanalyse gesucht. Es wurde ein Labor eingerichtet, in welchem die meisten Arten von Software hinsichtlich ihrer Verwundbarkeit und enthaltenem Schadcode untersucht werden können. Der Fokus lag hierbei auf der praktischen Umsetzbarkeit.

Digitalisierung ist entscheidend für die Zukunftsfähigkeit der Bundeswehr. Die Vernetzung von Systemen, aber auch die mit Software erreichbaren Fähigkeiten (Software Defined Defence, SDD) gewinnen an Bedeutung. Mit zunehmendem Einsatz von Software steigt auch das Risiko durch Cyberangriffe. Fähigkeiten, welche durch Software bereitgestellt werden, können durch einen erfolgreichen Cyberangriff ausfallen, Daten können ausspioniert werden und im Extremfall können Systeme durch Angreifer übernommen werden. Der Schutz der Software vor Angriffen gewinnt somit an Bedeutung.

Die Zielsetzung der Studie „Softwareschwachstellenanalyse“ war es, Werkzeuge und Vorgehensweisen zu identifizieren, welche bei der Suche nach Verwundbarkeiten und Schadsoftware unterstützen. Die Studie wurde im Zeitraum von 2013 bis 2025 durchgeführt und umfasste fünf einzelne Studienmaßnahmen, welche durch die Firma HENSOLDT (ehemals ESG) bearbeitet wurden.

Im Rahmen der Studie wurde das Thema aus den folgenden Blickwinkeln betrachtet:

- Dynamische Analyse
- Statische Analyse von Quellcode
- Statische Analyse von Binärcode

Bei dynamischer Analyse wird die zu untersuchende Software (ganz oder teilweise) ausgeführt. Durch geeignete Werkzeuge wird die Interaktion der Software mit ihrer Umgebung beobachtet. Auch ein Blick in das Innere der untersuchten Software durch einen Debugger oder durch das Abfangen der Interaktion zwischen Programmen oder Systemkomponenten (das sogenannte Hooking, z. B. mittels des Werkzeugs FRIDA) gehören zu den Analysetechniken. In Rahmen der Studie wurde u. a. die Ransomware „Wannacry“ untersucht und die Funktionsweise des Kill-Switches dieser Ransomware nachgewiesen (Abb. 1 und 2). Weiterhin gehört zur dynamischen Analyse das Ausführen von Angriffen gegen die untersuchte Software (sogenanntes Pentesting).

Bei der statischen Analyse wird der Code mit geeigneten Werkzeugen nach Schwachstellen oder Schadcode durchsucht. Die statische Analyse von Quelltext ist deutlich einfacher als die Analyse von Binärcode. Über Werkzeuge wie Fortify™ oder CodeSonar™ lassen sich umfangreiche Quellcodes innerhalb kurzer Zeit automatisch durchsuchen. Die Nutzung von künstlicher Intelligenz bietet enormes Entwicklungspotenzial bei diesen Werkzeugen.

Ein Binärcode ist die durch den Prozessor direkt ausführbare Darstellung eines Programms, z. B. EXE- und DLL-Dateien bei Windows™-Betriebssystemen (Abb. 3). Binärcodeanalyse ist notwendig, wenn der Quelltext einer Software nicht vorliegt, z. B. bei Kaufsoftware oder bei Schadsoftware. Sie ist ebenfalls notwendig für die Suche nach Schwachstellen, welche erst bei der Übersetzung von Quellcode in Binärcode entstehen, z. B. das Überschreiben einer Rücksprungadresse durch Pufferüberläufe. Angreifer können auf diese Weise beliebigen Schadcode zur Ausführung bringen. Moderne Betriebssysteme bieten Schutzmechanismen gegen derartige Angriffe, z. B. Canaries, ASLR (Address Space Layout Randomization) oder DEP (Data Execution Prevention). Diese können jedoch umgangen werden, z. B. durch ROP (Return Oriented Programming).

Für die Analyse von Binärcode werden Werkzeuge wie das von der NSA entwickelte „Ghidra“ verwendet. Im Rahmen der Studie wurde die Binärcodeanalyse unter anderem verwendet, um die Infektionswege von Malware zu verstehen. Durch Kombination von Binärcodeanalyse und dynamischer Analyse wurden Schutzmechanismen von Android-Apps wie Anti-Tampering und Anti-Analyse-Mechanismen umgangen. Auch die Ermittlung von kryptographischen Geheimnissen wurde untersucht.

Entwicklungspotenzial gibt es vor allem im Bereich der Nutzung von künstlicher Intelligenz. Systeme, welche Binärcode vollautomatisch nach Schwachstellen durchsuchen, diese durch Patches beseitigen und sogar Angriffe auf die identifizierten Schwachstellen entwickeln, wurden 2016 bei der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Cyber Grand Challenge gezeigt (Abb. 4). Eines der Systeme (MechaPhish) wurde im Rahmen der Studie funktionsfähig aufgebaut und untersucht.



Abb. 1: Von der Ransomware „Wannacry“ infizierter Laborrechner

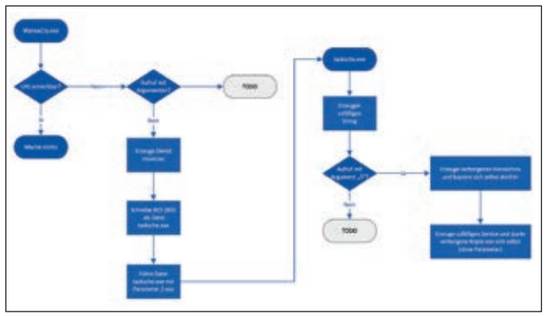


Abb. 2: Erste Schritte des Infektionsweges der Ransomware „Wannacry“

```
                    undefined8 __stdcall main(void)
undefined8            RAX:8          <RETURN>
                    main

00101139 55              PUSH    RBP
0010113a 48 89 e5        MOV     RBP,RSP
0010113d 48 8d 05        LEA     RAX,[s_Hello_World!_00102004]
         c0 0e 00 00
00101144 48 89 c7        MOV     RDI=>s_Hello_World!_00102004,RAX
00101147 e8 e4 fe        CALL    <EXTERNAL>::puts
         ff ff
0010114c b8 00 00        MOV     EAX,0x0
         00 00
00101151 5d              POP     RBP
00101152 c3              RET
```

Abb. 3: Binärcode eines „Hello World“-Programms



Abb. 4: DARPA Cyber Grand Challenge

TORR Daniel Forster
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

Dipl. -Ing. (FH) Thomas Burkhart
MBDA Deutschland GmbH
Schrobenhausen

communications@mbda-systems.de

Laserwaffen im Kontext aktueller Bedrohungen aus der Luft

Laserwaffen sind aufgrund einmaliger Systemeigenschaften eine Schlüsselkomponente für neuartige militärische Bedrohungen, speziell zur wirksamen Bekämpfung von small Unmanned Aircraft Systems (sUAS). An der WTD 91 in Meppen wurde die vollständige Funktionskette von der Zielerfassung bis zum Abschuss von sUAS mit dem von der Firma MBDA Deutschland GmbH entwickelten Laserwaffendemonstrator LWD 2024 erfolgreich getestet.

Auf Grundlage vorangegangener Forschungs- und Technologiearbeiten wurde der von der Firma MBDA Deutschland GmbH entwickelte Laserwaffendemonstrator LWD2024 auf der Lasertestrecke der Wehrtechnischen Dienststelle für Waffen und Munition (WTD 91) in mehreren Feldkampagnen erprobt.

Ziel war insbesondere der Nachweis der durchgängigen Bekämpfungskette – von der Detektion über die zuverlässige, robuste Zielverfolgung bis zum zielpunktgenauen Abschuss von hochagilen Zielen – unter realitätsnahen Bedingungen.

Das System ist modular aufgebaut (Abb. 1) und arbeitet in der aktuellen Konfiguration mit einer Laserleistung im einstelligen Kilowattbereich. Primäres Ziel dieser Ausbaustufe ist der technologische Nachweis der präzisen und stabilen Zielverfolgung als Voraussetzung für eine effektive Bekämpfung (Abb. 2). Die Systemarchitektur ist so ausgelegt, dass leistungsstärkere Laserquellen ohne grundlegende Neuentwicklung integriert werden können, wodurch sich Reichweite und Effektivität deutlich steigern lassen.



Abb. 1: Laserwaffendemonstrator LWD 2024



Abb. 2: Zielverfolgung mit dem LWD 2024

Während der Feldtests konnte gezeigt werden, dass dynamische Ziele in Entfernungen von mehreren Kilometern zuverlässig erfasst und verfolgt werden können (Abb. 3). Grundlage hierfür ist eine spezielle, mehrstufige Trackingkette bestehend aus radarbasierter Erfassung, elektrooptischem Grobtracking sowie aktivem Feintracking. Das aktive Feintracking nutzt einen Hilfslaser zur präzisen, tageslichtunabhängigen Zielbeleuchtung und ermöglicht eine hochstabile Nachführung des Laserstrahls. Durch diese Genauigkeit kann eine ausreichend hohe Energiedichte am Zielpunkt erzielt werden, die für eine schnelle Neutralisation erforderlich ist. Trotz der im Demonstrator bewusst begrenzten Laserleistung wurden Wirkdistanzen von mehr als einem Kilometer nachgewiesen. Der vollständige Funktionsnachweis erfolgte durch mehrere erfolgreiche Bekämpfungen realer Drohnenziele (Abb. 4) in unterschiedlichen Entfernungen und mit wechselnden Flugprofilen.

Der Bekämpfungsprozess folgt dabei einer klar definierten Sequenz: Nach der initialen Zielerfassung mittels Radarsensorik werden Zieldaten an das elektrooptische System im Laserwaffenturm übergeben. Dieses übernimmt das bildbasierte Grobtracking, bevor das aktive Feintracking die hochpräzise Strahlnachführung realisiert. Nach stabiler Zielerfassung wird der exakte Zielpunkt gesetzt und der Laserschuss ausgelöst. Der Bediener bleibt jederzeit in den Wirkprozess eingebunden und kann den Zielpunkt auf dem sUAS, missionsspezifisch festlegen.

Auch während des Beschusses sorgt der robuste Trackingalgorithmus dafür, dass der Laserstrahl exakt auf diesem Punkt gehalten wird, bis das Ziel erfolgreich bekämpft ist.

Dieser Vorgang dauert in der Regel nur wenige Sekunden und ist im räumlich abgesetzten Bedienstand zu beobachten.

Der eigentliche Demonstrator benötigt eine Grundfläche von etwa 2,5 × 2,5 Meter und integriert neben dem Laserwaffenturm sämtliche Subsysteme, einschließlich Energieversorgung und Kühlung. Die Testkampagnen fanden auf der Test- und Versuchseinrichtung für Hochenergielaser (TuVHEL) an der WTD 91 statt, einer umfassend instrumentierten, mehr als zwei Kilometer langen Laserteststrecke (Abb. 5). Die WTD 91 hat hiermit umfangreiche Möglichkeiten, vielfältige Fragestellungen mit praktischem Bezug zur Hochenergielaserstrahlung ämterseitig bewerten zu können sowie operationelle Möglichkeiten und Bedrohungen von Laserwaffen im realen Umfeld zu analysieren.

Diese Versuchsumgebung war entscheidend, um die Erprobungen im vollen Umfang, sicher und unter realistischen Bedingungen durchführen zu können.

Für zukünftige Ausbaustufen ist eine signifikante Erhöhung der Laserleistung vorgesehen. Damit sollen die Wirkreichweite erhöht und die Zielbekämpfungszeit weiter verkürzt werden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf Szenarien mit Angriffswellen oder koordinierten Drohnenschwärmen von hoher operativer Relevanz.



Abb. 3: Beschuss eines Rotors eines sUAS mit dem LWD 2024



Abb. 4: abgeschossene Drohne

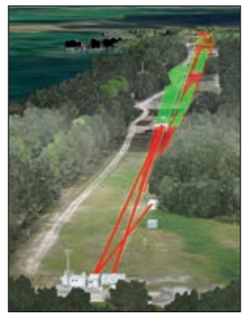


Abb. 5: 3D-Modell der Test- und Versuchseinrichtung für Hochenergielaser (TuVHEL) an der WTD 91 als Planungsgrundlage für Lasererprobungen



3

Wehrmedizinische Forschung und Militärpsychologische Forschung

Anschließend an die Berichte der Vorjahre zeigen auch die Beiträge für das Jahr 2025 das breite Spektrum wehrmedizinischer und militärpsychologischer Forschung zum Schutz und zur Wiederherstellung der Gesundheit der Soldatinnen und Soldaten der Bundeswehr.

So belegen die Beiträge aus den Instituten für den medizinischen ABC-Schutz die Vielfalt der dort bearbeiteten Themen. Das Institut für Radiobiologie der Bundeswehr stellt die Interne Dosimetrie, ihre Messverfahren und Modellierung zur Bewertung nach Strahlenexposition vor, das Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr beschreibt den spezifischen Nachweis von Francisella tularensis mittels Einzelketten-Antikörpern und am Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr wurde ein neuartiges humanes Neuronen-Modell entwickelt, das die Suche nach Antidoten gegen Nervenkampfstoffe beschleunigt.

Das BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz beschreibt ein Verfahren, um schwere Lungenverletzungen nach Thoraxtrauma sicher zu identifizieren und das Bundeswehrkrankenhaus Ulm berichtet über Biomarkersignaturen der Immunantwort nach schwerem Trauma. Die Dermatologie des Bundeswehrkrankenhauses Berlin zeigt, welchen Beitrag moderne Therapiekonzepte zur Behandlung der Schuppenflechte zum Erhalt der Dienstfähigkeit leisten, während der Beitrag des Instituts für Präventivmedizin der Bundeswehr auf Resilienz in Grund- und Basisausbildung als Modell für die Landes- und Bündnisverteidigung fokussiert. Das Psychotraumazentrum der Bundeswehr ergänzt diese Themen durch Forschung zu Auswirkungen von Einsatzbelastungen auf die psychische Fitness von militärischen und polizeilichen Einsatzkräften.

Das Schifffahrtmedizinische Institut der Marine berichtet über eine Studie zum Thema Wachsystemgestaltung, die auf einer Fregatte während ihres UNIFIL-Einsatzes durchgeführt wurde. Ziel war es, die Vor- und Nachteile fester und rotierender Wachzeiten für die Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden der Besatzung zu ermitteln, um Gestaltungsempfehlungen formulieren zu können.

Diese Beiträge stehen exemplarisch für die wichtige Rolle der wehrmedizinischen und militärpsychologischen Forschung für ein einsatzbereite und kriegstüchtige Bundeswehr.

ORR Dr. Christian Siebenwirth
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

OTA PD Dr. Stefan Eder
Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

Interne Dosimetrie: Messung, Modellierung und Bewertung

Der Fachbereich Physikalische Dosimetrie des Instituts für Radiobiologie der Bundeswehr untersucht Verfahren zur Bestimmung und Bewertung interner Strahlenexposition. Durch Kombination von Ganzkörperzählung, Monte-Carlo-Simulationen und biokinetischer Modellierung werden Entscheidungsprozesse im MedABC-Schutz unterstützt. Die Methoden werden durch die Teilnahme an nationalen und internationalen Vergleichen validiert.

Die sicherheitspolitische Lage zeigt eine zunehmende Relevanz nuklearer und radiologischer Bedrohungen. Das Institut für Radiobiologie der Bundeswehr (InstRadBioBw) erforscht und etabliert Verfahren zum Schutz von Einsatzkräften vor und nach Strahlenexpositionen. Neben der externen Strahlenexposition stellt die Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper eine erhebliche Herausforderung dar. Eine belastbare interne Dosimetrie ist wesentliche Voraussetzung für medizinische Behandlungsentscheidungen wie Dekorporationstherapie, für eine Bewertung der Einsatzfähigkeit sowie für weitergehende strahlenschutzfachliche Maßnahmen.

Eine interne Kontamination führt zu komplexen, radionuklid- und organspezifischen Dosisverteilungen. Eine zuverlässige Risikoabschätzung erfordert daher eine Kombination aus Messtechnik, biokinetischer Modellierung und Dosissimulation. Der Fachbereich untersucht zu diesem Zweck Verfahren zur Bestimmung, Modellierung und Bewertung interner Strahlenexpositionen. Ziel ist die Weiterentwicklung wissenschaftlicher Grundlagen und methodischer Ansätze zur Verbesserung der individuellen Dosisrekonstruktion unter einsatznahen Bedingungen.

Bei der Ganzkörperzählung wird die durch inkorporierte radioaktive Stoffe erzeugte Strahlung in einer abgeschirmten Messgeometrie detektiert. Hierzu kommen Gammaspektrometer zum Einsatz, mit denen Gamma-emittierende Radionuklide identifiziert und quantifiziert werden. Über Kalibrationsverfahren lässt sich aus der gemessenen Strahlung die Körperaktivität bestimmen.

Da fest eingerichtete Ganzkörperzähleinrichtungen nur begrenzt verfügbar sind, wird in Zusammenarbeit mit der Taskforce MedA-Schutz ein improvisiertes Messkonzept auf Basis mobiler Gammaspektrometer etabliert (Abb. 1 und 2). Ziel ist es, unter Einsatzbedingungen eine schnelle medizinische Triage von Personen mit und ohne klinisch relevante interne Kontamination zu ermöglichen. Das Verfahren trägt zur schnellen Lageaufklärung in radiologischen Schadenslagen und zur Verbesserung der sanitätsdienstlichen Führungsfähigkeit bei.

Numerische Simulationsverfahren auf Basis von Monte-Carlo-Methoden ermöglichen die Analyse von Abhängigkeiten durch Messgeometrie, Nuklidverteilung und Körperkonstitution (Abb. 3). Die Simulationsmethoden werden durch internationale Vergleichsmessungen validiert. So wird im laufenden EURADOS-Vergleich die institutseigene Methodik anhand von Kinderphantomen auf Ziegel-, Voxel- und Meshbasis geprüft.

Die Körperaktivität inkorporierter Radionuklide verändert sich zeitabhängig durch physikalische Zerfallsprozesse sowie biologische und chemische Transportmechanismen. Für die medizinische Bewertung muss aus gemessenen Aktivitätswerten auf die initial aufgenommene Aktivität zurückgerechnet werden, woraus sich die effektive Folgedosis zur Risikoabschätzung bestimmen lässt. Hierfür werden komplexe biokinetische Modelle und Dosissimulationen benötigt, die von ICRP und EURADOS entwickelt wurden.

Das Institut nutzt aktuelle Empfehlungen und Softwarewerkzeuge wie den OIR Data Viewer (Abb. 4) und CADORmed III (Abb. 5) zur Aktivitäts- und Dosisabschätzung. Der fachgerechte Einsatz wurde durch Teilnahme an Fallbeispielübungen des Bundesamtes für Strahlenschutz sowie am Laborvergleich ICIDOSE#2 demonstriert. Die Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung einsatznaher Bewertungskonzepte ein.

Die Forschungsarbeiten verbessern die Fähigkeit der Bundeswehr, radiologische Gefährdungen für Einsatzkräfte frühzeitig zu erkennen und fundiert zu bewerten. Durch die Kombination aus Messtechnik, Simulation und biokinetischer Modellierung werden medizinische Entscheidungsprozesse sowie die Bewertung der Einsatzfähigkeit bei radiologischen Ereignissen gezielt unterstützt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Verfahren und die Einbindung in nationale und internationale Fachnetzwerke sichern dabei langfristig die wissenschaftliche Expertise und den Fähigkeitsaufbau im medizinischen Strahlenschutz.

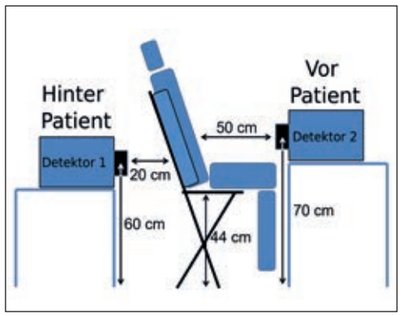


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Ganzkörperzählung mittels mobiler Gammaspektrometer



Abb. 2: Kalibration der Ganzkörperzählung mittels Ziegelphantom

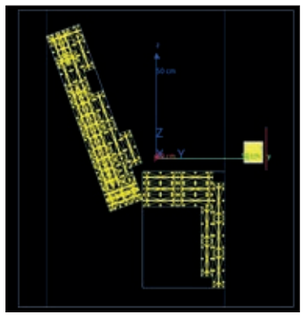


Abb. 3: Simulation der Ganzkörperzählung mittels Ziegelphantom



Abb. 4: Für die interne Dosimetrie von ICRP veröffentlichte Software OIR Data Viewer

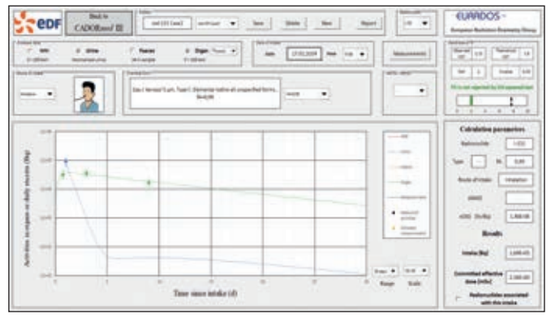


Abb. 5: Für die interne Dosimetrie von EURADOS entwickelte Software CADORmed III

Oberstabsarzt Jan Klaas Janßen
Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org

Nachweis und Isolierung von *Francisella tularensis* mittels spezifischer Bindeproteine

Die Anzahl der Tularämie-Fälle nimmt aktuell in Deutschland wieder stetig zu. Um den direkten und kulturellen Nachweis des Tularämie-Erregers *Francisella tularensis* weiter zu verbessern, wurde ein antikörperbasiertes Reporter-Fusionsprotein entwickelt. Tularämie-Bakterien konnten so erfolgreich mikroskopisch in Patientenproben detektiert und mittels magnetischer Partikel aus Zecken isoliert werden.

Tularämie, auch Hasenpest genannt, ist eine von Tieren oder der Umwelt auf Menschen übertragbare Infektionskrankheit, die durch das gramnegative Bakterium *Francisella (F.) tularensis* hervorgerufen wird. Wichtige Überträger der Tularämie in Europa sind Zecken. Im 20. Jahrhundert wurde *F. tularensis* im Zuge historischer Biowaffenprogramme mehrerer Nationen erforscht und waffenfähig gemacht. Die Zunahme an natürlichen Tularämie-Infektionen, der potentiell schwere bis tödliche Verlauf, die ausgesprochen niedrige minimale Infektionsdosis (von wenigen Dutzend Bakterien) sowie der potentielle Missbrauch des Erregers als biologischer Kampfstoff begründen das militärmedizinische Interesse an der Verbesserung der diagnostischen Fähigkeiten für *F. tularensis*.

Der schnelle, direkte mikroskopische Erregernachweis mittels fluoreszierender Proteine könnte als Ergänzung bestehender Nachweismethoden wichtige erste oder auch bestätigende diagnostische Erkenntnisse liefern. Zu diesem Zweck wurde das Wissen über ein *F. tularensis*-spezifisches Antikörperfragment zur Entwicklung eines neuen Reporter-Fusionproteins (kurz: Reporter) eingesetzt (Abb. 1A). Dieser Reporter bindet an *F. tularensis*-Zellen (Abb. 1B) und ermöglicht gleichzeitig durch eine leuchtende Komponente den Nachweis mittels Fluoreszenzmikroskopie. Der Nachweis ist hochspezifisch, d.h. der Reporter erkennt verwandte Bakterien nicht fälschlicherweise. Das Verfahren kann auch zum diagnostischen Nachweis von *F. tularensis*-Bakterien in Patientenproben wie Sputum, Eiter und Lymphknotengewebe eingesetzt werden (Abb. 2).

Zusätzlich wurde der Reporter an mikroskopisch kleine, magnetische Partikel gebunden. Durch die Beladung der Partikel mit dem Reporter war es möglich, *F. tularensis*-Bakterien aus einer flüssigen Probe spezifisch zu binden und durch das Anlegen eines Magneten einfach anzureichern. So können *F. tularensis*-Bakterien in stark mikrobiologisch verunreinigten Proben von anderen Bakterien getrennt und direkt auf festen Nährmedien kultiviert werden. Diese Art der Isolierung hat den Vorteil der schnellen und einfachen visuellen Identifikation in Frage kommender Bakterienkolonien, und die Kultivierung der anspruchsvollen *F. tularensis*-Bakterien ohne negative Einflüsse durch selektive Antibiotika. Als Umweltproben wurden Zecken untersucht, die zum einen eine hohe Relevanz als mögliche Tularämie-Überträger haben, zum anderen aufgrund der starken Verunreinigung mit anderen Mikroorganismen ein komplexes und anspruchsvolles Probenmaterial darstellen. In München gesammelte Zecken wurden mechanisch aufgetrennt und mittels Polymerase-Kettenreaktion (PCR) auf das Vorliegen von *F. tularensis* Genmaterial untersucht. Aus PCR-positiven Zecken-Proben wurde versucht, mittels der o. g. magnetischen Partikel *F. tularensis*-Bakterien anzureichern und zu kultivieren (Abb. 3).

Über 1000 Zecken wurden im Münchner Stadtgebiet gesammelt. Insgesamt konnten aus elf PCR-positiven Proben neun *F. tularensis*-Isolate nach Anreicherung mittels magnetischer Partikel gewonnen werden, was einer Erfolgsquote von 81% (PCR-positiv zu Kultur-positiv) entspricht (Abb. 4). Dies ist eine wesentliche Verbesserung gegenüber bestehender Isolierungsmethoden. Diese Methode erlaubte außerdem kurz nach Erhalt relevanter Patienteninformationen die Identifikation eines neuen Tularämie-Naturherds im Münchner Umland.

Die Erkennung und Analyse biosicherheitsrelevanter Erreger bleibt eine Kernfähigkeit des InstMikroBioBw. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Anreicherung und Isolation von *F. tularensis* mittels magnetischer Partikel werden nicht nur dazu dienen, B-schutzrelevante Fragestellungen zur Tularämie besser beantworten zu können. Die neu entwickelten Prozeduren können ebenso für die Isolierung anderer militärmedizinisch wichtiger Erreger angepasst werden.

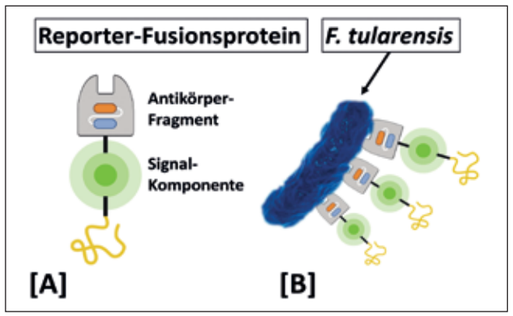


Abb. 1: [A] Reporter-Fusionsprotein (kurz: Reporter), bestehend aus einem *F. tularensis*-spezifischem Antikörper-Fragment und einer Signalkomponente. [B] Das Antikörper-Fragment erlaubt die Bindung an *F. tularensis*-Bakterien, die Signalkomponente den Nachweis durch Fluoreszenzmikroskopie

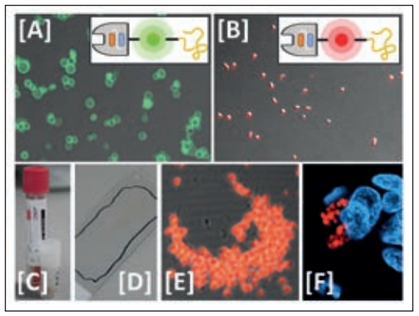


Abb. 2: [A,B] Grün oder rot leuchtende *F. tularensis*-Bakterien nach Bindung durch den Reporter mit grüner bzw. roter Signalkomponente. [C-E] Proben konnten direkt auf Objektträgern mit dem Reporter behandelt und *F. tularensis* (rot) nachgewiesen werden. [F] *F. tularensis* (rot) in Lymphknoten

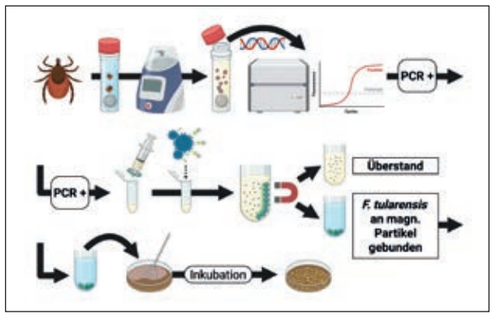


Abb. 3: Schematische Darstellung der Anreicherung von *F. tularensis* mittels Reporter-beladener magnetischer Partikel aus mechanisch lysierten Zecken und kultureller Anzucht direkt auf festen Nährmedien. (Darstellung mit Biorender.com erstellt)

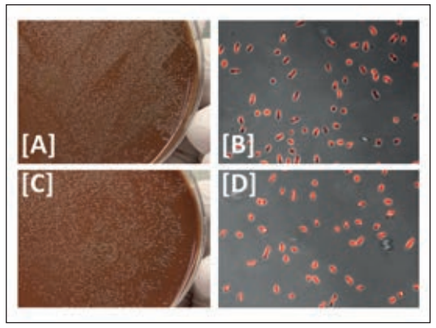


Abb. 4: [A,C] Zwei *F. tularensis*-Kulturisolate auf festen Nährmedien nach Anreicherung aus infizierten Zecken mittels Reporter-beladener magnetischer Partikel. [B,D] Fluoreszenzmikroskopische Bilder der gleichen zwei *F. tularensis*-Isolate nach Bindung durch den rot leuchtenden Reporter

Oberstleutnant d.R. Dr. Simone Rothmiller
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

Oberstleutnant d.R. Prof. Dr. Annette Schmidt
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

Neuartiges humanes Neuronenmodell zur Entwicklung von Antidoten gegen Nervenkampfstoffe

Potenzielle Wirkstoffkandidaten werden als Antidote gegen eine Vergiftung mit Nervenkampfstoffen (NKS) im Rahmen der präklinischen Arzneimittelforschung untersucht und bewertet. Zu diesem Zweck wurde ein humanes Neuronenmodell entwickelt, das Neurotoxizität und Wirkmechanismen des NKS VX realistisch abbildet und zielgerichtete Untersuchungen von Antidoten erlaubt.

Trotz des Verbotes durch das Chemiewaffenübereinkommen, das unter anderem Herstellung, Lagerung und Ausbringung von chemischen Kampfstoffen untersagt, wurden NKS in Konflikten wiederholt eingesetzt. Angesichts zunehmender internationaler Spannungen wächst auch die Bedrohung durch diese Waffen. NKS sind hochtoxisch und können verhältnismäßig einfach ausgebracht werden. Gleichzeitig weisen zugelassene Antidote (z.B. Obidoxim und Atropin) zur Akuttherapie einer Vergiftung Wirkungslücken auf. Zudem sind Langzeitschäden nach einer Exposition gegenüber NKS (z.B. das Absterben von Neuronen) kaum erforscht. Daher ist die Entwicklung effektiverer Gegenmittel erforderlich. Zu diesem Zweck wurde ein neuartiges humanes Neuronenmodell entwickelt, das die menschliche Physiologie abbildet und eine Übertragbarkeit der Testergebnisse auf den Menschen ermöglicht.

Die Neuronen wurden aus humanen induzierten pluripotenten Stammzellen (hiPSCs) generiert, die aus adulten Fibroblasten der Haut re-programmiert wurden. Diese hiPSC sind pluripotente Stammzellen, d.h. sie können sich in jede Zelle des menschlichen Körpers entwickeln. Diese Methode ist ethisch unkritisch, da keine embryonalen Stammzellen verwendet werden, und orientiert sich an natürlichen humanen Entwicklungsprozessen (Abb. 1).

Zunächst wurden die Fibroblasten mit nicht-viralen Plasmiden transfiziert, d.h. ringförmige DNA-Sequenzen wurden zugegeben, die die zur Re-programmierung benötigten Pluripotenzfaktoren enthalten. Durch die Pluripotenzfaktoren wurden die bereits adulten Zellen in ein frühes embryonalähnliches Entwicklungsstadium zurückgeführt und nach 30 Tagen waren die so entstandenen hiPSCs einsatzbereit. Dieser Ansatz vermeidet Infektionsrisiken und eine dauerhafte Integration in die DNA, wodurch Gefahren wie eine Tumorentstehung minimiert werden. Im Folgeschritt wurden durch gezielte Inhibierung eines Signalwegs über 21 Tage neuronale Vorläuferzellen erzeugt. Diese differenzierten sich in 7 Tagen und maturierten über 21 Tage zu reifen Neuronen. Standardisierte Kulturbedingungen und Protokolle gewährleisten hohe Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit, die durch charakteristische neuronale Marker wie ß3-Tubulin und Nestin validiert wurden (Abb. 2).

Um die Eignung des Modells für Antidot-Tests zu prüfen, wurde das Neuronenmodell mit VX exponiert und modellhaft anhand von diesem NKS charakterisiert. Die VX-Vergiftung führte zu einer zeit- und konzentrationsabhängigen Reduktion von Zellwachstum und Neuritenlänge, d.h. der Länge der Zellfortsätze, die für eine Reizweiterleitung von Neuronen verantwortlich sind, sowie zu einer Zunahme von in Form und Struktur veränderten Zellen (Abb. 3). Diese Effekte belegen die Neurotoxizität und den Zelltod neuronaler Zellen nach NKS-Exposition. Zusätzlich zeigte sich eine Hochregulierung von Genen, die mit DNA-Schäden bzw. DNA-Reparatur, Neurotoxizität und Zelltod in Verbindung gebracht werden (Abb. 4). Hohe VX-Konzentrationen induzierten ein Absterben der Neuronen, während niedrige Dosen erste Hinweise auf eine Seneszenz, also ein vorzeitiges Altern der Zellen, lieferten.

Das neuartige humane Neuronenmodell bildete entzündliche Prozesse und den Zelltod nach NKS-Vergiftung zuverlässig ab. Es ermöglichte zudem, neue Erkenntnisse zum Wirkmechanismus von NKS zu gewinnen. Zukünftig soll das Modell zur zielgerichteten Antidot-Entwicklung gegen NKS und vergleichbare Substanzen eingesetzt werden.

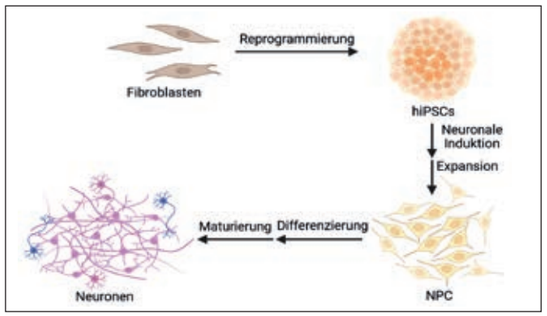


Abb. 1: Etablierung des humanen Neuronenmodells. Dermale Fibroblasten werden zu humanen induzierten pluripotenten Stammzellen (hiPSCs) re-programmiert, aus denen neuronale Vorläuferzellen (NPCs) gewonnen werden, die anschließend zu reifen Neuronen maturieren. (Darstellung mit Biorender.com erstellt – BioRender.com/vgcj048)

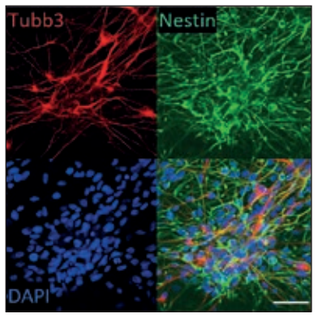


Abb. 2: Die humanen Neuronen exprimieren neuronale Marker wie β3-Tubulin (Tubb3, rot) und Nestin (grün). Die Zellkerne wurden mit DAPI (blau) angefärbt und rechts unten sieht man die Überlagerung aus allen Kanälen. Maßstabsbalken entspricht 50 µm

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

InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

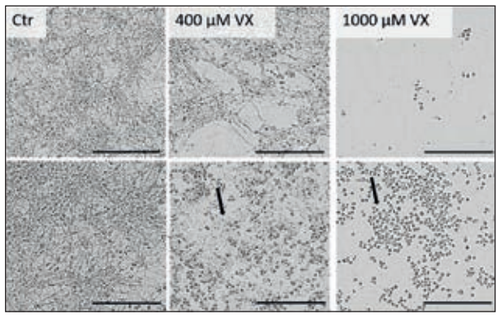


Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahme von Neuronen mit 400 und 1000 µM VX im Vergleich zur Lösungsmittelkontrolle (Ctr). VX führt zu reduzierter Neuritenlänge (oben), morphologischen Veränderungen und Zelltod (unten). Maßstabsbalken entspricht 200 µm

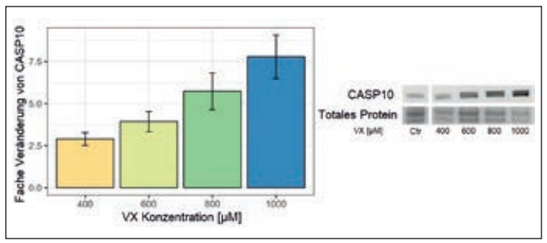


Abb. 4: Konzentrationsabhängige Hochregulierung des Zelltodmarkers Caspase 10 (CASP10) im Vergleich zur Lösungsmittelkontrolle (Ctr)

Oberfeldarzt Prof. Dr. D. Overhoff
BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz
Klinik für diagnostische und interventionelle Radiologie und Neuroradiologie
Koblenz

BwZKKlinikVIII@bundeswehr.org

Flottillenarzt Dr. H. L. Kaatsch
BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz
Klinik für diagnostische und interventionelle Radiologie und Neuroradiologie
Koblenz

BwZKKlinikVIII@bundeswehr.org

Oberstarzt Dr. C. Schreyer
BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz
Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Thoraxchirurgie
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKlinikIIChirurgie@bundeswehr.org

Schwere Lungenverletzungen nach Thoraxtrauma sicher identifizieren – Photon-Counting-CT stärkt die Bildgebung in der Einsatz- und Notfallmedizin

Die sichere Identifikation von schweren Lungenverletzungen nach Thoraxtrauma stellt Radiologen in der konventionellen Computertomographie (CT)-Diagnostik mitunter vor diagnostische Herausforderungen. In einer retrospektiven Studie konnten wir die verbesserte Differenzierbarkeit Trauma-assoziierter Lungenveränderungen mittels photonenzählender CT zeigen und somit den Nutzen für die Notfall- und Einsatzmedizin hervorheben.

Als eine der ersten Institutionen weltweit verfügt die Klinik für Radiologie und Neuroradiologie des BundeswehrZentralkrankenhauses Koblenz über einen fest in der klinischen Routine implementierten photonenzählenden CT (PCCT)-Scanner (Abb. 1). Mit dem Ziel, die Vorteile spektraler CT-Bildgebung für die Notfall- und Einsatzmedizin sowohl zu nutzen als auch zu erforschen, wird dieses Gerät hierbei standardmäßig für die bildgebende Diagnostik im Rahmen der Polytraumaversorgung im hauseigenen Schockraum verwendet.

Einsatztypische Thoraxverletzungsmuster gehen häufig mit Beteiligung der Lunge einher und führen aufgrund von Parenchymeinblutungen (Gewebeeinblutungen) zu einer pathologischen Dichteanhebung von verletzten Lungenarealen. Ein begleitender Trauma-assoziierter Lungenkollaps mit ebenfalls resultierender Dichteanhebung der Lunge ist in der konventionellen CT-Diagnostik bisher schwer zu differenzieren, jedoch von hoher klinischer Relevanz. Eine sichere und verlässliche Identifizierung ist hierbei entscheidend, um frühzeitig das Verletzungsausmaß korrekt einzuschätzen, notwendige therapeutische Maßnahmen einzuleiten sowie mögliche Komplikationen im weiteren klinischen Verlauf zu antizipieren.



Abb. 1: Photonenzählender CT-Scanner im Schockraum der zentralen interdisziplinären Notaufnahme des Bundeswehr-Zentralkrankenhauses Koblenz

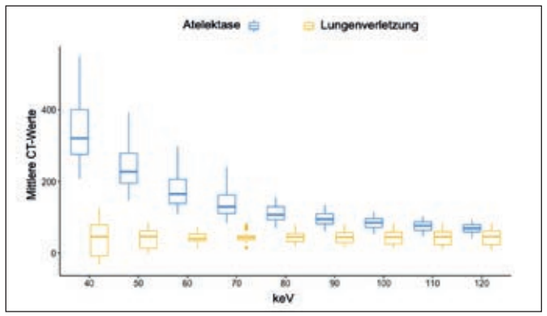


Abb. 2: Boxplots der mittleren CT-Dichtewerte von Lungenkollaps (blau) und Lungenverletzung (gelb) unterschiedlicher Energieniveaus (keV) der virtuell monoenergetischen Rekonstruktionen. Mit Abnahme des Energieniveaus zeigen sich zunehmende Dichteunterschiede zwischen Lungenverletzung und Lungenkollaps

Generalarzt Prof. Dr. R. Schwab
BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz
Kommandeur und Ärztlicher Direktor
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKdr@bundeswehr.org

Oberstarzt PD Dr. S. Waldeck
BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz
Klinik für diagnostische und interventionelle Radiologie und Neuroradiologie
Koblenz

BwZKKlinikVIII@bundeswehr.org

Unter Bündelung der Expertise der Kliniken für Radiologie und Neuroradiologie sowie Allgemein-, Viszeral- und Thoraxchirurgie des BundeswehrZentralkrankenhaus Koblenz wurde daher anhand eines Kollektivs polytraumatisierter Patienten mit Trauma-assoziierten Lungenverdichtungen eine retrospektive Studie durchgeführt. Ziel war es, anhand einer PCCT-spezifischen Rekonstruktionstechnik, sogenannten virtuell monoenergetischen Bildrekonstruktionen (VMIs), die Möglichkeit der sicheren Unterscheidung von verletzten und kollabierten Lungenarealen in der Ganzkörper-PCCT zu untersuchen.

Die Analyse von objektiven Bildparamatern dieser VMIs ergab, dass mit Abnahme des Energieniveaus ein zunehmender Dichteanstieg in kollabiertem Lungengewebe zu verzeichnen war. Die Dichtewerte in verletzten Lungenarealen blieben dagegen unabhängig des Energieniveaus konstant (Abb. 2). Folglich führte dies zu einer Erhöhung des Bildkontrastes in niedrigenergetischen VMIs zwischen beiden Arten von Trauma-assoziierten Lungenveränderungen und lieferte somit die Grundlage für eine sichere und schnelle visuelle Differenzierung. Übereinstimmend zeigte sich zwar die beste subjektive Differenzierbarkeit in den niedrigsten Energieniveaus (40-50 keV), allerdings wurden unter zusätzlicher Berücksichtigung des subjektiven Bildrauschempfindens sowie der Bildqualität in der durch drei Radiologen durchgeführten subjektiven Bildanalyse VMIs bei 60-70 keV bevorzugt (Abb. 3).

Das abweichende Dichteverhalten der Trauma-assoziierten Lungenveränderungen ist auf die unterschiedliche Verteilung von jodhaltigem Kontrastmittel zurückzuführen, welches standardmäßig im Rahmen der Ganzkörper-PCCT-Untersuchung verabreicht wird. Verletztes Lungengewebe wird minder- oder nicht-durchblutet, wohingegen kollabiertes Lungengewebe weiterhin durchströmt wird und somit eine im Vergleich höhere Röntgendichte aufweist. Die Verstärkung des Jodkontrastes in VMIs niedriger Energieniveaus mit folglich verbesserter visueller Differenzierbarkeit stellt hierbei einen wesentlichen Vorteil der PCCT gegenüber der konventionellen CT dar.

Zusammenfassend lässt sich in dieser Studie der Nutzen spektraler Rekonstruktionen der PCCT für die Notfall- und Einsatzmedizin unter Beweis stellen. Erfreulicherweise wurde unser Ansatz im Rahmen des Europäischen Röntgenkongresses (ECR) 2025 in Wien mit dem Preis für die beste Notfallbildgebung ausgezeichnet (Abb. 4).

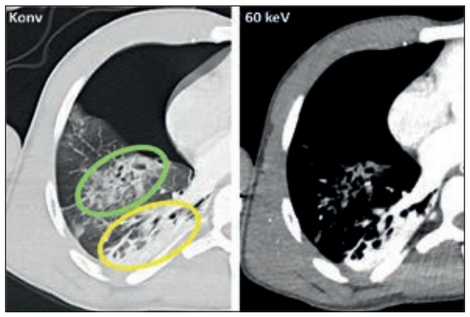


Abb. 3: Trauma-assoziierte Lungenverletzung (grüner Marker) und Lungenkollaps (gelber Marker). Monoenergetische Rekonstruktionen bei 60 keV der Photon-Counting CT Untersuchung weisen im Vergleich zu konventionellen Rekonstruktionen (Konv) eine bessere visuelle Unterscheidbarkeit der Lungenveränderungen auf



Abb. 4: Auszeichnung für die beste Notfallbildgebung im Rahmen des Europäischen Röntgenkongresses 2025

G. Achatz
Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Ulm

BwKrhsUlmOrthopaedieUnfallchirurgie@bundeswehr.org

R. Heller
Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Ulm

BwKrhsUlmOrthopaedieUnfallchirurgie@bundeswehr.org

H. Haase
Technische Universität Berlin
Berlin

sekretariat@lmc.tu-berlin.de

L. Schomburg
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Berlin

https://spz.charite.de/metas/kontakt

Die Immunantwort als Prognose- und Therapiefenster: Cross-Species-Biomarkersignaturen nach schwerem Trauma

Grundlagenforschung identifizierte hochkonservierte – also artübergreifend gleich ablaufende – Immunmechanismen nach schweren Verletzungen. Bestimmte Untergruppen weißer Blutkörperchen, Entzündungsbotenstoffe und Spurenelemente bilden die Basis eines fachübergreifenden Projekts zur Entwicklung frühzeitiger Vorhersagemarker und neuer Behandlungsansätze nach schwerem Trauma.

Grundlagenforschung hat tiefgreifende Einblicke in die Reaktionen des Immunsystems nach schweren Verletzungen erbracht – insbesondere nach einer Querschnittlähmung durch ein Trauma der Wirbelsäule (traumatische Rückenmarksverletzung, TSCI) und nach schwerem Schädel-Hirn-Trauma (TBI). Ein zentraler Befund: Beide Verletzungsarten lösen Abwehrreaktionen aus, die bei Mensch und Tier nach dem gleichen Muster ablaufen. Dieses Ergebnis ermöglicht es, Erkenntnisse aus dem Labor gezielt auf die klinische Behandlung zu übertragen. Bislang fehlt jedoch ein zuverlässiger Blutwert, der frühzeitig vorhersagen kann, ob sich eine Patientin oder ein Patient nach einer solchen Verletzung erholen wird. Genau diese Lücke will der hier vorgestellte Ansatz schließen (Abb. 1).

In einer klinischen Studie wurden über längere Zeit hinweg verschiedene Untergruppen von Monozyten – einer wichtigen Gruppe weißer Blutkörperchen der angeborenen Immunabwehr – sowie Entzündungsbotenstoffe (Zytokine) und Spurenelemente im Blut untersucht. Ziel war es, aus der Kombination vieler Messwerte ein Frühwarnsystem zu

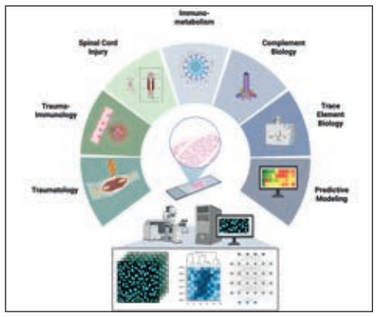


Abb. 1: Forschungsrahmen des fachübergreifenden Projekts: Zusammenspiel von Trauma-Immunologie, Spurenelement- und Komplementforschung sowie computergestützter Bildanalyse und maschinellem Lernen. (Darstellung mit Biorender.com erstellt)

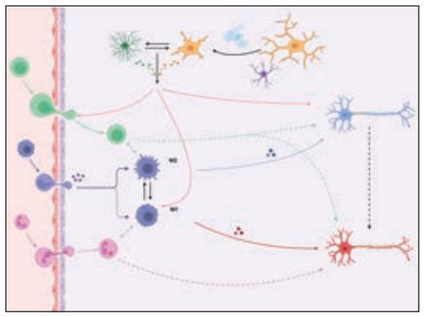


Abb: 2: Immunzellen nach einer Rückenmarksverletzung: Monozyten (weiße Blutkörperchen) wandern in den Verletzungsbereich ein und entwickeln sich entweder zu heilungsfördernden (M2) oder zu nervschädigenden (M1) Fresszellen. Welcher Typ überwiegt, hängt vom jeweiligen Muster der Entzündungsbotenstoffe ab. (Darstellung mit Biorender.com erstellt)

A. Younsi
BG Klinik Ludwigshafen
Ludwigshafen

neurochirurgie@bgu-ludwigshafen.de

B. Biglari
BG Klinik Ludwigshafen
Ludwigshafen

QTO@bgu-ludwigshafen.de

M. Mannes
Universitätsklinikum Ulm
Ulm

kontakt.iti@uniklinik-ulm.de

M. Huber-Lang
Universitätsklinikum Ulm
Ulm

kontakt.iti@uniklinik-ulm.de

entwickeln. Der wichtigste Befund: Eine bestimmte, nur vorübergehend auftretende Untergruppe von Monozyten (fachsprachlich: CD14−/CD16+/IL-10+/CXCR4int) war in den ersten 24 Stunden nach der Verletzung bei Patientinnen und Patienten mit späterer Erholung deutlich häufiger nachweisbar als bei solchen ohne Erholung. Diese Zellen gelten als Vorläufer von Fresszellen (Makrophagen), die am Verletzungsort eine Umgebung schaffen, die die Nervenreparatur fördert (Abb. 2). Da sie sich zuverlässig im Blut nachweisen lassen, sind sie als klinischer Vorhersagemarker besonders attraktiv. Ein Rechenmodell, das mehrere solcher Parameter kombiniert, liefert genauere Prognosen als einzelne Werte, die erst Tage später aussagekräftig werden. Ergänzend zeigte sich, dass die Konzentration von freiem Zink im Blut bereits nach 24 Stunden mit einer Trefferquote von über 83 % zwischen Erholung und Nicht-Erholung unterscheiden kann – ein Hinweis, dass Stoffwechsel- und Immunwerte gemeinsam die Heilungschancen widerspiegeln (Abb. 3 und 4).

In einem begleitenden Tiermodell wurde der Botenstoff IL-4 verabreicht, der die Immunantwort in eine heilungsfördernde Richtung lenkt. Die Tiere zeigten deutlich bessere Bewegungsfähigkeiten; auf Zellebene verschob sich das Gleichgewicht der Fresszellen von einem entzündungsfördernden Typ (M1) hin zu einem regenerationsfördernden Typ (M2). Dass sich dieselben Muster bei Mensch und Tier finden, ist ein starker Hinweis auf artübergreifend erhaltene Mechanismen – und damit auf die Möglichkeit, diese therapeutisch zu nutzen. Ergebnisse aus Tierversuchen lassen sich häufig nicht direkt auf den Menschen übertragen. Unser sogenannter Cross-Species-Ansatz – also der systematische Vergleich zwischen verschiedenen Arten – begegnet diesem Problem, indem er gezielt Mechanismen identifiziert, die bei Mensch und Tier gleichermaßen ablaufen. So wird sichergestellt, dass im Labor entwickelte Biomarker auch beim Menschen biologisch aussagekräftig sind. Dieser Ansatz stärkt zudem die Übertragbarkeit der Ergebnisse und entspricht dem 3R-Prinzip: Replace, Reduce, Refine (Ersetzen, Verringern, Verfeinern von Tierversuchen).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein fachübergreifendes Forschungsprojekt gestartet. Es soll artübergreifend erhaltene Mechanismen nach schweren Verletzungen – darunter die Aktivierung des Komplementsystems (eines Teils der Immunabwehr), Veränderungen im Spurenelementhaushalt und Marker für Nervenzellschäden – als Grundlage für Vorhersagemuster und Therapieziele nutzen, die nach schwerem Trauma bei Soldatinnen und Soldaten eine frühere und gezieltere Versorgung ermöglichen.

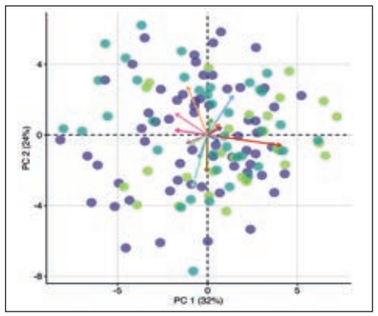


Abb. 3: Statistische Auswertung der Monozyten-Untergruppen: Eine bestimmte Zellgruppe (Cluster 1, roter Pfeil) erklärt den größten Unterschied zwischen Patientengruppen und ist der stärkste Vorhersagefaktor für eine neurologische Erholung nach Querschnittlähmung

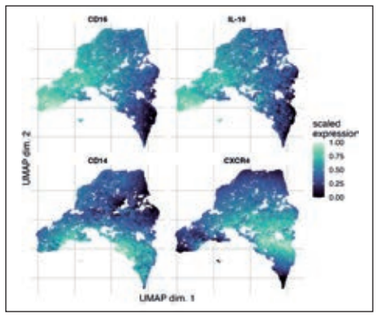


Abb. 4: Darstellung der Monozyten-Untergruppen nach Querschnittlähmung mittels UMAP-Verfahren (einer Methode zur übersichtlichen Darstellung hochdimensionaler Daten). Cluster 1 zeigt das charakteristische Muster heilungsfördernder Vorläuferzellen

Flottillenarzt Dr. med. Atakan Jordan, M.Sc.
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Klinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie
Berlin

DermatologieBerlin@bundeswehr.org

Oberstarzt PD Dr. med. Staffan Vandersee, M.A.
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Klinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie
Berlin

DermatologieBerlin@bundeswehr.org

Erhalt der Dienstfähigkeit durch moderne Dermatologie: Eine Versorgungsforschungsstudie zur Schuppenflechte

In einer retrospektiven Studie am Bundeswehrkrankenhaus Berlin wurde der Einsatz moderner Psoriasis-Therapien untersucht. Im Vergleich zu konventionellen Therapien zeigen moderne Systemtherapien eine überlegene Wirksamkeit, bessere Sicherheitsprofile und höhere Patiententreue. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer wehrdermatologischen Versorgung für den Erhalt der Dienstfähigkeit.

Die Schuppenflechte, auch als Psoriasis bekannt, ist eine chronisch-entzündliche Systemerkrankung mit primär dermatologischer Akzentuierung (Abb. 1). Über die sichtbaren Hautveränderungen hinaus ist die Erkrankung mit systemischen Begleiterkrankungen assoziiert. Neben der Gelenkbeteiligung besteht eine Vergesellschaftung mit dem metabolischen Syndrom, welches Adipositas, Bluthochdruck und einen gestörten Glukosestoffwechsel umfasst. Zudem ist ein erhöhtes Risiko für kardiovaskuläre Ereignisse klinisch belegt. Diese systemische Belastung kann ohne eine effektive Therapie die allgemeine Gesundheit sowie die militärische Dienstfähigkeit von Soldatinnen und Soldaten beeinträchtigen. Besonders im Hinblick auf die funktionale Integrität der Haut ist eine unversehrte Hautfunktion essenziell, um die uneingeschränkte Tragfähigkeit von Uniform und Gefechtsbekleidung unter Belastung zu gewährleisten (Abb. 2). Eine frühzeitige, fachärztliche Intervention ist daher für den nachhaltigen Gesundheitserhalt von großer Bedeutung.

Neben der lokalen Behandlung mit Cremes und Salben sowie der UV-Therapie beschränkte sich das therapeutische Arsenal über Jahrzehnte auf konventionelle Systemtherapien. Wirkstoffe wie Methotrexat oder Ciclosporin, die dabei zum Einsatz kommen, greifen breit in das Immunsystem ein. Diese klassischen Immunsuppressiva sind zwar wirksam, bringen jedoch ein beträchtliches Spektrum an Nebenwirkungen mit sich, das regelmäßige, engmaschige Laborkontrollen erfordert. Dieses Therapiemonitoring ist eine Anforderung, die insbesondere in Auslandseinsätzen oder bei längeren Übungsvorhaben schwer zu erfüllen ist.

Ein wesentliches Defizit dieser Behandlungsmöglichkeiten ist zudem, dass eine vollständige oder nahezu vollständige Erscheinungsfreiheit der Haut nur in den seltensten Fällen erreicht wurde.

Ein entscheidender Wendepunkt in der dermatologischen Versorgung wurde mit der Einführung der Biologika, also biotechnisch hergestellter Medikamente, eingeleitet (Abb. 3). Den Beginn markierten die sogenannten TNF-alpha-Inhibitoren, die erstmals eine deutlich gezieltere und stärkere Verbesserung des Hautzustandes ermöglichten. In den letzten Jahren hat sich die therapeutische Landschaft durch die Entwicklung hochspezifischer Interleukin-Inhibitoren (wie IL-17, IL-23 und IL-12/23) nochmals fundamental gewandelt. Diese modernen Medikamente greifen präzise in die Entzündungskaskade ein, ohne das Immunsystem breit einzuschränken. Dies führt nicht nur zu einer überlegenen Wirksamkeit bis hin zur kompletten Abheilung der Haut- und Gelenkbeschwerden, sondern auch zu einem deutlich verbesserten Sicherheitsprofil und einer vereinfachten Handhabung im militärischen Alltag.

Die Überlegenheit dieser modernen Systemtherapien wurde durch eine retrospektive Studie am Bundeswehrkrankenhaus Berlin wissenschaftlich evaluiert. Im Rahmen der Untersuchung wurden Daten von 77 Soldatinnen und Soldaten ausgewertet, die in der Klinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie des Bundeswehrkrankenhauses Berlin behandelt wurden (Abb. 4). Der direkte Vergleich zwischen modernen und konventionellen Systemtherapien bestätigt die klinischen Vorteile: Unter dem Einsatz moderner Interleukin-Inhibitoren stiegen sowohl die Effektivität der Behandlung als auch die Therapietreue signifikant an. Ein wesentlicher Aspekt war dabei die hohe Sicherheit der eingesetzten Medikamente, da unter der Therapie mit modernen Biologika keine schwerwiegenden Nebenwirkungen verzeichnet wurden. Diese Ergebnisse belegen, dass eine spezialisierte dermatologische Versorgung innerhalb der Bundeswehr entscheidend für die Gesunderhaltung von Soldatinnen und Soldaten ist. Durch den frühzeitigen Zugang zu innovativen Systemtherapien kann die Dienstfähigkeit nachhaltig gesichert werden.



Abb. 1: KI-generiertes Bild eines Soldaten mit Schuppenflechte an der typischen Lokalisation der Armstreckseiten



Abb. 2: KI-generiertes Bild eines Soldaten mit einer Kopfhautpsoriasis



Abb. 3: KI-generiertes Bild eines beispielhaften Applikationspens für ein Biologikum

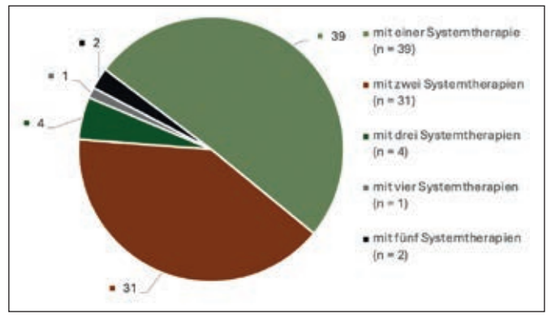


Abb. 4: Verteilung der Patientinnen und Patienten (n = 77) in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Systemtherapien (n = 127)

Dr. Kristina Küper
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedBwA3@bundeswehr.org

Dr. Alexander Witzki
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedBwA3@bundeswehr.org

Stefanie Grünewald
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedBwA3@bundeswehr.org

Resilienz in der Grund- und Basisausbildung als Modell für die Landes- und Bundesverteidigung

Die Grund- bzw. Basisausbildung legt das Fundament für den Umgang mit den Anforderungen und Belastungen des Soldatenberufs. Somit ist sie das ideale Modell, um militärisch relevante Resilienzfaktoren zu untersuchen. Das dargestellte Forschungsprojekt soll Einflussfaktoren auf Stressempfinden, Gesundheitsempfinden und militärische Leistung identifizieren und deren praktische Relevanz einschätzen.

Der Soldatenberuf ist von besonderen Anforderungen und Belastungen geprägt, die so in keinem zivilen Beruf vorkommen. Insbesondere Einsatz- und Gefechtssituationen sind nicht nur mit extremen körperlichen Anforderungen, sondern auch mit enormen psychischen Belastungen verbunden, die ein hohes Maß an individueller Resilienz erfordern.

Der Grundstein für den Umgang mit diesen besonderen beruflichen Herausforderungen wird in der militärischen Grund- bzw. Basisausbildung gelegt (Abb. 1). Entsprechend ist es nicht verwunderlich, dass Rekrutinnen und Rekruten diese erste Ausbildungszeit als psychisch belastend empfinden (Abb. 2) und dass mehr als 20 % von ihnen bereits innerhalb der ersten sechs Ausbildungsmonate wieder aus der Bundeswehr ausscheiden.

Es liegt nahe, dass diejenigen Soldatinnen und Soldaten, welche den Ausbildungsstress besser kompensieren können, über Eigenschaften, Überzeugungen oder Verhaltensmuster verfügen, die sie auch die Belastungen ihres späteren Dienstalltags besser bewältigen lassen. Die Grund- bzw. Basisausbildung ist somit der ideale Zeitraum, um individuelle Resilienzfaktoren zu identifizieren, die auch langfristig mit der Einsatzfähigkeit und Gesundheit von Soldatinnen und Soldaten zusammenhängen.

Vor diesem Hintergrund führt das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr in Kooperation mit dem Heer und unterstützt durch die Professur für Arbeits-, Organisations- und Wirtschaftspsychologie der Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr ein präventivmedizinisch ausgerichtetes Forschungsprojekt in der Grund- bzw. Basisausbildung durch: Anhand von standardisierten Befragungen von Rekrutinnen und Rekruten sowie von Zug- und Gruppenführenden in den Ausbildungseinheiten sollen individuelle Resilienzfaktoren identifiziert werden, die sich positiv auf das Stress- und Gesundheitsempfinden sowie die militärische Leistungsfähigkeit während der ersten Ausbildungsphase auswirken (Abb. 3). Aus den Studienergebnissen sollen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die zur Förderung dieser individuellen Resilienzfaktoren bzw. zum Abbau potentiell vorhandener Defizite hinsichtlich dieser genutzt werden können. So sollen gesundheitliche und psychische Beeinträchtigungen innerhalb der ersten Ausbildungsphase minimiert und Eigenschaften und Verhaltensmuster gestärkt werden, die sich auch langfristig positiv auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Soldatinnen und Soldaten auswirken. Solche Maßnahmen haben zudem das Potential, zur Verringerung der Abbrecherquote beizutragen.

Erste Ergebnisse einer Pilotuntersuchung von 135 männlichen Rekruten in der bis 2024 dreimonatigen Grundausbildung deuten auf Resilienz, Achtsamkeit und Selbstwirksamkeitserwartung als relevante Einflussfaktoren hin: Rekruten mit einer höheren Ausprägung dieser drei Ressourcen berichten über signifikant weniger Stress am Ende der Ausbildung und schätzen auch ihre militärische Leistungsfähigkeit höher ein. Explorative Analysen zeigen eine positive Entwicklung von Selbstwirksamkeit im Ausbildungsverlauf, die für Resilienz und Achtsamkeit nicht nachgewiesen werden konnte. Dementsprechend sollten Förderungsmaßnahmen auf diese Ressourcen fokussiert werden (Abb. 4).

Die Ausbildung von Rekrutinnen und Rekruten im Heer wurde zwischenzeitlich neu konzipiert und auf sechs Monate verlängert. Inwieweit die Erkenntnisse der Pilotuntersuchung auch für diese neue verlängerte Basisausbildung Bestand haben, untersucht das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr zurzeit an drei Ausbildungsstandorten.



Abb. 1: Am ersten Tag der Grund-/Basisausbildung treten die neuen Rekrutinnen und Rekruten noch in ziviler Kleidung an



Abb. 2: Die Rekrutinnen und Rekruten werden während der Grund-/Basisausbildung mit vielen Belastungen konfrontiert



Abb. 3: Studiendesign mit den Hypothesen zu den Auswirkungen von Einflussfaktoren (links) auf Stress-, Gesundheitsempfinden und militärische Leistung (rechts)



Abb. 4: Im Verlauf der Grund-/Basisausbildung erlernen die Rekrutinnen und Rekruten die grundlegenden militärischen Fertigkeiten

Sarah Schramm
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedBwA2@bundeswehr.org

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

InstPraevMedBwLeiterin@bundeswehr.org

RDir Dr. Ulrich Wesemann
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

Lt. z.S. Finja Marten
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

Postshooting-Parallelen bei problematischem Ärger von Militär und Polizei: Wie sich unterschiedliche Einsätze auf die Psyche von Einsatzkräften niederschlagen

Die CASH-Studie (Calamities, Anxiety, Stress, Hostility) des Psychotraumazentrums untersucht die Auswirkungen traumatischer Ereignisse bei zivilen (Abb. 1 und 2) und militärischen Einsatzkräften (Abb. 3). Sowohl in der militärischen und als auch in der zivilen Stichprobe gehen Ereignisse mit Schusswaffengebrauch bzw. bevorstehendem Schusswaffengebrauch mit einer signifikant erhöhten Wahrscheinlichkeit für die Entwicklung von chronifiziertem, problematischem Ärger einher.

Ziel des CASH-Projekts ist die Optimierung der Einsatzvorbereitung und Einsatznachsorge bei Einsatzkräften. Hierzu wird eine Vielzahl vorsätzlich sowie nicht vorsätzlich herbeigeführter Ereignisse unterschiedlicher Dauer in die Untersuchung einbezogen. Neben verschiedenen Berufsgruppen der beteiligten Einsatzkräfte wird auch eine Vergleichsgruppe untersucht. Zusätzlich zu den psychischen Folgen werden zahlreiche weitere Variablen erhoben, um ein möglichst umfassendes Bild der Belastungsfaktoren und ihrer Auswirkungen zu gewinnen. Das Projekt ist bis Dezember 2027 angelegt; bis dahin werden weitere Follow-up-Daten erhoben.

Erste Auswertungen zeigen, dass die während des Ereignisses dominierende Emotion einen maßgeblichen Einfluss auf den weiteren Verlauf der psychischen Reaktionen der Einsatzkräfte hat. Dabei unterscheiden sich die emotionalen Reaktionsmuster zwischen verschiedenen Berufsgruppen in Abhängigkeit von der jeweiligen Ereignisart. Ob diese Emotionen innerhalb eines angemessenen Zeitraums wieder abklingen oder sich langfristig manifestieren, hängt neben ihrer Intensität während des Ereignisses von weiteren Einflussfaktoren ab. Während eine adäquate Einsatzvorbereitung sowie die



Abb. 1: Breitscheidplatz nach dem Terroranschlag. (Quelle: PTZ/Fotograf: Frank Eggen)



Abb. 2: Beisetzung nach der Messerattacke in Mannheim. (Quelle: Stabsstelle Öffentlichkeitsarbeit Polizei Mannheim)

HptFw Charlyn Braun
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

OTA Dr. Gerd Willmund
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

Teilnahme an konventionellen Kriseninterventionsmaßnahmen präventiv wirken können, erwiesen sich die Übernahme von Aufgaben außerhalb des eigenen beruflichen Kompetenzbereichs, emotionale Vernachlässigung in der Kindheit sowie geringe soziale Unterstützung als Risikofaktoren für eine ungünstige Verarbeitung.

Sowohl bei militärischen als auch bei polizeilichen Einsatzkräften zeigt sich ein erhöhtes Maß problematischen Ärgers, wenn sich Einsatzkräfte selbst oder andere mit Waffengewalt verteidigen mussten. Dabei spielt es eine untergeordnete Rolle, ob die Dienstwaffe tatsächlich eingesetzt wurde oder ein Einsatz unmittelbar bevorstand. Da der Gebrauch einer Dienstwaffe ein gewisses Maß an aggressiver Handlungsbereitschaft voraussetzt, wird diese Emotion als Primäremotion während des Ereignisses betrachtet. Diese Befunde beziehen sich unter anderem auf Einsätze im Rahmen der Evakuierung aus Afghanistan, auf den Terroranschlag am Berliner Breitscheidplatz, auf eine 34-stündige Geiselnahme mit intensivem Schusswechsel sowie auf den Amoklauf in Hamburg und die Messerattacke auf einen Polizeibeamten am Mannheimer Marktplatz.

Bei nicht vorsätzlich verursachten Ereignissen wie der Flutkatastrophe im Ahrtal, dem Zugunglück nahe Biberach oder größeren Verkehrsunfällen zeigten sich diese Unterschiede hingegen nicht. Auch bei vorsätzlich herbeigeführten Ereignissen, bei denen vom Täter zum Zeitpunkt des Einsatzes keine unmittelbare Gefahr mehr ausging – etwa bei den Amokfahrten in Trier und Berlin –, ließen sich keine entsprechenden Effekte nachweisen. Diese Befunde legen nahe, dass insbesondere das wahrgenommene Bedrohungspotenzial während des Einsatzes ein zentraler Faktor für die Ausprägung problematischen Ärgers ist.

Die systematische Analyse und Aufbereitung solcher Einsätze trägt dazu bei, Einsatzvorbereitung und Einsatznachsorge weiter zu verbessern. Ziel ist es, Einsatzkräfte künftig noch besser auf Kriege, Krisen und Katastrophen vorzubereiten und gleichzeitig negative psychische Folgen für Einsatzkräfte und Zivilbevölkerung zu reduzieren. Ein Folgeprojekt zur gezielten Reduktion problematischen Ärgers bei Einsatzkräften ist bereits bewilligt. Aufgrund des hohen Erkenntnisgewinns wird nach Abschluss des Projekts eine europäische Erweiterung des CASH-Projekts angestrebt. Vor dem Hintergrund möglicher zukünftiger Szenarien der Landes- und Bündnisverteidigung sollen die gewonnenen Erkenntnisse insbesondere für die Weiterentwicklung der Einsatznachsorge sowie der psychosozialen Notfallversorgung für Einsatzkräfte (PSNV/E) und für Betroffene sowie den Bevölkerungsschutz (PSNV/B) nutzbar gemacht werden.



Abb. 3: Schutzbedürftige aus Afghanistan werden während der Evakuierungsoperation nach ihrer Ankunft in Taschkent/Usbekistan aus dem Airbus A400M geleitet. (Quelle: Bundeswehr/Marc Tessensohn)

RDir Dr. Stefan Röttger
Schifffahrtmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

schiffmedinstm@bundeswehr.org

ORR'in PD Dr. Johanna Abendroth
Schifffahrtmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

schiffmedinstm@bundeswehr.org

KptLt Theresa Kohn
Schifffahrtmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

schiffmedinstm@bundeswehr.org

Auswirkungen rotierender und fester Arbeitszeiten im Wachbetrieb an Bord

Da bisher empirische Daten zur Beurteilung der Wirkung von dauerhafter Nachtarbeit in der Gestaltung von Wachsystemen fehlen, wurden in einer Studie die Auswirkungen von rotierenden und festen Arbeitszeiten auf die Leistungsfähigkeit, das objektive wie subjektive Wohlbefinden und den Schlaf von Besatzungsangehörigen an Bord der Fregatte BRANDENBURG während ihres UNIFIL-Einsatzes ermittelt.

Der Großteil einer Schiffsbesatzung ist in Wachen eingeteilt, die sich im Betrieb des Schiffes abwechseln und deren Arbeits- und Ruhezeiten in einem Wachsystem festgelegt sind. Da auch in der Nacht gearbeitet werden muss, wenn der menschliche Organismus auf Schlaf und Regeneration eingestellt ist, stört die Arbeit in Wachen die natürliche zirkadiane Rhythmik. Dies kann Wohlbefinden, Leistungs- und Regenerationsfähigkeit der Wachhabenden einschränken. Die Gestaltung von Wachsystemen soll diese Störungen so weit wie möglich reduzieren – allerdings ist noch nicht vollständig bekannt, wie das am besten gelingen kann.

Eine offene Frage in diesem Zusammenhang betrifft den Umgang mit kontinuierlicher Nachtarbeit. Studien zu Nachtarbeit an Land kommen zu dem Schluss, dass sich kontinuierliche Nachtarbeit bei den meisten Menschen negativ auf Schlaf, Wohlbefinden und Gesundheit auswirkt und sich nur wenige Menschen auf Dauer an Nachtarbeit gewöhnen können. Daher werden rotierende Arbeitszeiten empfohlen, in denen sich Nacht-, Früh- und Spätdienste abwechseln. Aber auch ständige Wechsel von Arbeits- und Ruhezeiten stören



Abb. 1: Die Fregatte BRANDENBURG im UNIFIL-Einsatz



Abb. 2: Studienteilnehmer mit Aktigraph am Handgelenk

den natürlichen Schlaf-Wach-Rhythmus und werden daher in der Literatur zur Wachsystemgestaltung für Schiffe überwiegend kritisch bewertet. Stattdessen werden hier feste Arbeitszeiten empfohlen. Empirische Studien, die die Auswirkungen fester und rotierender Arbeitszeiten auf die Besatzung eines Schiffes direkt vergleichen, gibt es bisher nicht.

Das Schifffahrtmedizinische Institut der Marine hat daher an Bord der Fregatte BRANDENBURG (Abb. 1) die Auswirkungen fester und rotierender Arbeitszeiten auf 49 Besatzungsangehörige während ihres UNIFIL-Einsatzes untersucht. Dafür wurden fünf Seefahrten begleitet. Während der ersten und der letzten Seefahrt arbeitete die Besatzung im gewohnten Dreiwachsystem mit täglich wechselnden Arbeitszeiten, so dass die Besatzungsangehörigen alle drei Tage einer Nachtwache zugeteilt waren. In den übrigen drei Seefahrten wurde ein Wachsystem mit festen Arbeitszeiten genutzt, wobei jeweils eine Wachsektion während einer Seefahrt dauerhaft die Nachtwache übernahm.

Die Studienteilnehmenden trugen einen Aktigraphen zur Aufzeichnung ihrer Körperbewegungen, aus denen sich das Schlafverhalten ableiten lässt (Abb. 2). Zudem gaben sie täglich zum Wachwechsel ihre subjektive Müdigkeit an und führten eine Vigilanzaufgabe zur Leistungsmessung durch, bei der die Studienteilnehmenden so schnell wie möglich auf plötzlich auftretende Signale reagieren sollten. Am Beginn und am Ende jeder Seefahrt gaben sie ferner Speichelproben ab, deren Cortisolgehalt als Indikator für Stress ermittelt wurde.

Günstig wirkte sich das feste Wachsystem auf den Schlaf aus: Bei täglich gleichen Arbeits- und Ruhezeiten lagen die Studienteilnehmenden nach dem Einschlafen weniger lange wach als im rotierenden Wachsystem (Abb. 3).

Im festen Wachsystem war jedoch die Müdigkeit bei den Besatzungsangehörigen, die die Nachtwache hatten, im Vergleich zu allen anderen Besatzungsangehörigen erhöht. Diese Wache hatten auch eine höhere Cortisolkonzentration im Speichel als die anderen Wachen. Hier zeigte sich eine erhöhte akute Belastung durch dauerhafte Nachtarbeit.

Im rotierenden Wachsystem waren die Studienteilnehmenden gleichermaßen müde, unabhängig von der konkreten Arbeitszeit eines Tages. Die Leistung in der Vigilanzaufgabe fiel hier besser aus als im festen Wachsystem. Sowohl die mittlere Reaktionszeit als auch die 10% langsamsten Reaktionszeiten – ein Indikator für Momente der Unaufmerksamkeit – waren hier schneller (Abbildung 4).

Entgegen der Literatur ist das hier untersuchte rotierende Dreiwachsystem sogar vorteilhaft, wenn schlechteres Durchschlafen durch ausreichend Zeit zum Schlafen kompensiert werden kann, wie es während dieser Studie möglich war. Wenn Schlafgelegenheiten knapp sind und möglichst effizient genutzt werden müssen, sind hingegen feste Wachzeiten die bessere Wahl.

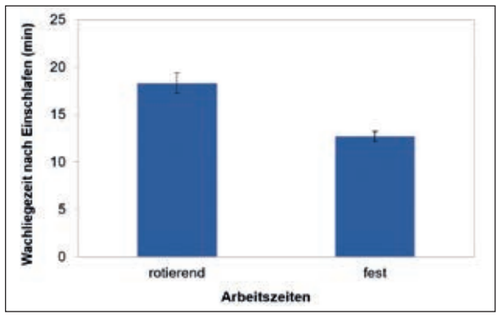


Abb. 3: Bei rotierenden Arbeitszeiten lagen die Studienteilnehmer nach dem Einschlafen länger wach

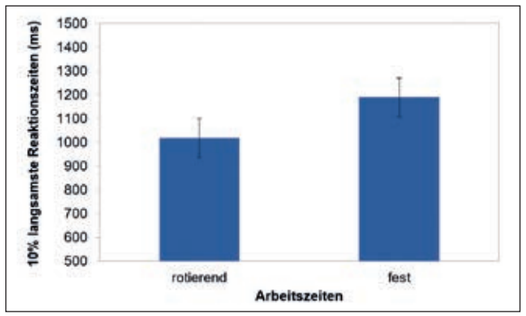


Abb. 4: Unaufmerksame Momente im Vigilanztest waren im rotierenden Wachsystem kürzer



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 Sammlungsverbund der Bundeswehr zuständig.

Oberstleutnant Dr. Christian Stachelbeck
Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr

ZMSBwPressestelle@bundeswehr.org

Hauptmann Dr. Pierre Köckert
Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr

ZMSBwPressestelle@bundeswehr.org

Deutsches Militär im kolonialen Einsatz 1880–1918. Ein Kontinuum der Gewalt

Das Projekt untersucht das deutsche Militär im kolonialen Einsatz zwischen 1880 und 1918 als staatlichen Gewaltakteur. Im Mittelpunkt steht militärische Gewaltpraxis als Mittel kolonialer Ordnung und Herrschaft. Das reicht von Kampfhandlungen bis zu Maßnahmen der Kontrolle und Durchsetzung zwischen militärischen, polizeilichen und administrativen Aufgaben.

Der europäische Kolonialismus war in weiten Teilen nur durch den Einsatz militärisch organisierter Gewalt durchsetzbar. Auch das deutsche Militär trat in den Kolonien des Kaiserreichs nicht allein als kämpfende Truppe, sondern als zentraler exekutiver Gewaltakteur auf. Militärische Einsätze dienten der Durchsetzung kolonialer Herrschaft, der Sicherung politischer, wirtschaftlicher und administrativer Interessen sowie der alltäglichen Aufrechterhaltung kolonialer Ordnung. Militärisches Handeln bewegte sich dabei häufig in Übergangszonen zwischen Krieg und Frieden, zwischen Militär- und Polizeiaufgaben sowie zwischen offener Gewaltanwendung und deren bloßer Androhung.

Das Projekt analysiert diese Einsatzpraxis in ihrer gesamten Bandbreite. Ausgangspunkt ist ein weitgefasster Einsatzbegriff, der militärisches Handeln als Erfüllung eines staatlichen Auftrags versteht und nicht auf den klassischen Gefechtseinsatz beschränkt ist. In kolonialen Kontexten umfasste militärischer Einsatz nicht nur Gefechtshandlungen, sondern auch Präsenz, Abschreckung, Strafaktionen, Polizeimaßnahmen sowie administrative Sicherungsaufgaben. Gewalt erscheint dabei nicht als Ausnahme. Vielmehr handelt es sich um ein strukturprägendes Element kolonialer Staatlichkeit.

Im Zentrum des Projekts steht die Analyse militärischer Gewalt als dynamischer Prozess. Untersucht werden Formen der Gewaltanwendung, ihre organisatorischen Voraussetzungen, ihre situative Eskalation sowie die Handlungsspielräume militärischer Akteure. Besondere Aufmerksamkeit gilt den Übergängen zwischen unterschiedlichen Gewaltformen und der Frage, wie militärische Ordnungssicherung in kolonialen Räumen praktisch umgesetzt wurde. Die Analyse dieser Einsatzpraxis ermöglicht es, militärisches Handeln in komplexen Ordnungs- und Sicherungslagen besser einzuordnen. Das Projekt verfolgt einen vergleichenden Ansatz und bezieht neben deutschen Akteuren auch indigene Gewaltakteure in die Untersuchung ein.

Die Forschung ist als mehrjähriges Vorhaben angelegt und strukturiert sich im Kern in drei aufeinander aufbauende Workshops. Die Ergebnisse werden in einem Sammelband veröffentlicht, der in Kooperation mit dem Institut für Diaspora- und Genozidforschung der Ruhr-Universität Bochum entsteht. Hinzu treten ausgewählte Transferformate, um Forschungsergebnisse einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Dazu zählen unter anderem der Podcast „Schutz wovor?“, der die kaiserliche Schutztruppe als militärischen und administrativen Gewaltakteur thematisiert. Mit einem Bildessay unter dem Titel „Bilder der Gewalt. Militärische Gewalt in den deutschen Kolonien“ wird koloniale Militärgewalt anhand zeitgenössischer Fotografien als alltägliche, symbolische und strukturelle Praxis sichtbar gemacht.

Das Projekt nimmt eine differenzierte Einordnung militärischer Gewaltanwendung und Ordnungssicherung vor, um Einsätze des deutschen Militärs jenseits vereinfachender Deutungen von „Krieg“ und „Frieden“ analytisch zu erfassen. Darüber hinaus schärft es den Blick für strukturelle Eskalationsdynamiken. Schließlich bietet das Projekt Anknüpfungspunkte für die historisch-politische Bildung in der Bundeswehr. So können Fragen militärischer Gewaltanwendung am historischen Beispiel der deutschen Kolonialzeit auch jenseits klassischer Kampfhandlungen reflektiert werden. Zugleich trägt die Forschung zu einer sachlichen gesellschaftlichen und politischen Einordnung kolonialer Militärgewalt bei. Die gewonnenen Erkenntnisse sind anschlussfähig für die Ausbildung in der Bundeswehr und fließen darüber hinaus in die universitäre Lehre ein. Dafür steht beispielhaft eine Lehrveranstaltung zum Thema „Ordnung, Krieg, Vernichtung? Militärische Gewalt im deutschen Kolonialreich“ an der Universität Potsdam im Sommersemester 2026.

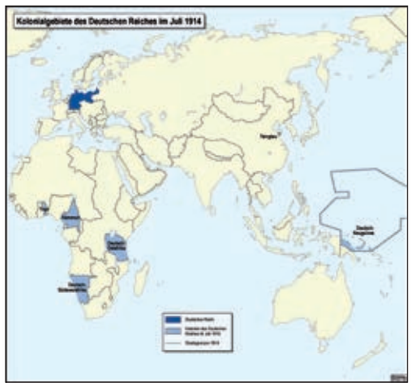


Abb. 1: Globale Verteilung der Kolonialgebiete des Deutschen Reiches im Juli 1914 (Togo, Kamerun, Deutsch-Ostafrika, Deutsch-Südwestafrika, Tsingtau, Deutsch-Neuguinea); die Legende differenziert zwischen Reichsgebiet (blau), Kolonialbesitz (hellblau) und zeitgenössischen Staatsgrenzen (gestrichelte, grau hinterlegte Linien) (Quelle: Bundeswehr/ZMSBw)



Abb. 2: Vortrag Dr. Jonas Kreienbaum auf dem Workshop „Koloniale militärische Gewalt verstehen“, ZMSBw, Potsdam, 7. Oktober 2025 (Quelle: Bundeswehr/Nimpsch)



Abb. 3: Aufnahme eines Podcasts zum Thema „Schutz wovor? Die kaiserliche Schutztruppe und die Realität kolonialer Gewalt“, ZMSBw, Potsdam, 3. Dezember 2025 (Quelle: Bundeswehr/Nimpsch)

Dr. phil. Lic. theol. Markus Thurau
Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw)
Potsdam

ZMSBwPressestelle@bundeswehr.org

Was kann und was leistet Militärseelsorge? Seelsorge und Religion in den deutschen Streitkräften

Seit der Antike begleiten Geistliche das Militär in seinen Einsätzen. Militärseelsorgerinnen und -seelsorger sind auch heute überall dabei, wo Soldatinnen und Soldaten tätig sind. Zum ersten Mal in der Geschichte der Bundeswehr wurde nun umfassend empirisch und systematisch nach Seelsorge, Religion und Religiosität in den deutschen Streitkräften gefragt. Entstanden ist ein Grundlagenwerk mit Handbuchcharakter.

In der Bundeswehr entstand eine Militärseelsorge, die dem zugesicherten „Anspruch auf Seelsorge und ungestörte Religionsausübung“ (§ 36 Soldatengesetz) in besonderer Weise nachkam. Ihr wurde im Vergleich zu früheren deutschen und vielen anderen Armeen eine größtmögliche pastorale Freiheit eingeräumt, so dass die Seelsorgenden eine einzigartige Stellung im System Bundeswehr einnehmen. Dies sichert ihre Unabhängigkeit gegenüber der militärischen Hierarchie und eröffnet ihnen Spielräume für die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit allen Ebenen und Bereichen der Bundeswehr.

Da sich nicht nur die Bundeswehr als Organisation verändert, sondern auch die Menschen in der Bundeswehr, ist im Hinblick auf Seelsorge und Religion ebenso von einer Veränderung auszugehen. Es stellte sich daher die Frage, wie die Militärseelsorge und ihre Arbeit in der Bundeswehr wahrgenommen werden, was die religiösen Bedürfnisse und Interessen von Soldatinnen und Soldaten sind und welche Erfahrungen sie mit der Militärseelsorge und darüber hinaus auch mit der Institution Kirche machen.



Abb. 1: Was kann und was leistet Militärseelsorge? Seelsorge und Religion in den deutschen Streitkräften. Hrsg. von Petra-Angela Ahrens, Gerhard Kümmel, Sylvi Mauermeister, Hilke Rebenstorf, Markus Thurau und Meike Wanner unter Mitwirkung von Veronika Drews-Galle, Göttingen 2026; 487 S. Das Buch ist kostenfrei abrufbar unter www.vandenhoeck-ruprecht-verlage.com.



Abb. 2: Joachim von Blumröder, Thomas Bretz-Rieck, Friedericke Erichsen-Wendt, Andreas Jensen, Roger Mielke, Sascha Zierold, Peter Zimmermann, Was kann und was leistet die Militärseelsorgestudie? Kommentarband, Berlin 2026; 72 S. Ein erster Kommentarband nimmt aus Sicht von Bundeswehr und Kirche Stellung zu den Forschungsergebnissen.

Das ZMSBw und das Sozialwissenschaftliche Institut der Evangelischen Kirche in Deutschland wurden mit der Durchführung eines gemeinsamen Projekts beauftragt. Ziel war es, dass beide Forschungsinstitute gleichermaßen ihre wissenschaftliche Expertise und ihre Feldkenntnis aus den Bereichen Kirchen- und Religionssoziologie sowie Militärsoziologie in die Arbeitsgruppe einbringen.

Aufgrund der Vielschichtigkeit des Forschungsinteresses entschied sich die Gruppe für ein mehrstufiges empirisches Vorgehen. Zunächst wurden im Rahmen einer Vorstudie unterschiedliche Fokusgruppen gebildet und qualitative Gruppeninterviews mit Soldatinnen und Soldaten aller Dienstgrade sowie mit Militärseelsorgerinnen und -seelsorgern, deren Assistentinnen und Assistenten sowie mit Familienangehörigen von Soldatinnen und Soldaten durchgeführt. Aus der Breite der gewonnenen Perspektiven wurde in einem zweiten Schritt eine auf aktuelle Herausforderungen zugeschnittene Repräsentativbefragung entwickelt (Bruttostichprobe: 25.000 Personen; Rücklaufquote: 30%).

Das auf mehrere Jahre angelegte Projekt endete mit der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Form eines Sammelbandes (Abb. 1 und 2). Der Band zeigt, dass der Militärseelsorge in der Bundeswehr eine hohe Wertschätzung entgegengebracht wird. Dies liegt zu einem großen Teil daran, dass die Seelsorgerinnen und Seelsorger trotz ihrer besonderen Stellung fest in die Lebenswelt der Soldatinnen und Soldaten eingebunden sind, so dass hier – im Grundbetrieb vor Ort wie im Einsatz – ein besonderes Vertrauensverhältnis entstehen kann. 91 % aller Befragten, darunter auch die, die weder religiös gebunden sind noch die Angebote der Militärseelsorge bisher in Anspruch genommen haben, fanden es gut, dass die Seelsorgenden vor Ort sind (Abb. 3). Die hohe Akzeptanz zeigt sich auch bei der absoluten Verschwiegenheitspflicht (Beichtgeheimnis), die von fast allen Soldatinnen und Soldaten für wichtig erachtet wird (Abb. 4). Sie werden in erster Linie als Ratgeber und Vertrauenspersonen, an zweiter Stelle erst als Repräsentanten ihrer Religionsgemeinschaft wahrgenommen.

Es konnte in der Studie zudem gezeigt werden, dass der Lebenskundliche Unterricht, der in der Verantwortung der Militärseelsorge liegt, eine anerkannte und fest etablierte Bildungsmaßnahme in der Bundeswehr ist. Der überwiegende Teil der Befragten schätzt sowohl die Dozentinnen und Dozenten als auch den Unterricht selbst. Da die Militärseelsorge ein Gestaltungsfeld der Inneren Führung ist, befasste sich die Studie auch mit dem Zusammenhang zwischen Militärseelsorge und Innerer Führung. Dabei konnte gezeigt werden, dass die persönliche Einstellung der Soldatinnen und Soldaten zur Inneren Führung im Wesentlichen von den perzipierten Einstellungen von Kameradinnen und Kameraden sowie Vorgesetzten beeinflusst wird.

Die Studienergebnisse zeigen insgesamt, dass die Militärseelsorge weit über eine konfessionelle Zugehörigkeit hinaus hoch angesehen ist. Sie schafft in der Bundeswehr Räume des Vertrauens, in denen existentielle Fragen, die der Dienst in den deutschen Streitkräften gerade in belastenden Situationen aufwirft, verhandelt werden können.

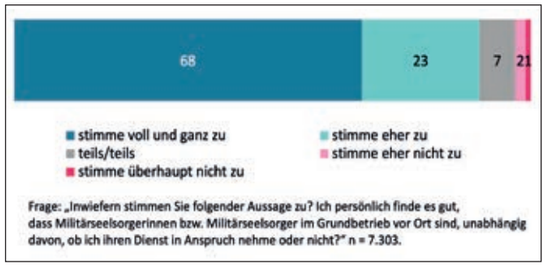


Abb. 3: Akzeptanz der Militärseelsorge im Grundbetrieb vor Ort (Angaben in Prozent)

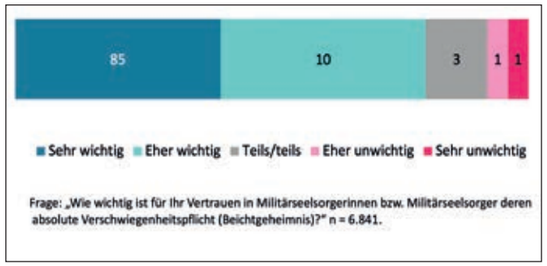


Abb. 4: Bedeutung der Verschwiegenheitspflicht von Militärseelsorgenden (Angaben in Prozent)



5

Geowissenschaftliche Forschung

Nichts fährt, fliegt, schießt oder trifft ohne Geoinformation. Mit dieser Devise wirbt der Geoinformationsdienst der Bundeswehr um neues Personal. Auftrag des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr ist es, wissenschaftliche Erkenntnisse in den Geowissenschaften zu bewerten und für die Nutzung zu erschließen sowie eigene Vorhaben und Projekte mit dem Ziel voranzutreiben, die Streitkräfte und die Bundeswehr insgesamt in ihrer Auftragserfüllung zu unterstützen und Schaden von Material oder Personal abzuwenden. Ein zentraler Teil des Leistungsprozesses „Geoinformationswesen sicherstellen“ ist hierbei die geowissenschaftliche Forschung.

In deren Fokus steht die Betrachtung der Geofaktoren, unter denen alle natürlichen und anthropogenen Gegebenheiten der Erde (Klima, Wetter, Geländerelief, Gewässer, Bewuchs, Bebauung etc.) verstanden werden, die bei militärischen Fähigkeiten und im Rahmen von militärischen Operationen von Bedeutung sein können. In einer Bandbreite von insgesamt 18 (geo-) wissenschaftlichen Bereichen der angewandten geowissenschaftlichen Forschung arbeitet das Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) als zentrale Dienststelle des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr in einem interdisziplinären Ansatz an vielgestaltigen Themen, die sich in verschiedenster Weise und in unterschiedlichen Zeitskalen auf die Planung und Durchführung militärischer Operationen auswirken.

Zu Änderungen der erforderlichen Leistungen führt die Refokussierung der Bundeswehr auf Landes- und Bündnisverteidigung (LV/BV). Dem veränderten Bedarf an validen Informationen gerecht werden zu können, erfordert eine Anpassung der Strukturen im Geoinformationsdienst der Bundeswehr, die im Jahr 2026 eingenommen wird. Im ZGeoBw als Träger der Geowissenschaftlichen Ressortforschung in der Bundeswehr wird bei dieser Gelegenheit auch der Campus-Gedanke realisiert, in dem Forschung und Lehre in einer Abteilung zusammengeführt werden.

Die langfristigen Schwerpunkte der geowissenschaftlichen Forschung liegen derzeit in den Anwendungsfeldern „Big Data Analytics“ und „Künstliche Intelligenz“ im GeoInfo-Kontext, „Virtuelle und Erweiterte Realitäten“, „GeoInfo-Datenmanagement“ und „Qualität von Online Services“ sowie auf der weiteren Entwicklung im Bereich „Positionsbestimmung, Navigation und Zeitfestlegung“, aus denen in den vergangenen Jahren etliche Projekte im Teil „Geowissenschaftliche Forschung“ dieser Publikation bereits vorgestellt wurden. Aktuell bearbeiten die Bereiche Atmosphärenphysik, Geoinformatik und Fernerkundung Projekte, in denen Methoden der Künstlichen Intelligenz bereits Einzug gehalten haben. In der Biologie wird die angewandte biologische und ökologische Forschung und Entwicklung durch die Entwicklung praxisnaher anwenderfreundlicher Tools für die Truppe in Wert gesetzt. In diesem Jahr wird daher ein Projekt vorgestellt, in dem die Vogelschlagprävention mittels Echtzeit-Radarüberwachung durch die Neubearbeitung der VOgelzug-VIsualisierungsSoftware (VoVisWxBw) auf ein neues Level gehoben wird.

OTL Dr. Detlef Kurth
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Dezernat V (6) Biologie/Ökologie
Euskirchen

ZGeoBwV6BiologieOekologie@bundeswehr.org

Wenn Biologie auf Cyber trifft

Das in die Jahre gekommene Expertensystem zur Vogelzugvisualisierung (VoVis) wurde durch Teams aus dem Kdo CIR (ZDigBw und ZGeoBw) agil und anwendungsorientiert neu programmiert. Dadurch wurde eine zukunftssichere, wesentlich verbesserte Software zur Vogelzugvisualisierung und Wetterwarnung Bundeswehr („VoVisWxBw“) innerhalb von neun Monaten generiert, die modular erweiterbar ist.

Wehrwissenschaftliche Forschung benötigt oft eine gewisse „Hochlaufphase“, bis sich die Expertenteams, die eine Fähigkeit einfordern, sowie die Expertenteams, die eine Fähigkeit durch Forschung bereitstellen, so gut verstehen, dass reibungslose Arbeitsabläufe entstehen. Im Falle des „Reengineering“ des in die Jahre gekommenen Expertensystems zur Vogelzugvisualisierung (VoVis) gehörten beide Teams dem Kdo CIR (Cyber- und Informationsraum) an – das Dezernat Biologie/Ökologie des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) und das SG LgDarst GeoInfoSys des Zentrum Digitalisierung der Bundeswehr und Fähigkeitsentwicklung (ZDigBw). So herrschte von Beginn an ein gemeinsames Verständnis dafür, was erreicht werden sollte: eine zukunftssichere, wesentlich verbesserte Software zur Vogelzugvisualisierung und Wetterwarnungen Bundeswehr („VoVisWxBw“), mit welcher die Warnungen an die militärische Luftfahrt in Form von Bird Notice to Air Missions (BIRDTAM) generiert werden und die modular erweiterbar ist.

In der zivilen und militärischen Luftfahrt kommt es jährlich zu zahlreichen Zusammenstößen zwischen Luftfahrzeugen und Vögeln, so genannten Vogelschlägen. Im militärischen Luftverkehr, in dem oft auch im Tiefflug geflogen wird, ist das Risiko eines Vogelschlages besonders hoch, da in diesen Höhenbändern mit einer sehr großen Anzahl an Vögeln zu rechnen ist. Eine belastbare Einschätzung des Vogelzuggeschehens ist daher ein essentieller Part der täglichen Einsatz- und Flugplanung.

Als Teil der Flugwetterberatung analysiert das fachwissenschaftliche Personal des Dezernat Biologie/Ökologie aktuelle Radardaten, die über eine Visualisierungs-Software graphisch dargestellt werden. Die Erkennung von Vogelschwärmen erfolgt über die Detektion spezifischer Signaturen, die mit Wetterphänomenen abgeglichen werden. Wird dann Vogelzug in einer gewissen Intensität erkannt, wird ein BIRDTAM durch die Mitarbeitenden erstellt. Der Aktualisierungs-Rhythmus der Radardaten beträgt 2 min, was eine ständige Beobachtung der Radarlage ermöglicht, aber auch erfordert.

Die Herausforderung einer Neu-Programmierung bestand zum einen in der Einbindung unterschiedlichster Radarquellen, der Einhaltung der Sicherheitsstandards, der Erstellung spezifischer Ausgabeformate (BIRDTAM) sowie in der Erhöhung der Anwenderfreundlichkeit und der Möglichkeit, künftig automatisierte, KI-generierte Erkennungsverfahren mit einbinden zu können. Unter Anwendung des „SCRUM-Verfahrens“ (Agiles Projektmanagement) entwickelte das SG Lagedarstellung GeoInfoSys des ZDigBw in enger Abstimmung mit Fachnutzenden des ZGeoBw innerhalb von lediglich neun Monaten (Februar bis Oktober 2025) eine zukunftsfähiges, modulares Expertensystem zur Vogelzugvisualisierung, genannt VoVisWxBw. Der Grund für die effiziente Bearbeitung des Projekts lag in der praxisnahen Entwicklung innerhalb der TSK CIR. Während der gesamten Entwicklungsphase konnten die Experten und Expertinnen des ZGeoBw Anpassungswünsche einbringen und jede Iteration direkt im Arbeitsalltag testen. So konnten Bugs und Missverständnisse umgehend eliminiert und die Programmierung korrigiert werden.

Ein weiterer neuer, sehr funktionaler Bestandteil von VoVisWxBw ist der Zugriff auf historische Radardaten. Frühere Zugereignisse können gezielt analysiert und mit der aktuellen Situation verglichen werden. Dies erleichtert die Einordnung aktueller Beobachtungen – aber künftig auch das Training mit KI-Lösungen. VoVisWxBw ist damit ein essentielles Werkzeug für den operativen Betrieb, um Vogelzugdaten nahezu in Echtzeit darzustellen. Die Software ersetzt keine fliegerische Entscheidung, trägt jedoch zur Verbesserung der Informationslage bei und unterstützt eine risikobewusste Planung und Durchführung des militärischen Flugbetriebs.

Fazit: Das Projekt zeigt beispielhaft, dass durch die Integration und Bündelung von naturwissenschaftlicher Expertise einerseits und modernem IT-Spezialistentum andererseits in der Teilstreitkraft CIR Synergien entstehen, die in spezifischen Anwendungsfällen eine deutliche schnellere und stärker an den militärischen Anwendungen orientierte Lösungen ergeben, als dies mit externen Industrie-Partnern möglich wäre.



Abb. 1: Eine A400M steht auf einer Start-/Landebahn in der Dämmerung. Davor und darum herum fliegt ein dichter Schwarm Vögel (TaktLwG 51 I FlPlStff Hohn 2025)



Abb. 2: Ein Fluggerätmechaniker reinigt die Frontscheibe nach einem Vogelschlag während der Nachflugkontrolle am Kampfjet Eurofighter beim Taktischen Luftwaffengeschwader 73 „Steinhoff“ in Laage, am 17.08.2023

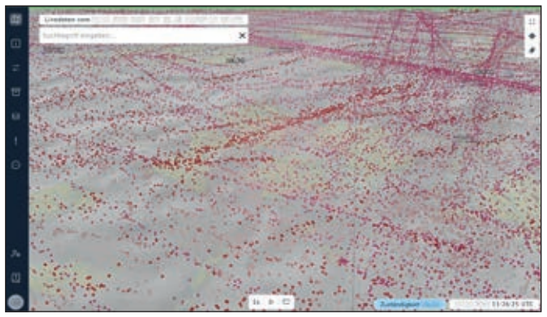
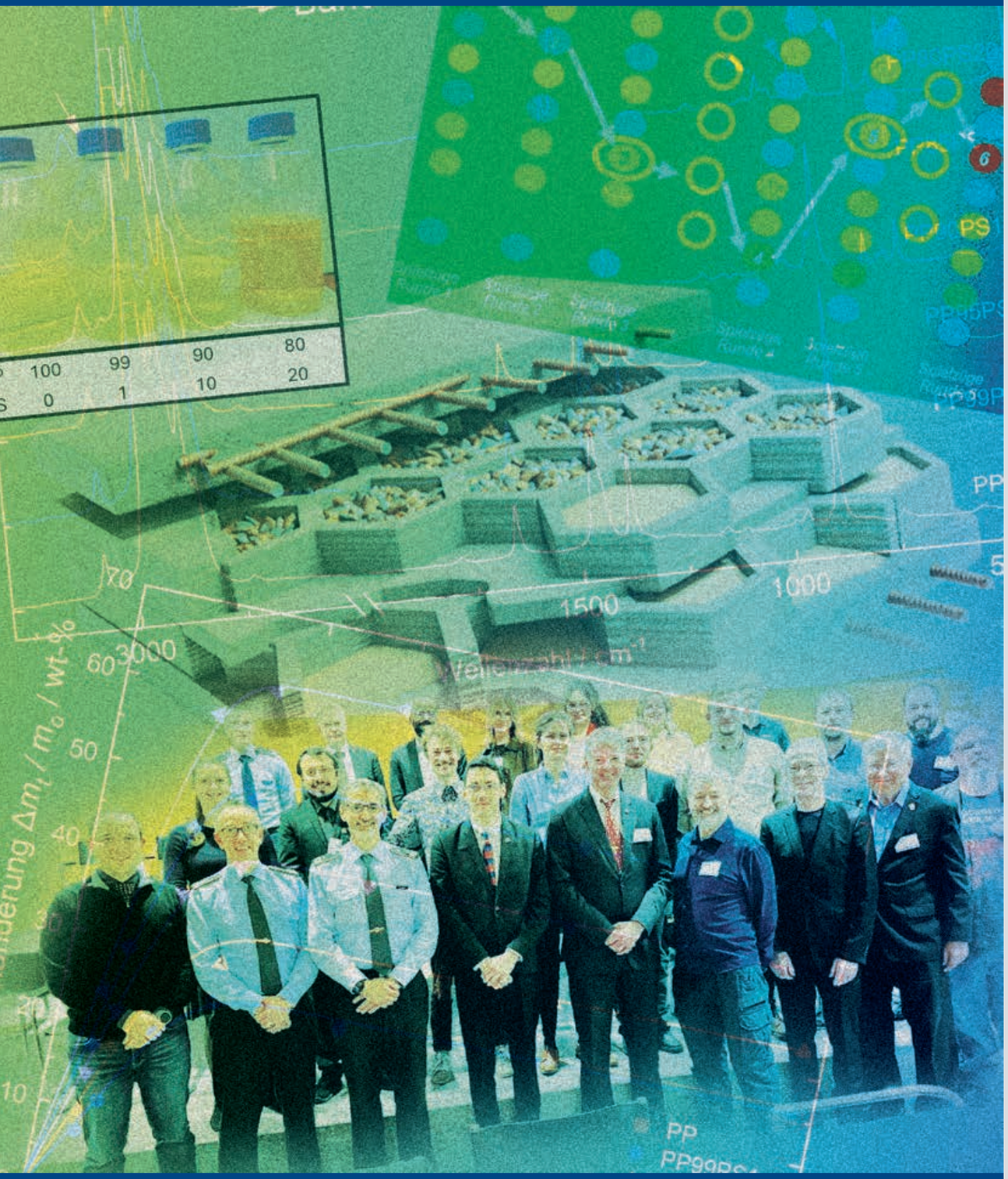


Abb. 3: Die Oberfläche der Softwareware VoVisWxBw mit Radardatenpunkten in einer 3D-Darstellung



6

Forschung mit Bundeswehrbezug an den Universitäten der Bundeswehr

An den beiden Universitäten der Bundeswehr (UniBw) in München und in Hamburg findet Forschung in einem breiten fachlichen Spektrum und im Kontinuum von Grundlagenforschung bis zur experimentellen Anwendungsforschung und wissenschaftlichen Implementierungsbegleitung statt. In inter- und transdisziplinären Konsortien sowie gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft stehen dabei auch Themen der Sicherheit und Verteidigung im Fokus der universitären Forschung. Innovationen entstehen oftmals im Verbund zwischen theoretischer Fundierung, wissenschaftlicher Analyse und praktischem Anwendungsbezug. An den Universitäten der Bundeswehr werden sowohl ingenieurwissenschaftliche und informationstechnologische als auch wirtschafts-, gesellschafts- und geisteswissenschaftliche Fragestellungen untersucht.

Die mit der Zeitenwende einhergehende, wieder stärkere Fokussierung auf die Landes- und Bündnisverteidigung im Rahmen einer zunehmend komplexen sicherheitspolitischen Weltlage wird in der Forschung beider UniBw ebenso adressiert wie die Herausforderungen hybrider Bedrohungen. Das Verständnis der Sicherheitsrelevanz universitärer Forschung an den beiden Universitäten ist dabei weit gefasst. Die Vorstellung einer Unterscheidung von rein ziviler und Dual-Use-Forschung wird entsprechend heute als nicht mehr trennscharf möglich erachtet. Zugleich besteht sowohl bei vielen Forschenden an den UniBw als auch bei den Streitkräften ein zunehmendes Interesse an fachlichem Austausch und gemeinsamer Forschungs- und Innovationsarbeit.

Seit 2020 forschen zudem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der UniBw auch im Rahmen des zur Ressortforschung komplementären und von beiden UniBw getragenen Zentrums für Digitalisierungs- und Technologieforschung (dtec.bw), das gegenwärtig durch die Europäische Union im Rahmen von NextGeneration EU finanziert wird. Die ministerielle Zuständigkeit für das dtec.bw liegt beim Abteilungsleiter Innovation und Cyber (IC). Die Vielzahl an Projekten, die im Rahmen des dtec.bw angesiedelt sind, die dabei entstandenen und vertieften Kooperationen mit Einrichtungen der Ressortforschung und der Streitkräfte und die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Innovationen zeigen, wie wertvoll die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis sein kann.

Die Beiträge im vorliegenden Jahresbericht zeigen exemplarisch das weite Spektrum der Forschung an den Universitäten der Bundeswehr. Dabei wird auch die schon seit vielen Jahren gelebte Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen der wehrwissenschaftlichen Forschung deutlich. Sie spiegeln darüber hinaus auch den Stellenwert der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, der in die Forschung eingebunden ist und dort Möglichkeiten der Qualifizierung findet. Theoretisch fundierte Grundlagenforschung und Anwendungsbezug im Feld innovativer Technologien und Methoden ergänzen sich dabei, wie die vorliegenden Beiträge zum diesjährigen Jahresbericht zeigen.

Dr. Philip Jan Schäfer
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Professur für Politikwissenschaft unter besonderer Berücksichtigung der Politischen Theorie
German Wargaming Center
Hamburg

contact@germanwargamingcenter.eu

Dr. Joseph Verbovszky
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Professur für Politikwissenschaft unter besonderer Berücksichtigung der Politischen Theorie
German Wargaming Center
Hamburg

contact@germanwargamingcenter.eu

Wargaming als Experiment

Wargaming kann über Ausbildung und Analyse hinaus als experimentelle Forschungsmethode genutzt werden. Im Projekt STRATEM wird strategisches Entscheidungsverhalten in einem digitalen Planspiel systematisch erfasst und ausgewertet. Ziel ist es, Strategiefähigkeit, Kooperationsmuster und Entscheidungslogiken unter Unsicherheit empirisch messbar zu machen.

Wargaming wird traditionell vor allem in zwei Hauptanwendungsfeldern verortet: als Educational Wargaming zur Ausbildung und Sensibilisierung sowie als Analytical Wargaming zur strukturierten Untersuchung von Entscheidungsoptionen im militärischen Kontext. Ergänzend zu diesen etablierten Nutzungsformen entwickelt sich zunehmend ein dritter Zugang, nämlich Wargaming als experimentelle Forschungsmethode (Abb. 1 und 2).

Im Zentrum dieses Ansatzes steht die systematische Untersuchung strategischen Entscheidungsverhaltens unter Unsicherheit. Das Forschungsprojekt STRATEM (STRategiefähigkeit Analyse durch Tests und Experimentelle Messung) verfolgt das Ziel, individuelle und kollektive Strategiefähigkeit nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern empirisch messbar zu machen. Kern des Projekts ist das digitale Planspiel „Entanglement“, das komplexe, konflikthafte Entscheidungssituationen simuliert und dabei Handlungen, Interaktionen und Anpassungsprozesse strukturiert erfasst.



Abb. 1: Teilnehmende des ersten „German Wargaming Symposiums“ in Kooperation mit Connections



Abb. 2: Erstes „German Wargaming Symposium 2025“

Entscheidungen werden in diesem Setting nicht allein beobachtet, sondern quantitativ ausgewertet. Spielzüge, Reaktionszeiten, Ressourcenzuweisungen, Kooperationsmuster und Eskalationsentscheidungen werden als Datenpunkte dokumentiert und analysiert. Ergänzend können psychologische Indikatoren – perspektivisch auch physiologische Messgrößen – einbezogen werden. Auf diese Weise entsteht ein kontrolliertes Untersuchungsdesign, in dem Hypothesen zu Risikoverhalten, Kooperationsbereitschaft, Anpassungsfähigkeit oder strategischer Kohärenz überprüfbar werden (Abb. 3).

Die experimentelle Perspektive wurde in verschiedenen Praxisformaten erprobt. Im gemeinsam mit WELT durchgeführten Wargame „Ernstfall“ zur Eskalation im Baltikum wurde deutlich, wie stark institutionelle Routinen und Abstimmungsprozesse die Reaktionsgeschwindigkeit prägen, selbst bei hoher fachlicher Expertise. Der Mehrwert lag weniger in einer Prognose möglicher Entwicklungen als in der Analyse kollektiver Entscheidungsdynamiken (Abb. 4).

Die experimentelle Perspektive wurde in verschiedenen Praxisformaten erprobt. Im Planspiel „Convergence“ mit der IHK Berlin wurde Handlungsfähigkeit in einer sicherheitspolitischen Grauzone untersucht (Abb. 5). Sichtbar wurde, dass Lagebild, Koordination und institutionelle Anschlussfähigkeit zentrale Voraussetzungen operativer Wirksamkeit darstellen, auch für wirtschaftliche Akteure.

Ein weiteres Beispiel bildet das mit der Friedrich-Ebert-Stiftung durchgeführte Planspiel „Ostschild 2026“ zu europäischen Rüstungskooperationen. Hier wurde das Spannungsverhältnis zwischen nationaler Industriepolitik und gemeinsamer europäischer Verteidigungsfähigkeit simuliert. Die Spielverläufe machten nachvollziehbar, wie innenpolitischer Druck und strategische Unsicherheit langfristige Kooperationsstrukturen beeinflussen.

Im Rahmen des Foresight-Prozesses der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) wurde schließlich das Wargame „Entanglement 2035“ zu kritischen Rohstoffen durchgeführt. In kontrastierenden Zukunftsszenarien, von vertiefter europäischer Integration bis hin zu fragmentierten Handelsordnungen, wurden geopolitische, wirtschaftliche und entwicklungspolitische Interessen systematisch variiert.

Diese Anwendungen zeigen, dass Wargaming über Ausbildung und Analyse hinaus als experimentelles Forschungsdesign genutzt werden kann. Durch die gezielte Variation von Faktoren, etwa Ressourcenverteilung, institutionelle Mandate oder Eskalationsmechanismen, sowie die systematische Erfassung von Variablen wie Entscheidungsqualität, Kooperationsgrad oder Anpassungsfähigkeit lassen sich kausale Wirkzusammenhänge identifizieren.

Wargaming wird damit zu einem Instrument strategischer Sozialforschung. Wargames als Experimente dienen als Verbindung von wissenschaftlicher Methodik, praktischer Anwendung und datenbasierter Analyse strategischen Handelns.

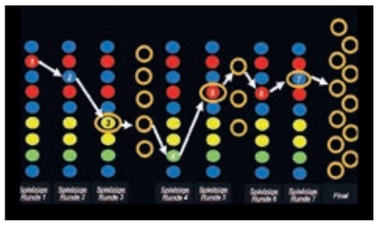


Abb. 3: Entscheidungspfade/ Strategieverläufe



Abb. 4: Wargame „Ernstfall“ in Kooperation mit WELT



Abb. 5: Wargame „Convergence“ in Kooperation mit der IHK Berlin

Univ.-Prof. Dr. habil. Ricardo Büttner
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
Hamburg

ki-transfer@hsu-hh.de

Hybride Verteidigung: Robuste KI als Innovationstreiber

Der Lehrstuhl für Hybrid Intelligence entwickelt und validiert robuste KI-Systeme für luftgestützte Aufklärung, KRITIS-Überwachung und resiliente Navigation, konsequent ausgelegt auf reale, ressourcenlimitierte und sicherheitskritische Einsatzbedingungen. Im Fokus stehen belastbare Leistungsfähigkeit, operationelle Integration und nachweisbare Robustheit.

Die technologische Reife moderner KI-Systeme verschiebt den Innovationsfokus von reiner Performancesteigerung hin zu Robustheit, Validierung und belastbarer Integration unter realen Einsatzbedingungen. Der Lehrstuhl für Hybrid Intelligence adressiert dies durch die Entwicklung von KI-Systemen für luftgestützte Aufklärung, Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS) sowie resiliente Navigations- und Sensorsysteme.

Im Bereich robuster Verfahren für die thermische Lageaufklärung aus der Luft konnte das Team demonstrieren, wie unbemannte Luftfahrzeuge mit Infrarotsensorik und einer gezielt optimierten, leichtgewichtigen Deep-Learning-Architektur ausgestattet werden können. Auf Basis von thermografischen Aufnahmen (Abb. 1) wird eine präzise Klassifikation von Landminen erreicht. Architektur und Modellkomplexität wurden dabei konsequent auf ressourcenlimitierte Einsatzszenarien ausgelegt, sodass die Funktionsfähigkeit auch unter realen operativen Bedingungen gewährleistet bleibt. Ergänzend wurde die thermische Personendetektion in unübersichtlichen Geländeformen substantiell weiterentwickelt: eine gezielte Vorverarbeitung (Abb. 2) stabilisiert

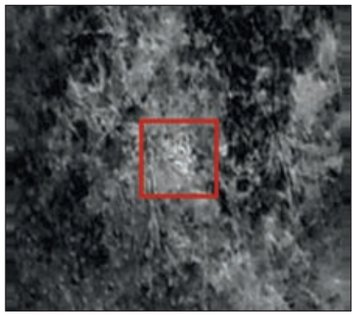


Abb. 1: Beispielhafte Abbildung einer automatisiert detektierten Landmine in 10cm Tiefe basierend auf Thermaldaten



Abb. 2: Beispielhafte Abbildung einer automatisiert detektierten Person basierend auf Thermaldaten

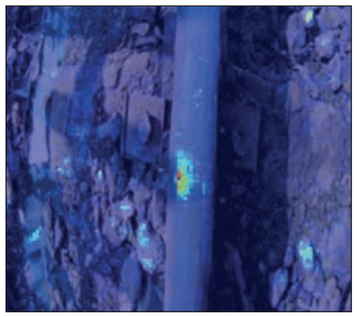


Abb. 3: Beispielbild der Anwendung erklärbarer KI bei der Erkennung von Abschälungen an einer Schiene

thermische Merkmale und adressiert partielle Verdeckungen, Vegetationsstrukturen sowie variierende Blickwinkel. In der Evaluation über unterschiedliche Flughöhen hinweg wird eine sehr hohe Klassifikationsleistung selbst bei eingeschränkter Sicht erreicht. Die Ergebnisse belegen, dass ressourceneffiziente KI-Modelle unter realitätsnahen, störbehafteten Einsatzbedingungen belastbar und einsatzfähig betrieben werden können.

Auch bei der Überwachung und Schadensanalyse kritischer Infrastrukturen entwickelt die Forschungsgruppe einsatzrelevante KI-Lösungen. Mit der DualSightNet-Architektur wurde für die Gleisüberwachung ein sogenanntes Backbone realisiert, das lokale Defektmerkmale und globale Kontextinformationen gezielt zusammenführt. Dadurch werden sowohl kleinräumige Schäden als auch großflächige Störungen im Gleisbett zuverlässig erkannt (Abb. 3, 4).

In der Objekterkennung im Gleisbett konnten durch strukturierte Vorverarbeitung und ein angepasstes ResNet-Backbone (Abb. 5, 6) Fehlklassifikationen signifikant reduziert werden. Entscheidend hierfür ist die zielgerichtete Abstimmung von Architektur, Datenaufbereitung und Validierung unter realitätsnahen Bedingungen.

Neben der luftgestützten Aufklärung und der KRITIS-Überwachung wurden für die aktuell besonders praxisrelevante GNSS-Spoofing-Detektion bestehende Ansätze kritisch untersucht. Es zeigen sich in der bisherigen Forschung deutliche Validierungslücken, da viele Verfahren überwiegend unter Simulationsbedingungen getestet werden. Für belastbare Einsatzsysteme ist jedoch die systematische Einbindung realer Angriffsszenarien und unterschiedlicher Täuschungsformen erforderlich, was durch die Forschungsgruppe in künftigen Vorhaben adressiert werden soll. Damit leistet die Forschung des Lehrstuhls einen konkreten Beitrag zur Absicherung sicherheitskritischer Navigations- und Sensorsysteme.

Überblickend liegt der Fokus der Forschungsgruppe auf der Entwicklung und Validierung robuster KI-Gesamtsysteme, die unter realen, variablen und sicherheitskritischen Bedingungen nachweisbar leistungsfähig bleiben.

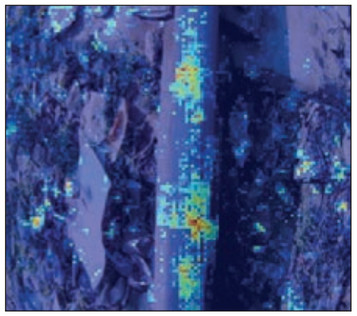


Abb. 4: Beispielbild der Anwendung erklärbarer KI bei der Erkennung von Abblätterungen an einer Schiene

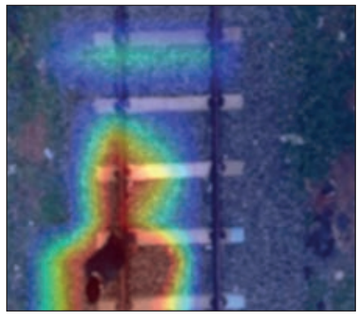


Abb. 5: Beispielbild der Anwendung erklärbarer KI bei der Erkennung einer Person im Gleisbett

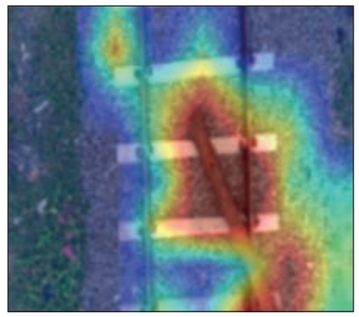


Abb. 6: Beispielbild der Anwendung erklärbarer KI bei der Erkennung einer Eisenstange im Gleisbett

Vahan Zohrabyan
Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
München

sekretariat.ki@unibw.de

Thomas Braml
Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
München

sekretariat.ki@unibw.de

Carl Frank
Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52)
Schneizlreuth

wtd52posteingang@bundeswehr.org

Martin Botz
Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr
Bonn

BAIUDBwPoststelle@Bundeswehr.org

Tom Kristeleit
Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr
Bonn

BAIUDBwPoststelle@Bundeswehr.org

Additiv gefertigter Stahlbeton für den baulichen Schutz bei extremen Belastungen

Der 3D-Druck von Stahlbeton ermöglicht neuartige, ressourceneffiziente Bauteile mit gezielt einstellbaren Eigenschaften. In diesem Beitrag wird das Verhalten additiv gefertigter, mehrlagiger Stahlbetonplatten, die mit Sand und Kies verfüllt sind, unter extremen dynamischen Lasten untersucht. Dabei wird das Potenzial dieser Technologie für den baulichen Schutz kritischer Infrastrukturen aufgezeigt.

Additive Fertigungsverfahren halten zunehmend Einzug in das Bauwesen. Insbesondere der 3D-Druck von Stahlbeton eröffnet neue Möglichkeiten, da sich damit komplexe Geometrien, lastangepasste Innenstrukturen und eine hohe Reproduzierbarkeit realisieren lassen. Für militärische und sicherheitsrelevante Anwendungen ist dabei von besonderem Interesse, wie sich solche Bauteile unter extremen Einwirkungen verhalten. Die Abbildungen 1 und 5 zeigen zwei unterschiedliche Plattengeometrien, die mittels additiver Fertigung hergestellt wurden. Durch die gezielte Gestaltung der Hohlraumgeometrie lässt sich die Materialverteilung an die Last anpassen. Dies trägt zur kontrollierten Energieabsorption bei.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Universität der Bundeswehr München wurden mehrlagige, 3D-gedruckte Stahlbetonplatten mit gezielt unterschiedlichen Schichtorientierungen untersucht. Das Ziel bestand darin, den Einfluss der Druckrichtung und der inneren Schichtstruktur auf das Versagensverhalten nach einer Kontaktdetonation zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden mehrere Platten additiv gefertigt, bewehrt und anschließend experimentell hochdynamisch belastet. Durch die Anordnung von Hohlräumen oder wabenförmigen Strukturen konnte der Materialeinsatz um bis zu 45 Prozent reduziert werden, ohne dass die mechanische Leistungsfähigkeit proportional verringert wurde. Dadurch ergibt sich ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Vergleich zu massiven Vollquerschnitten. Gleichzeitig ermöglicht die digitale Planung eine präzise Abstimmung zwischen Geometrie, Materialverteilung und erwarteter Beanspruchung.

Die Versuche zeigen, dass die innere Struktur und die Orientierung der Drucklagen einen signifikanten Einfluss auf das Schadensbild und die verbleibende Tragfähigkeit haben. Bestimmte Schichtkonfigurationen führen zu einer günstigeren Rissverteilung und einer erhöhten Energieaufnahme. Somit wird deutlich, dass der 3D-Druck nicht nur neue Herstellungswege eröffnet, sondern auch zur gezielten Optimierung der Schutzwirkung von Stahlbetonbauteilen genutzt werden kann.

Aus technologischer Sicht stellt die Kombination aus digitaler Prozesssteuerung, geometrischer Freiheit und materialeffizienter Strukturierung einen Innovationssprung gegenüber klassischen Bauweisen dar. So ist es möglich, Bauteile funktionsintegriert auszulegen, Schwachstellen gezielt zu vermeiden und Lastpfade zu optimieren. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten für modulare und skalierbare Schutzsysteme. Dies trägt zu einer nachhaltigeren und innovationsorientierteren Ausgestaltung zukünftiger Bauwerke bei.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung additiv gefertigter Schutzbauwerke ein. Diese weisen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber extremen Belastungen bei geringem Materialeinsatz auf. Dies ist insbesondere für den Schutz von Soldatinnen und Soldaten sowie kritischer Infrastruktur von hoher Relevanz.

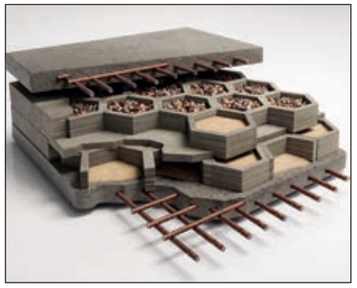


Abb. 1: Additive Fertigung einer Betonplatte mit hexagonaler innerer Hohlstruktur, verfüllt mit Sand und Kies

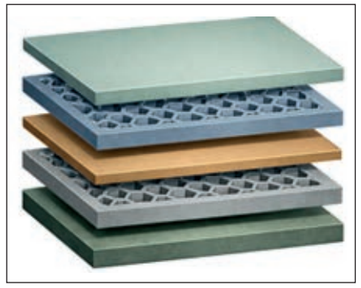


Abb. 2: Schichtenaufbau eines 30 cm dicken, additiv gefertigten Stahlbetonbauteils

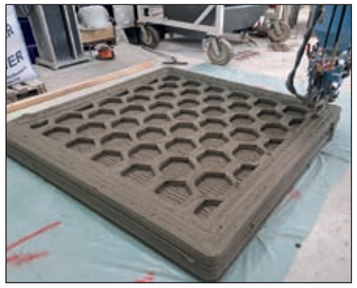


Abb. 3: Frisch gedruckte Wabenstruktur ohne Füllung

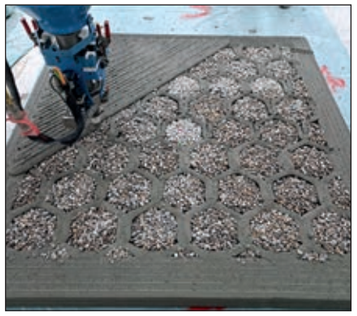


Abb. 4: Additive Fertigung einer Betonplatte mit hexagonaler Hohlstruktur und granularer Füllung

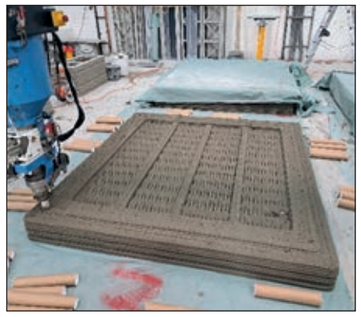


Abb. 5: Druckprozess einer strukturierten Hohlgeometrie mit sand- und kiesgefüllten Pappröhren

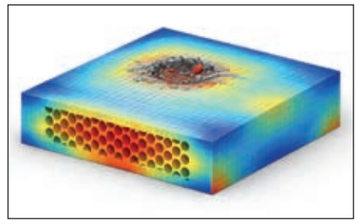


Abb. 6: Numerische FEM-Simulation einer Betonplatte mit strukturierter Hohlraumgeometrie unter dynamischer Belastung

M. Sc. S. Seitz
Universität der Bundeswehr München
Institut für Mechanik
München

info@unibw.de

Prof. Dr. M. Johlitz
Universität der Bundeswehr München
Institut für Mechanik
München

info@unibw.de

Prof. Dr. A. Lion
Universität der Bundeswehr München
Institut für Mechanik
München

info@unibw.de

Verträglichkeit von Elastomeren mit Pyrolyseölen

Die Verknappung fossiler Ressourcen erfordert alternative Energieträger zur Sicherung der Energieversorgung. Die Pyrolyse von Kunststoffabfällen bietet einen vielversprechenden Ansatz zur Gewinnung flüssiger Energieträger. In dieser Studie werden Pyrolyseöle im Labormaßstab hergestellt, analysiert und ihre Verträglichkeit mit dem Elastomer Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) untersucht.

Im militärischen Sektor ist die Versorgungssicherheit dringend erforderlich, wodurch die Suche nach alternativen flüssigen Energieträgern von besonderer Bedeutung ist. Dabei kann die Pyrolyse von Kunststoffen aus Verpackungsmaterialien oder gebrauchten Reifen einen Baustein darstellen, um flüssigen Kraftstoff mit hohem Energiegehalt herzustellen. Das Kernziel der Untersuchungen ist es, in Zukunft Kraftstoffe dezentral im Feldeinsatz mit kleinen Anlagen herstellen zu können, um die Kraftstoffversorgung für Fahrzeuge und die Stromerzeugung in Generatoren zu unterstützen.

Die Pyrolyseöle in dieser Arbeit werden mit einer Laborpyrolyse (Abb. 1) bei hohen Temperaturen unter Sauerstoffausschluss hergestellt. Als Ausgangsmaterial wird Polypropylen (PP) mit unterschiedlichen Anteilen an beigemischtem Polystyrol (PS) verwendet (Abb. 2). Für die sichere Nutzung der Pyrolyseöle im militärischen Bereich müssen die physikochemischen Eigenschaften der neu entwickelten, alternativen flüssigen Kraftstofftypen sowie das Quellverhalten von Elastomerbauteilen bewertet werden. Hierfür werden die Pyrolyseöle nach der Norm DIN EN 590 für Dieselkraftstoff geprüft und tiefgehend mit modernsten Techniken analysiert, um

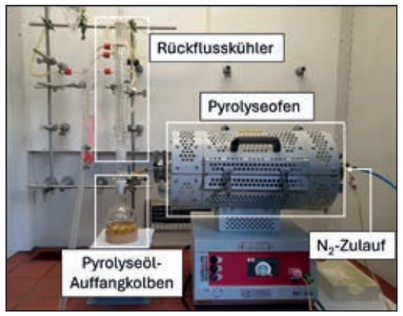


Abb. 1: Laborpyrolyseanlage bestehend aus Stickstoffzulauf, Pyrolyseofen, Kondensationskolben und Rückflusskühler zur Pyrolyse von Kunststoffen

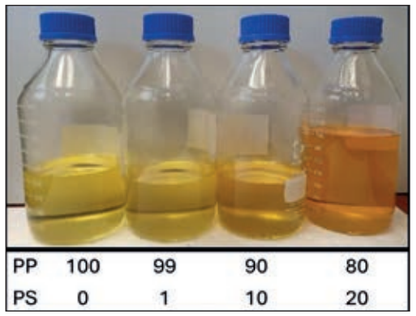


Abb. 2: Pyrolyseöle hergestellt aus Polypropylen (PP) mit unterschiedlichen Anteilen Polystyrol (PS)

RDir Prof. Dr. S. Eibl
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoff (WIWeB)
Erding

wiweb@bundeswehr.org

RDir Dr. T. Förster
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoff (WIWeB)
Erding

wiweb@bundeswehr.org

deren potenzielle Verwendung als Kraftstoff zu bewerten. Das Quellverhalten wurde über Sorptionsversuche mit dem Elastomer Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR), welches in Fahrzeugen in Schläuchen, Dichtungen und Tankauskleidungen zum Einsatz kommt, beurteilt. Hierfür wurden die Massenänderung sowie der Einfluss der Quellung auf die mechanischen Eigenschaften des NBR untersucht.

Bei der Pyrolyse von Polypropylen entstehen überwiegend verzweigte, ungesättigte Kohlenwasserstoffe. Durch die Zugabe von Polystyrol zum Ausgangsmaterial entstehen zusätzlich Styrol und im geringen Umfang weitere aromatische Kohlenwasserstoffe. Mittels verschiedener sensitiver Methoden wie beispielsweise der Infrarot-Spektroskopie kann Styrol bereits in geringen Mengen nachgewiesen werden (Abb. 3). Die Beimischung von Polystyrol als Ausgangsstoff beeinflusst die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Pyrolyseöls signifikant, beispielsweise hinsichtlich der Dichte, Viskosität und des Destillationsverlaufes. Dadurch nähern sich die Eigenschaften und die Zusammensetzung des Pyrolyseöls denen von fossilem Dieselkraftstoff an. Zur weiteren Bewertung potenzieller Einsatzfelder wurden Verträglichkeitsuntersuchungen durchgeführt. Während der Lagerung diffundiert das aus PP/PS-Gemischen gewonnene Pyrolyseöl ins Elastomer, wodurch es zu einer Massenzunahme kommt (Abb. 4). Mit steigendem PS-Anteil im Ausgangsmaterial nimmt die Massenänderung des NBRs zu. Somit kann festgehalten werden, dass mit PS versetzte Pyrolyseöle eine höhere Affinität zum Elastomer aufweisen. Diese Massenzunahme korreliert mit einer Verschlechterung der mechanischen Kennwerte, insbesondere der Härte. Mit zunehmender PS-Zugabe verändern sich somit sowohl die Diffusionseigenschaften als auch die mechanischen Materialeigenschaften signifikant. Dieser Zusammenhang verdeutlicht die zentrale Bedeutung der detaillierten chemischen Zusammensetzung der Pyrolyseöle, da sowohl physikalisch-chemische Kennwerte als auch Materialverträglichkeit maßgeblich von der Polymerzusammensetzung des Ausgangsmaterials abhängen.

Die bis dato vorliegenden Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen grundlegende Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Kunststoffmaterialien und den Eigenschaften der daraus gewonnenen Pyrolyseöle, insbesondere im Hinblick auf deren Verträglichkeit mit Elastomeren. Aufbauend auf weiteren Untersuchungsergebnissen soll eine fundierte Bewertung des potenziellen Einsatzes kunststoffbasierter Pyrolyseöle als flüssiger Energieträger erfolgen. Ergänzend sind weiterführende Untersuchungen zu anderen Ausgangsmaterialien sowie zu möglichen Einflüssen durch Fremdstoffkontaminationen im Rahmen zukünftiger Studien vorgesehen.

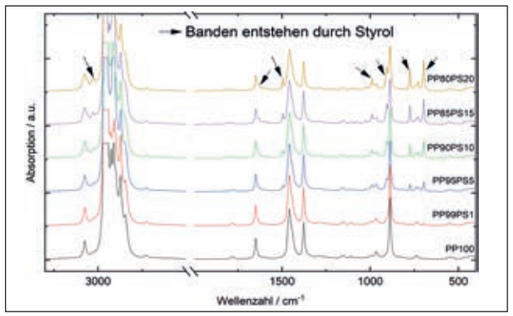


Abb. 3: Infrarotspektroskopische (FTIR)-Analysen von Pyrolyseölen aus Polypropylen und Polystyrol in unterschiedlichen Anteilen mit Bandenzuordnung zu Strukturelementen

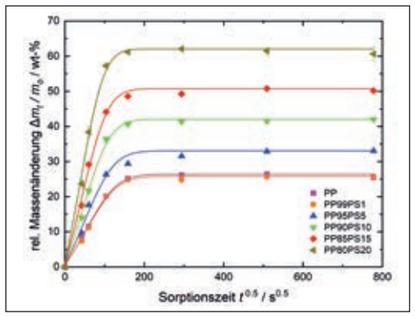
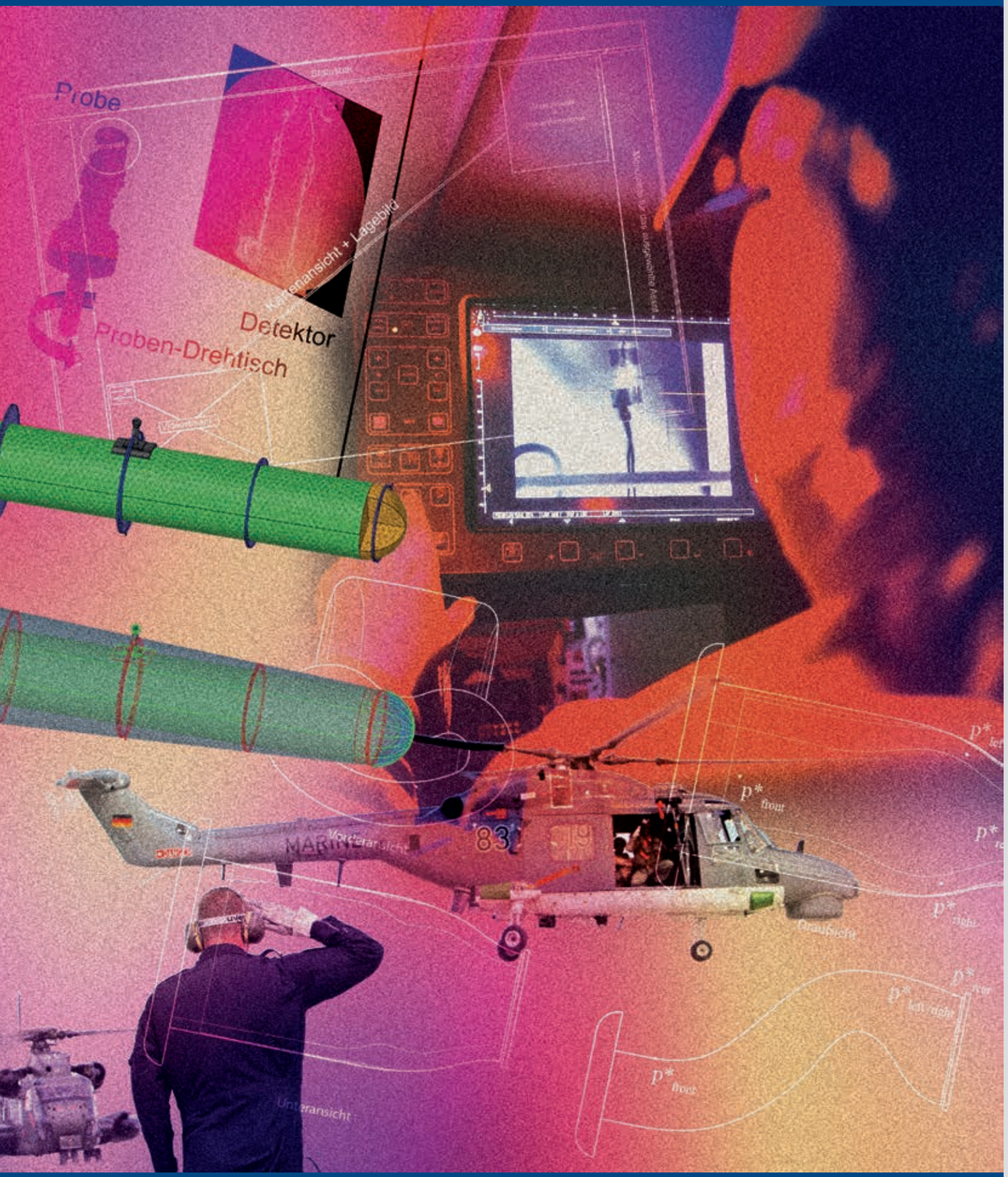


Abb. 4: Massenänderung von NBR nach Lagerung in Pyrolyseöl aus Polypropylen und Polystyrol in Abhängigkeit von der Lagerungszeit


Probe
Detektor
Proben-Drehtisch
Kamerasicht + Lagebild
MARINE
Vorderansicht
Draufsicht
Unteransicht

7



Anhang

Bundesministerium der Verteidigung

Bundesministerium
der Verteidigung
Postfach 13 28
53003 Bonn
Internet: www.bmvg.de

Abteilung Innovation und Cyber – Referat IC II 1
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 45 50
E-Mail: BMVgICII1@bmvg.bund.de

Abteilung Innovation und Cyber – Referat IC II 2
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 75 30
E-Mail: BMVgICII2@bmvg.bund.de

Abteilung Innovation und Cyber – Referat IC II 3
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 46 50
E-Mail: BMVgICII3@bmvg.bund.de

Abteilung Innovation und Cyber – Referat IC II 5
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 2 61 21
E-Mail: BMVgICII5@bmvg.bund.de

Hauptabteilung Streitkräfte – Referat SK III 1
Tel.: +49 (0) 30 / 20 04 - 2 48 59
E-Mail: BMVgSKIII1@bmvg.bund.de

Hauptabteilung Streitkräfte – Referat SK III 7
Tel.: +49 (0) 30 / 20 04 - 2 48 38
E-Mail: BMVgSKIII7@bmvg.bund.de

Abteilung Zentrales – Referat Z II 3
Tel.: +49 (0) 30 / 18 24 - 1 33 50
E-Mail: BMVgZII3@bmvg.bund.de

Hauptabteilung Aufwuchs – Referat A I 8
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 2 31 51
E-Mail: BMVgAI8@bmvg.bund.de

Wehrtechnische Dienststelle für Schutz-und Sondertechnik (WTD 52)
Oberjettenberg
83458 Schneizlreuth
Tel.: +49 (0) 86 51 / 76 82 - 10 01
E-Mail: WTD52posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd612

Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät
der Bundeswehr (WTD 61)
Flugplatz
85077 Manching
Tel.: +49 (0) 84 59 / 80 - 1
E-Mail: WTD61posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd61

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie
und Forschung (WTD 71)
Berliner Straße 115
24340 Eckernförde
Tel.: +49 (0) 43 51 / 467 - 0
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
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
E-Mail: WTD91posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wtd91

Wehrwissenschaftliches Institut
für Schutztechnologien – ABC-Schutz (WIS)
Humboldtstraße 100
29633 Munster
Tel.: +49 (0) 51 92 / 136 - 201
E-Mail: WISposteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wis

Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-und Betriebsstoffe (WIWeB)
Institutsweg 1
85435 Erding
Tel.: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 0
E-Mail: WIWeBposteingang@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/wiweb

Zentrum für Geoinformationswesen
der Bundeswehr
Frauenberger Straße 250
53879 Euskirchen
Tel.: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 00
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
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
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
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
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-bundeswehr-in-muenchen/institut-fuer-radiobiologie-der-bundeswehr-in-muenchen

Schifffahrtmedizinisches Institut der Marine
Kopperpahler Allee 120
24119 Kronshagen
Tel.: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 01
E-Mail: SchiffMedInstM@bundeswehr.org
Internet: https://www.bundeswehr.de/de/organisation/marine/struktur/schifffahrtmedizinisches-institut

Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Aktienstraße 87
56626 Andernach
Dienstorte:
Andernach und Koblenz
Tel.: + 49 (0) 2632 / 946 - 2 2000
E-Mail: InstPraevMedBw@bundeswehr.org
Internet: https://www.instpraevmedbw.de/

Bundeswehrzentralkrankenhaus Koblenz
Rübenacher Straße 170
56072 Koblenz
Tel.: +49 (0) 261 / 281 - 89
E-Mail: BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org
Internet: https://www.bwkrankenhaus.de/de/bundeswehrzentralkrankenhaus-koblenz

Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Scharnhorststraße 13
10115 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 0
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org
Internet: https://www.bwkrankenhaus.de/de/bundeswehrkrankenhaus-berlin

Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
Lesserstraße 180
22049 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 / 69 47 - 0
E-Mail: BwKrhsHamburg@bundeswehr.org
Internet: https://www.bwkrankenhaus.de/de/bundeswehrkrankenhaus-hamburg

Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Oberer Eselsberg 40
89081 Ulm
Tel.: +49 (0) 731 / 17 10 - 0
E-Mail: BwKrhsUlm@bundeswehr.org
Internet: https://www.bwkrankenhaus.de/de/bundeswehrkrankenhaus-ulm

Psychotraumazentrum der Bundeswehr
Im Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Scharnhorststraße 13
10115 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 0
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org
Internet: https://www.bwkrankenhaus.de/de/bundeswehrkrankenhaus-berlin

Planungsamt der Bundeswehr
Oberspreestraße 61L
12439 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 67 94 - 19 13
E-Mail: plgabwldi@bundeswehr.org
Internet: https://www.bundeswehr.de/de/organisation/unterstuetzungsbereich/planung-zukunft/planungsamt-in-berlin

Innovationszentrum der Bundeswehr
Landshuter Str. 70 und Wartenberger Str. 25
85435 Erding
Tel.: +49 (0) 8122 / 945 1012
E-Mail: baainbwinnozbw@bundeswehr.org
Internet: https://www.bundeswehr.de/de/organisation/ausruestung-baainbw/struktur/innozbw

Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
Postfach 70 08 22
22008 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 / 65 41 -1
E-Mail: forschung@hsu-hh.de
Internet: www.hsu-hh.de

Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Tel.: +49 (0) 89 / 60 04 - 0
E-Mail: info@unibw.de
Internet: www.unibw.de

Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis
Postfach 27
79590 Binzen
F-68300 Saint-Louis
Tel.: +33 (0) 389 / 69 50 - 00
E-Mail: isl@isl.eu
Internet: www.isl.eu

Fraunhofer VVS

Fraunhofer-Leistungsbereich
Verteidigung, Vorbeugung und
Sicherheit VVS
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210
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
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
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
E-Mail: kontakt@fkie.fraunho-
fer.de
Internet: www.fkie.fraunhofer.de

Fraunhofer IAF

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF
Tullastraße 72
79108 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 51 59 - 261
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
Tel.: +49 (0) 721 / 46 40 - 115
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

Standort Ettlingen
Gutleuthausstraße 1
76275 Ettlingen
Tel.: +49 (0) 72 43 / 992 - 131
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
E-Mail: PD-S@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
E-Mail: PD-S@dlr.de
Internet: www.dlr.de/ft

DLR

Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und
Radarsysteme DLR HR
Münchener Straße 20
82234 Weßling
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 23 05
E-Mail: PD-S@dlr.de
Internet: www.dlr.de/hr

DLR

Institut für Weltraumforschung DLR WR
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin-Adlershof
Tel.: +49 (0) 30 / 6 70 55 - 0
E-Mail: PD-S@dlr.de
Internet: www.dlr.de/wr

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
E-Mail: PD-S@dlr.de
Internet: www.dlr.de/tp

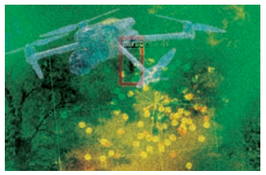
DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
DLR BT
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 - 444
E-Mail: PD-S@dlr.de
Internet: www.dlr.de/bt

DLR

Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt
Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle
Satellitenverbringung DLR RS
Eugen-Sänger-Str. 50
29328 Faßberg
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 - 714
E-Mail: PD-S@dlr.de
Internet: www.dlr.de/rs





HERAUSGEBER
Bundesministerium der Verteidigung
Abteilung Innovation und Cyber – Referat IC II 2
Fontainengraben 150
53123 Bonn

INHALTLICHE BETREUUNG
Fraunhofer FKIE
Abteilung Innovationsforschung und Technologieanalysen (INT)
Euskirchen

GESTALTUNG
designlevel 2, Meerbusch

DRUCK
Kern GmbH, Bexbach

STAND
Juli 2026

Druckprodukt mit finanziellem
Klimabeitrag
ClimatePartner.com/11531-2609-1039

FOTOS
Wenn nicht explizit ausgezeichnet, stammen die Abbildungen aus den Beiträgen von den jeweiligen Autoren.

Seite	
1	©Bundeswehr/Jana Neumann
	©Bundeswehr/Christian Timmig
	©Bundeswehr/Björn Wilke
2/3	©Bundeswehr
	©Bundeswehr/Björn Wilke
	©Bundeswehr/Marco Dorow
4	©Bundeswehr/Christian Timmig
	©Bundeswehr/Marcel Kröncke
6	©Bundeswehr/PAO Mittelmeer
7	©Bundeswehr/Torsten Kraatz
8	©Bundeswehr/Herholt
	©Bundeswehr/Nico Theska
9	©Bundeswehr/Jana Neumann
10	©Bundeswehr/Andrea Bienert
	©Bundeswehr/FK Wolff
16/17	©BWI GmbH
34	©rechts, SpaceX
55	©SpaceX
82	©PTZ/Frank Eggen
83	©Bundeswehr/Marc Tessensohn
86	©Bundeswehr/Jana Neumann
	©Bundeswehr/Nimpsch
	©Bundeswehr/ZMSBw
88	©Bundeswehr/ZMSBw
89	©Bundeswehr/Nimpsch
92	©Bundeswehr/Jana Neumann
	©Bundeswehr/Rolf Klatt
	©Bundeswehr/Tom Twardy
106	©Bundeswehr/Michael Mandt
	©Bundeswehr/Carsten Vennemann
107	©Bundeswehr/Torsten Kraatz