



Bundesministerium
der Verteidigung

Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2022

Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte



BUNDESWEHR

Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2022

Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte

COMPOSITION OF FOCUS GROUPS

Ambulance Service

- Military Paramedic
- Military Paramedic in training
- Military EMT in training

Average age: 27.7 years (22-34)

Average age: 42.6 years (31-58)

Military Physician



Emergency Room

Air Ambulance Crew + Police First Responders

- Emergency Physician
- Paramedic / HEMS (only ♂)
- Police First Responder (only ♂)

Average age: 4 years

Emergency Call Center

Total: 9-10

Ministerialdirigent Alexander Schott

Unterabteilungsleiter A III und Forschungsbeauftragter
Bundesministerium der Verteidigung

Wehrwissenschaftliche Forschung für die Streitkräfte

Der völkerrechtswidrige Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine hat die Grundlagen der europäischen Friedensordnung tief erschüttert und insbesondere unsere Verteidigungs- und Bündnisfähigkeit auf den Prüfstand gestellt. Die durch den Bundeskanzler festgestellte „Zeitenwende“ ist für alle Bereiche der Bundeswehr prägend. Die erforderlichen Anstrengungen für eine umfassend einsatzbereite Bundeswehr gehen weit über kurzfristig aus dem „Sondervermögen Bundeswehr“ und insgesamt schneller umzusetzende Beschaffungen von Wehrmaterial hinaus. Unser sicherheitspolitisches Umfeld und unsere Verantwortung für die europäische und transatlantische Sicherheit erfordern umfassende und dauerhafte nationale Beiträge zur Verteidigungsfähigkeit der Bundesrepublik und unserer Verbündeten.

Der wehrwissenschaftlichen Ressortforschung mit ihren Forschungsbereichen

- wehrtechnische Forschung,
 - wehrmedizinische und militärpsychologische Forschung,
 - militärgeschichtliche und sozialwissenschaftliche Forschung,
 - geowissenschaftliche Forschung und
 - Cyber- / informationstechnische Forschung
- kommt hierbei die Rolle der Zukunftssicherung zu.

Welche Bedeutung ein technologischer Vorsprung in einem heutigen Konflikt besitzt, belegt nicht

zuletzt der andauernde erfolgreiche Widerstand der Ukraine gegen die Angriffe der russischen Streitkräfte und paramilitärischen Einheiten.

Um die Herausforderungen der Zeitenwende zur Sicherstellung der Landes- und Bündnisverteidigung und des Friedens meistern zu können, muss verfügbare Hochtechnologie schnell in die Truppe gelangen. Der konzeptionelle und technologische Vorsprung der westlichen Nationen muss aber langfristig erhalten und ausgebaut werden, um eine friedenserhaltende Abschreckungswirkung zu gewährleisten. Das ist das übergeordnete Ziel unserer wehrwissenschaftlichen Forschung.

Die Fähigkeit zur Analyse und Bewertung von Trends und Technologien, die durch eine gewachsene und ständig weiterentwickelte wehrwissenschaftliche Forschung garantiert werden kann, ist eine unverzichtbare Grundlage für vielfältige Entscheidungen – von der bedarfsgerechten Auswahl und Nutzung von leistungsfähigem und sicherem Wehrmaterial über die sorgfältige und qualifizierte medizinische Behandlung von Verwundeten bis hin zu Aspekten der Operationsführung.

Bei aller richtigen Fokussierung auf die unmittelbare Sicherstellung der nachhaltigen Einsatzfähigkeit der Bundeswehr ist eine starke wehrwissenschaftliche Forschung aber auch für die sicherheitspolitische Handlungs- und Strategiefähigkeit Deutschlands



essentiell. Der Ukraine-Krieg hat offengelegt, wie verletzlich Lieferketten sind und welche Probleme die Abhängigkeit von Rüstungsgütern aus anderen Staaten mit sich bringen kann. Sowohl zur Reduzierung dieser Abhängigkeiten als auch zum Erhalt und Ausbau der technologischen Souveränität Deutschlands und Europas trägt die wehrwissenschaftliche Forschung in einem erheblichen Maße bei. Während es schließlich unsere Partner, die deutsche Forschungslandschaft und die Unternehmen der deutschen Wirtschaft sind, die unserer Souveränität durch wissenschaftliche und technologische Stärke sichern, sind deren Erkenntnisse und Produkte in vielen Fällen erst durch die wehrwissenschaftliche Forschung ermöglicht worden.

Die wehrwissenschaftliche Ressortforschung des Bundesministeriums der Verteidigung kann die notwendigen Erkenntnisse aber nicht alleine erzielen. Für eine umfassende Erfüllung ihrer Aufgaben ist die Kooperation mit der nationalen zivilen Forschungsgemeinschaft und unseren internationalen Partnern zwingend erforderlich. Im internationalen Bereich ist die bi- oder multilaterale Zusammenarbeit gleichermaßen wichtig. Multilateral ist die Zusammenarbeit über die Europäische Verteidigungsagentur EDA oder im Rahmen der NATO Science and Technology Organization gegeben, um Forschungsfragestellungen durch Lastenverteilung und Zusammenführung der jeweiligen Expertise angehen zu können. In der bilateralen Zusammenarbeit mit

unseren starken Partnerationen gilt es – bei immer begrenzten Mitteln und wissenschaftlichen Fähigkeiten – im Zusammenbringen, die Kräfte zu generieren, die uns noch effektiver zu unseren hohen Zielen führen.

Hier hat der russische Angriffskrieg ein noch engeres Zusammenrücken bewirkt. Internationale Kooperationen wurden und werden verstärkt, nationale Berührungspunkte zwischen den zivilen Forschenden und der wehrwissenschaftlichen Forschung abgebaut. Die Bedeutung des Letzteren wird auch durch eine entsprechende Handlungsempfehlung im diesjährigen Gutachten zur Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands unterstrichen: Hier empfiehlt die Expertenkommission Forschung und Innovation, die bestehende strikte Trennung von militärischer und ziviler Forschung zu überwinden, um Synergien zu schaffen.

Mit den Beiträgen in diesem ‚Jahresbericht Wehrwissenschaftliche Forschung für die Streitkräfte‘ möchten wir Ihnen einen Einblick in unsere aktuellen und vielfältig ausgerichteten Forschungsthemen geben. Wir adressieren hierin Themen, die absolut am Puls der Zeit liegen. So beschäftigen sich gleich drei Beiträge mit dem hochaktuellen Thema der Detektion (und Abwehr) von Hyperschallflugkörpern. Unter diesen Beiträgen sticht der Kleinsatellit ERNST hervor, mit dem weltraum-

gestützte Verfahren zur Detektion von Raketen und hypersonischen Flugkörpern erforscht werden sollen. Er besitzt bereits einen solch hohen technologischen Reifegrad, dass sein Start zur Technologie-demonstration in Kooperation mit der US Space Force für 2024 geplant ist.

Neben solchen omnipräsenten Themen gibt es aber auch viele Beiträge, die thematisch weniger prominent sind. Nichtsdestotrotz haben gerade die Bilder von ukrainischen Traktorfahrern, die im Schlamm aufgegebene russische Panzer abschleppen und einer Folgeverwendung in der eigenen Armee zuführen, gezeigt, wie unentbehrlich auch Themen sind, die nicht unmittelbar im Fokus stehen, wie z. B. die Geländebefahrbarkeit, die aber im Hinblick auf die sichere Verlegung eigener Truppen oder auch zur Abschätzung feindlicher Bewegungsachsen essentiell ist. Aus diesem Grund möchte ich Ihnen auch den Beitrag zu den Geländebefahrbarkeitskarten ans Herz legen. Neben den zuvor genannten Beispielen finden Sie im Jahresbericht 2022 noch viele weitere bedeutende Beiträge aus den fünf Forschungsbereichen der wehrwissenschaftlichen Forschung, die illustrativ belegen, dass die Zeitwende in der wehrwissenschaftlichen Forschung angekommen ist.

In den nächsten Jahren wird es unser Schwerpunkt sein, die Erkenntnisse aus der wehrwissenschaftlichen Forschung durch ein engeres Zusammenspiel



zwischen Forschenden und Nutzenden schneller in die Streitkräfte zu bringen und unseren technologischen Vorsprung zuverlässig zu gewährleisten. Denn eines muss uns bewusst sein: Technologien, die derzeit in der Ukraine im Einsatz sind, können erbeutet, ausgewertet und geteilt werden. Folglich werden auch potentielle Gegner in Zukunft über diese Technologien verfügen. Somit sind noch stärkere Bemühungen von unserer Seite erforderlich, neue Technologien schnell zu operationalisieren und technologische und operationelle Überlegenheit in Zukunft zu garantieren. Dies kann nur gemeinsam mit der nationalen Gemeinschaft der Forschenden und unseren internationalen Partnern angegangen werden.

Gemeinsam wird es uns gelingen, den besonderen Herausforderungen und Aufgaben für die Bundeswehr zu entsprechen. Die wehrwissenschaftliche Forschung in Deutschland wird im Zusammenspiel mit den militärischen Nutzern weiterhin ihren Beitrag zur Stärkung der Einsatzbereitschaft, der technologischen und operationellen Überlegenheit und damit zur Zukunftsfähigkeit der Bundeswehr leisten. Davon bin ich überzeugt! Das ist unser Anspruch!

Alexander Schott

Alexander Schott, den 25. Juli 2023



Durch Anklicken direkt zum Artikel gelangen

Vorwort 05 Wehrwissenschaftliche Forschung für deutsche Streitkräfte

Teil 1 13 Wehrtechnische Forschung

- 14 Stellungswahlassistent – Geländeauswertung zur Unterstützung der Operationsplanung und der Gefechtsführung
- 16 Effiziente Videobildauswertung durch blickbasierte Interaktion und Künstliche Intelligenz
- 18 Erster Kleinsatellit für die Bundeswehr – Raketendetektion mit dem 12U-CubeSat ERNST
- 20 Innenballistik-Softwarefamilie SimIB für die Auslegung der nächsten Generation Rohrmaschinen der Bundeswehr
- 22 Passiv-Radar mit Starlink-Satelliten
- 24 Metamaterialien für Antennen mit elektronischer Strahlenschwenkung
- 26 Automatisierte Planung zur Unterstützung der abgessenen Infanterie durch UGVs
- 28 Effiziente Hochvolt-GaN-Transistoren für Radaranwendungen
- 30 Auf dem Weg zur Einzelphotonenkamera für aktive Bildgebung im kurzwelligen Infrarot
- 32 Aktive Verwindungsrotoren für den modernen Hubschrauber
- 34 Informationsfusion von verschiedenen Fernerkundungssensoren
- 36 Automatisierte Luftbetankung
- 38 Radarsignaturbestimmung und Bewertung militärischer Fluggeräte
- 40 Untersuchung der instationären Aerodynamik eines Remote Carriers während des Flügelschwenkvorgangs
- 42 Verifikation von Kameras für den Einsatz im Rahmen des Vertrags über den Offenen Himmel
- 44 Das Johannes Kepler Observatorium des DLR: Eine einzigartige Bodenstation zur laseroptischen Bewertung der Weltraumlage
- 46 OTTER – Maritimes Lagebild
- 48 Raumgestützte Raketensignaturvermessung mit Infrarot-Kleinsatelliten anhand von Abbrandversuchen am Boden
- 50 Neuronale Netze zur Bestimmung des Verhaltens von Reaktivschutz



- 52 SiC-basierte Leistungshalbleiter-Bauelemente für die wehrtechnische Anwendung
- 54 Inflation bei Rüstungsgütern: Auswirkung der Teuerung auf die Beschaffung von Waffensystemen
- 56 Satellitenkommunikation „to go“ – Entfaltbares Leichtbau-Manpack-Antennensystem
- 58 Aerodynamische Charakterisierung drallstabilisierter Geschosse bei Steilschüssen
- 60 Reaktive Strukturmaterialien – Interdisziplinäre und multiskalige Grundlagenforschung in Experiment und Simulation
- 62 Integration Additiver Fertigung in die Deutsche Marine
- 64 Führungskulturen im digitalen Zeitalter – Der Fall der Bundeswehr „FüKu.Bw“
- 66 A l'étranger avec des amis: Zufriedenheit und Commitment der Bundeswehrangehörigen und ihrer Familien am neuen Standort Évreux, Frankreich
- 68 Leistungselektronik für Hochleistungspulsanwendungen am Beispiel einer kompakten Energieversorgung elektrischer Waffen
- 70 Digitalisierung mitgestalten: Bildungsforschung zur Stärkung gesellschaftlicher Resilienz in unsicheren Zeiten
- 72 Konzeptioneller Aufbau eines ganzheitlichen Surrogats zur Prüfung von nichtletalen Wirkmitteln in Form von kinetischen Projektilen
- 74 Aktive Beeinflussung der Unterwasserschallsignatur von Marineeinheiten
- 76 Eine Methode zur verbrennungstechnischen Untersuchung synthetischer und alternativer Kraftstoffe
- 78 Umsetzung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von Vorfiltrationstechnologien für die Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächengewässern
- 80 Digitales Einkleiden „BundesWEAR“
- 82 Additive Fertigung von ultrahochmolekularem Polyethylen
- 84 Das Engine Mission Simulation System: Triebwerkssimulation in der virtuellen Flugmission
- 86 Parametrische Spektralschätzung für die Analyse hydroakustischer Zeitreihen
- 88 Demonstrator für die Simulation der Bi- und Multistatischen U-Jagd
- 90 Postfossiles Energiemanagement in der Bundeswehr: Bundeswehrrelevante Stromspeicher und Energiewandler für erneuerbare Energien

**Teil 2**

- 92 Leistungsgesteigerte Unterwassersprengstoffe
- 94 Moderne Leistungsbestimmung von Sprengstoffen
- 96 „Meaningful Human Control“ von Automatisierung und KI in Waffensystemen
- 99 Wehrmedizinische und Militärpsychologische Forschung**
- 100 Schneller Nachweis von *Yersinia pestis* mittels Rezeptorbindeproteinen aus Bakteriophagen
- 102 Alternativmethoden zum Tierversuch: Etablierung von humanen Lebersphäroiden und Untersuchungen zur Lebertoxizität
- 104 Gefährdung durch Hitzestress in geschützten Fahrzeugen: Herausforderungen und Lösungswege
- 106 Auswertung medizinischer Befunde nach akzidenteller Exposition von frühem Fallout beim atmosphärischen Kernwaffen-Versuch „Castle Bravo“
- 108 Mental fit zurück in den Dienst – Evaluation eines medizinisch-dienstlich orientierten Rehabilitationstrainings für psychische Erkrankungen
- 110 Psychische Beanspruchungen und Belastungsfolgen im UAS HERON 1 – Eine empirische Studie
- 112 Erprobung und Evaluierung circadianer Seewachsysteme für die Deutsche Marine
- 114 Patientensicherheit in der Notfallmedizin: Risikoanalyse von latentem Informationsverlust
- 116 Das Human Extremity Recovery Ordnance (H.E.R.O.)-Projekt – Ex-vivo Perfusion von Extremitäten zur erfolgreichen Re- und Transplantation
- 118 Forschungsverbund Süd (FvS) – Schulterchluss zwischen dem Bundeswehrkrankenhaus Ulm und der Universität der Bundeswehr München für die zukünftige universitäre Traumaforschung
- 120 Auswirkung der körperlichen und psychischen Belastungen während der Kampfschwimmerausbildung – Eine sportmedizinische und sportpsychologische Untersuchung
- 122 Quantenzählender CT-Scanner im Schockraum-Setting – Diagnostikoptimierung polytraumatisierter Patienten
- 124 Neue Ergebnisse einer Längsschnittstudie zu psychischen Störungen nach Auslandseinsätzen der Bundeswehr

**22****Teil 3****127 Militärgeschichtliche und Sozialwissenschaftliche Forschung**

- 128 Katholische Friedensarbeit im Kalten Krieg unter besonderer Berücksichtigung der beiden deutschen Staaten
- 130 Die ZMSBw-Bevölkerungsbefragung als Gradmesser des verteidigungspolitischen Meinungsbilds

Teil 4**133 Geowissenschaftliche Forschung**

- 134 Geländebefahrbarkeitskarten mit CCMoD (Cross-Country Modell)
- 136 MoGLi: Eine Anwendung zur GPS – Integritätsanalyse

Teil 5**139 Forschung Cyber / Informationstechnik**

- 140 Kommerziell verfügbare 5G-Mobilfunktechnologie für die taktische Kommunikation
- 142 Die Etablierung des C2SIM-Informationsstandards in der NATO
- 144 Analyse smartphonebasierter Malware (Smartphoneforensik)

Teil 6**147 Anhang**

- 148 Adressen und Kontakte
- 154 Impressum

1

Wehrtechnische Forschung

Der völkerrechtswidrige Angriff Russlands auf die Ukraine hat die wehrtechnische Forschung im Jahr 2022 stark beeinflusst:

Zunächst ermöglicht er einen sehr objektiven Blick auf den Kampfwert unserer Wehrtechnik gegenüber einem Gegner mit Material und Einsatzgrundsätzen russischer Herkunft.

Zudem belegte der bisherige erfolgreiche Widerstand der Ukraine, welcher auch durch überlegene westliche Waffensysteme getragen wurde, grundlegend die Notwendigkeit und Wichtigkeit der wehrtechnischen Forschung. Diese Waffensysteme, die heute von den Verteidigern der Ukraine hochgelobt werden, sind unter anderem die Ergebnisse der wehrtechnischen Forschung der vergangenen Jahrzehnte. In ihnen sind Technologien enthalten, die zum Teil im Rahmen der wehrtechnischen Forschung von der Vorlaufforschung über die Angewandte Grundlagenforschung bis hin zum prototypischen Nachweis bei uns oder unseren Partnern in EU und NATO gereift sind.

Des Weiteren ist die im Rahmen der wehrtechnischen Forschung und Technologie aufgebaute Analyse- und Bewertungsfähigkeit derzeit für die Umsetzung des Sondervermögens gefragt. Auch wenn zur schnellen Ausstattung der Bundeswehr vielfach am Markt verfügbare Produkte gekauft werden, stellt sich bei deren Beschaffung noch immer die Frage „Welches ist das richtige und vor allem das zukunftssichere Produkt?“ Genau diese Frage kann aber nur auf Basis der wehrtechnischen Forschung und ihrer Analyse- und Bewertungsfähigkeit beantwortet werden. Der kontinuierliche Erhalt dieser Analyse- und Bewertungsfähigkeit ist genauso wichtig, wie die Verfügbarmachung von neuen

Technologien. Denn nur durch sie können neue Bedrohungen frühzeitig technisch eingeordnet, Anforderungen an neue Technologien definiert und zu beschaffende Waffensysteme bewertet werden.

Zusätzlich schrumpft mit jedem System, welches zur Unterstützung an die Ukraine abgegeben wird, potentiell auch unser technologischer Vorsprung. Jeder Abgabe haftet immanent die Gefahr an, dass das System erbeutet und ausgewertet wird. Folglich muss unsere wehrtechnische Forschung ihre Anstrengungen erhöhen, um zusammen mit unseren internationalen Partnern neue Technologien zu erschließen und so einen ausreichenden technologischen Vorsprung zu erhalten.

Verschärfend haben der Ukrainekrieg aber auch die vorherige Pandemie die Verletzlichkeit unserer Lieferketten und die Wichtigkeit einer europäischen technologischen Souveränität aufgezeigt. Auch zur Sicherheit der Lieferketten und Weiterentwicklung der technologischen Souveränität trägt die wehrtechnische Forschung maßgeblich bei.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die wehrtechnische Forschung nach der Zeitenwende wichtiger denn je ist und einen großen Aufgabenumfang zu bewältigen hat. Nichtsdestotrotz haben sich einige Forschende aus der wehrtechnischen Forschung dankenswerterweise die Zeit genommen, Ihnen ihre Forschungsergebnisse aus dem Jahr 2022 zu präsentieren. Ihre Beiträge finden Sie auf den nachfolgenden Seiten.



Stellungswahlassistent – Geländeauswertung zur Unterstützung der Operationsplanung und der Gefechtsführung

Die Geländeauswertung ist tief im Führungsprozess der Landstreitkräfte verwurzelt. Sie kostet jedoch durch Kartenstudium und Geländebegehungen wertvolle Aufmerksamkeit und Zeit. Insbesondere letztere ist in der Gefechtsvorbereitung ein knappes Gut. Eine automatisierte Geländeauswertung kann den militärischen Führer entlasten und die Entscheidungsfindung beschleunigen.

Im Führungsprozess der Landstreitkräfte vereinen sich Handwerk und Kunst des militärischen Führers, um zu einer sinnvollen Entscheidung zu finden. Von der Auswertung des Auftrags bis zum Entschluss fließen viele Einflussfaktoren ein, die in die Kategorien Gegner / andere Akteure, eigene Kräfte, Geofaktoren, zivile Lage, Informationsumfeld und sonstige Faktoren unterteilt werden.

Am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB wurden bei der Suche nach Ansatzpunkten zur Entwicklung von Assistenzfunktionen die Geofaktoren als besonders geeignet bewertet. Das Studium der Karte ist im Detail oft mühselig und zeitraubend. Es ist oft wenig kreativ, sodass das Potenzial zur Automatisierung hoch ist. Auch kann die Karte nur einen Teil der verfügbaren Geländeinformationen abstrahiert bereitstellen. Durch eine Maschine hingegen sind weitergehende und detailliertere Informationen auswertbar. So werden etwa Höheninformationen nur grob durch Höhenlinien dargestellt, während diese teilweise digital in Auflösungen unter einem Meter vorliegen. Hier besteht das Potenzial zur Entlastung des

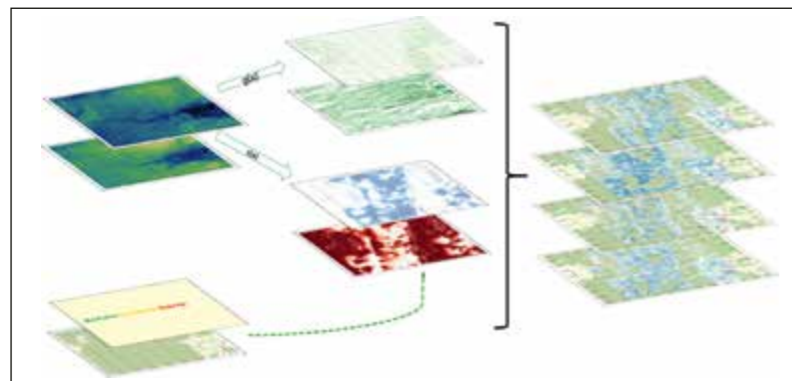


Abb. 1: Funktionsprinzip: Aus verfügbaren Geodaten (erste Spalte) wird das Gelände bezüglich einzelner Parameter bewertet (zweite Spalte, Ergebnis in Kartenform). Diese werden dann je nach Lage und Waffensystemparametern gewichtet und kombiniert (dritte Spalte)

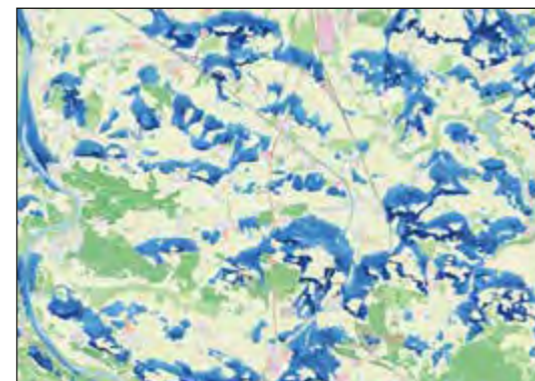


Abb. 2: Stellungswertkarte (SWK): Blau markiert sind potenziell gute Stellungen. Je dunkler das Blau, desto größer die Wahrscheinlichkeit, eine gute Stellung vorzufinden

Nutzers und zur Beschleunigung des Führungsprozesses. Aus dieser Erkenntnis wurde der Stellungswahlassistent (SWA) entwickelt. Der SWA berechnet für ein ausgewähltes Gelände mutmaßlich geeignete Stellungen für die Panzertruppe. (Abb. 1) Die Erweiterung auf andere Truppengattungen soll in Folgevorhaben untersucht werden. Unter anderem wird jedes Geländeelement daraufhin bewertet, ob es Gelegenheit bietet, auf voraus liegendes Gelände zu wirken oder Deckung vor Feinden zu finden. Daraus wird eine Art Heatmap (Stellungswertkarte, SWK) erstellt, die es dem Planer ermöglicht, sich bei seiner weiteren Entscheidung auf spezifische Bereiche im Raum zu konzentrieren (Abb. 2).

Gemeinsam mit Rheinmetall Electronics GmbH wurde die vorangegangene Entwicklung nach Beauftragung durch das BAAINBw in Hinblick auf Evaluation, Verbesserung des bestehenden Funktionsumfangs und Anpassung an mögliche Anwendungsfälle fortgesetzt und mit Unterstützung des KdoH in einer Spiralentwicklung mit Test und Feedback durch den Nutzer verfeinert. Dabei war Rheinmetall vorrangig für die Schnittstelle zum Nutzer und zu eingeführten Systemen verantwortlich.

Erste Versuche zur Verfahrensbewertung wurden mit zwei Vergleichsgruppen durchgeführt, die einen „vorläufigen Operationsplan“ zu erstellen hatten. Dabei war eine Gruppe zusätzlich zur topografischen Karte mit der SWK ausgestattet (Abb. 3). Der zeitliche Aufwand konnte durch die Verwendung der SWK von ca. 60 Minuten auf ca. 10 Minuten reduziert werden.

Durch eine weitere Bewertung am Taktikzentrum des Heeres (TZH) konnten die Ergebnisse in gemeinsam mit dem Nutzer

durchgeführten Geländebegehungen bestätigt werden. Dabei wurde deutlich, dass die Stellungen aufgrund der einfließenden Parameter korrekt gewählt wurden. Dass dennoch nicht alle gefundenen Stellungen gleichermaßen gut geeignet sind, liegt hauptsächlich an Beurteilungen, die den spezifisch menschlichen Fähigkeiten zuzuordnen sind oder durch noch nicht berücksichtigte Parameter wie An- und Abmarschwege beeinflusst sind. Dennoch ermöglicht es der SWA, die Anzahl der notwendigen Geländebegehungen zu reduzieren. Der hierdurch gewonnene Zeitvorteil wurde von den Experten am TZH vorläufig auf ca. 30 Minuten pro Führungsebene geschätzt.

Als besonders nützlich bei der Durchführung des Vorhabens erwies sich aus Sicht der Auftragnehmer die praktizierte agile Entwicklung unter direkter Beteiligung durch den Nutzer. Die Evaluierungen des SWA überzeugen uns, dass die Verwendung des SWA den Führungsprozess beschleunigen kann und der Truppe nutzen wird. Wir beabsichtigen, diese bei der weiteren Verbesserung des SWA und funktionalen Erweiterungen, zum Beispiel zum Operationsplanungsassistenten (OPIA), fortzuführen. Dadurch wird der Nutzer so zeitnah wie möglich durch die Ergebnisse der angewandten Forschung profitieren können.

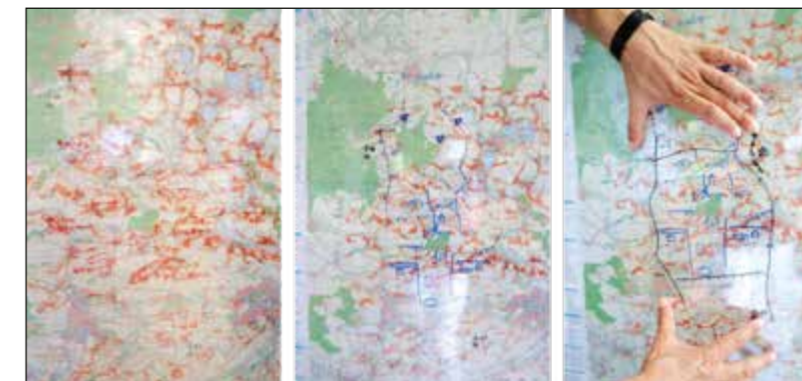


Abb. 3: Digital trifft traditionell: Stellungswertkarte (SWK, hier rot) auf Folie ausgedruckt, wird einer topografischen Karte zur Operationsplanung überlagert. Ergebnis einer Planübung zur Evaluierung

Dipl.-Inform. Jutta Hild
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Dr. rer. nat. Wolfgang Krüger
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Effiziente Videobildauswertung durch blickbasierte Interaktion und Künstliche Intelligenz

Videobildauswertung ist eine wesentliche Fähigkeit für moderne Aufklärungs- und Überwachungssysteme. Automatische Bildauswerteverfahren wie Multiobjekttracking und Screening ermöglichen im Zusammenwirken mit blickbasierter Interaktion und Spracheingabe eine effiziente Unterstützung des Bildauswerters bzw. der Bildauswerterin. Untersuchungen zeigen eine deutliche Leistungsverbesserung und Belastungsreduzierung.

Abbildende Aufklärung und Überwachung finden heute vermehrt in Form von Videobildauswertung statt. Plattformen wie LUNA, HUSAR, Heron, Tornado oder Fennek sind dafür mit optronischer Sensorik ausgestattet und liefern Bildmaterial, aus dem die auftragsrelevante Information extrahiert werden muss.

Bildauswertung erfordert von den Auswertexperten und -expertinnen insbesondere bei Live-Videobildauswertung kontinuierlich hohe Konzentration und ist eine Aufgabe mit hoher Belastung. Als Unterstützung stehen moderne Videobildauswertesysteme wie das am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB entwickelte System ABUL (Automatisierte Bildauswertung für Unbemannte Luftfahrzeuge) zur Verfügung. ABUL bietet Funktionen wie Bildoptimierung, Bildstabilisierung, Verfahren zur Änderungsdetektion, zur Bewegungsdetektion, zur Objektdetektion und zum Objekttracking. Insbesondere für Detektions- und Trackingverfahren werden aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit moderne KI-Verfahren verwendet, die auf tiefen künstlichen neuronalen Netzen basieren.



Abb. 1: KI-basierte Objektdetektion im Videoauswertesystem ABUL. Dargestellt sind Detektionen für die Klassen Flugzeug, PKW und LKW (Quelle Bildausschnitt: xView, vgl. Lam, Darius, et al. „xview: Objects in context in overhead imagery.“ arXiv preprint arXiv:1802.0785 (2018))



Abb. 2: KI-basiertes Multiobjekttracking in Wide Area Motion Imagery (WAMI). Dargestellt sind automatisch erkannte Trajektorien für bewegte Fahrzeuge (Quelle WAMI-Bildausschnitt: Hensoldt, vgl. Sommer, Lars, Wolfgang Krüger, and Michael Teutsch. „Appearance and motion based persistent multiple object tracking in wide area motion imagery.“ Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021)

Dipl.-Inform. (FH) Edmund Klaus
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB
Karlsruhe

info@iosb.fraunhofer.de

Die Objektdetektion kann sowohl auf Videostreamen als auch auf großen Einzelbildern arbeiten und dort beispielsweise Screening-Aufgaben (Auffinden und ggf. Zählen von Objekten) unterstützen (Abb. 1). Die Verfahren zur Objektdetektion bilden zudem die Grundlage für das Multiobjekttracking, das Trajektorien bewegter Objekte (Abb. 2) in Videodaten liefert und sowohl für herkömmliches Full Motion Video (FMV) als auch für Wide Area Motion Imagery (WAMI, Video mit hoher Szenenabdeckung und damit häufig sehr vielen Objekten) von Interesse ist.

Ziel der Forschungsarbeiten war die Weiterentwicklung ausgewählter Bildauswerteverfahren sowie der Interaktion durch Blickmessung und Spracheingabe, um die Belastung des Auswertexperten zu reduzieren und die Auswerteleistung zu erhöhen.

Blickbasierte Interaktion wird mithilfe eines Blickmessgeräts realisiert, das videobasiert die Blickposition des Benutzers auf dem Monitor erfasst (Abb. 3). Die Blickposition eignet sich in natürlicher Weise für Zeigeoperationen, da der Benutzer vor einer Interaktion den Interaktionsort visuell fixiert. Im Vergleich zu traditioneller Mauseingabe entfallen Suchen und manuelles Nachführen des Mauscurors, was die perzeptiv, kognitive und manuelle Belastung deutlich verringert. In Nut-



Abb. 3: Experimentalsystem mit dem Tobii 4C-Eyetracker unterhalb des Videoauswertemonitors. Die Zeigeoperation kann durch den Blick erfolgen und ermöglicht u. a. die Positionswahl relevanter Objekte (z. B. Fahrzeuge). Objektmarkierung, Bild zoomen und Bild verschieben werden an der Blickposition mittels verschiedener Tasten der Computertastatur ausgelöst

Christian Vroemen
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie
und Elektronik (WTD 81)
Aufklärungstechnik & Unbemannte Systeme (340)
Greding

WTD81340@bundeswehr.org

zerstudien an Experimentalsystemen zur Interaktion mit Multiobjekttracking und Fahrzeugscreening (Zielobjektselektion, Bild zoomen und verschieben) war blickbasierte Interaktion im Vergleich zur Mauseingabe effektiver und schneller. Die Verfügbarkeit automatischer Screening-Ergebnisse erhöhte die Anzahl korrekter Zielobjektmarkierungen deutlich.

Weitere Entlastung bietet Spracheingabe. Hier wurde ein prototypisches System realisiert, das es erlaubt, Erkennungsmerkmale eines zu identifizierenden Fahrzeugs mittels Sprache einzugeben und so die integrierte Erkennungsassistentz (basierend auf RecceMan®) zu steuern (Abb. 4). Der Spracheingabe zugrunde liegt die auf tiefen neuronalen Netzen basierende KI „KALDI“. Sie nimmt Eingaben wie „Übernimm Kettenfahrzeug“ entgegen und leitet diese an die Erkennungsassistentz weiter, die daraus den möglichen Fahrzeugtyp ermittelt. Die Sprachsteuerung funktioniert äußerst robust, auch bei wechselnden Nutzern.

Für zukünftige Arbeiten ist insbesondere die Detektion von statischen Objekten vorgesehen, die bei Teilverdeckung für den Menschen schwieriger detektierbar sind, sowie die Optimierung des Trackings fahrender Fahrzeuge durch Verdeckungsbereiche hindurch.



Abb. 4: Erkennungsassistentz mit KI-basierter Spracheingabe: Die um das Zielobjekt angeordneten Erkennungsmerkmale können mittels Sprachbefehlen für die Zielobjektbestimmung übernommen werden, ohne den Blick vom Zielobjekt abzuwenden

Dr. Martin Schimmerohn
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

Erster Kleinsatellit für die Bundeswehr – Raketendetektion mit dem 12U-CubeSat ERNST

Mit der Fertigstellung des 12U-CubeSat ERNST steht die erste Kleinsatellitenmission für die Zwecke der Bundeswehr mit Start im November 2023 bevor. ERNST wird das Potential von CubeSats, kleinen, standardisierten und kostengünstigen Satelliten, anhand einer ambitionierten Anwendung demonstrieren: Der Detektion von Raketen und hypersonischen Flugkörpern mit einem kryogen gekühlten Kamerasystem.

Die Satellitenmission ERNST repräsentiert eine Neuheit in mehrerer Hinsicht. ERNST ist nicht nur der erste CubeSat, dessen Anwendungspotential speziell für die Zwecke der Bundeswehr untersucht wird. Auch für die Fraunhofer-Gesellschaft, die auf vielen Gebieten seit jeher zu Innovationen auf Komponenten- und Systemebene für die Raumfahrt beiträgt, ist der Kleinsatellit das erste vollständig selbst entwickelte Raumfahrtssystem. Auch technisch werden mit ERNST Maßstäbe gesetzt. Allen voran steht die Demonstration einer komplexen, kryogen gekühlten Infrarotanwendung in einem nur 12U großen CubeSat. Das „U“ für „Unit“ definiert die Größensmetrik der CubeSats, wobei eine Unit einem Würfel mit 10 cm Kantenlänge entspricht. Die 12U geben ERNST die Außenmaße $24 \times 24 \times 36 \text{ cm}^3$ bei weniger als 20 kg Gesamtmasse.

Die Hauptnutzlast ist ein Infrarotkamarasystem, das zur Demonstration von am Fraunhofer IOSB entwickelten Konzepten zur Raketendetektion dient. Um die für eine Frühwarnung und die Einleitung von Abfangmaßnahmen erforderliche Reaktionszeit zu ermöglichen, wird die Erdoberfläche in verschiedenen kurz- und mittelwelligen Infrarotbereichen beobachtet. Die

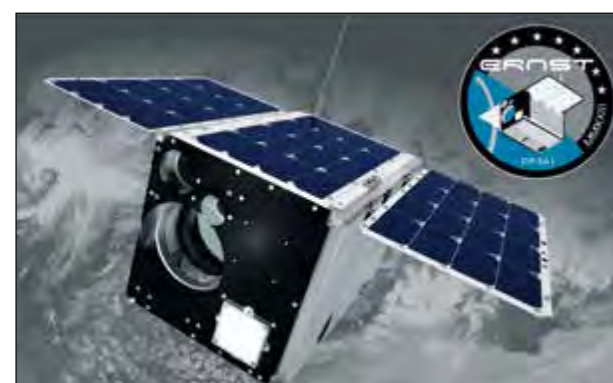


Abb. 1: Kleinsatellit 12U-CubeSat ERNST bei zukünftiger Mission im Orbit



Abb. 2: ERNST-Hauptnutzlast: Spezialkamera mit Filterrad als Infrarot-Imager

Kombination verschiedener Spektralbereiche erlaubt eine schnelle und zuverlässige Detektion der Infrarotsignatur einer Rakete oder eines Flugkörpers während deren verschiedenen Betriebsphasen wie Boost- und Gleitphasen. Durch die Stationierung von ERNST im erdnahen Orbit wird ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht. Um die Beobachtungs- und Integrationszeit entlang des 96 km breiten Aufnahmestreifen im Falle einer Raketendetektion zu erhöhen, schwenkt der Satellit entlang seiner Bahn nach und verfolgt das Ziel. Die ERNST-Mission wird nicht nur Referenzdaten des Erdhintergrunds in den relevanten Wellenlängenbereichen erfassen, sondern auch die Signatur eines Raketenstarts charakterisieren und deren Nachverfolgung demonstrieren.

Für die kompakte Nutzlast kombinieren wir kommerziell verfügbare Produkte aus dem wehrtechnischen Bereich, die speziell für die Mess- und Raumfahrtanwendung angepasst und verifiziert wurden, wie Optik, Stirling-Kryokühler, Infrarotdetektormodul und ein Pyrometer, mit Eigenentwicklungen des Fraunhofer EMI wie einem Filterrad und einer Datenverarbeitungseinheit. Untergebracht sind die Komponenten auf einer am EMI generativ gefertigten optischen Bank. Deren Topologieoptimierung gibt dem Bauteil eine bionische Erscheinung, während es die notwendige mechanische und thermische Stabilität für die Nutzlast gewährleistet. Zusätzlich ist ein dreidimensional strukturierter Radiator integriert, der die erheblichen thermischen Lasten auf einer sehr viel kleineren Grundfläche emittiert als übliche Radiatorflächen.

Weitere Nutzlasten auf ERNST sind eine Kamera, die im visuellen Bereich für die Georeferenzierung eingesetzt wird, sowie ein vom Fraunhofer INT entwickelter Strahlungsmonitor.



Abb. 3: ERNST-De-Orbit-Subsystem: Verstautes System (links) und Sequenz eines Entfaltungstests

Dieser misst die Gesamtdosis der vom Satelliten empfangenen energetischen Strahlung sowie den Einfluss von Protonen und Neutronen durch den Einsatz von unterschiedlich abgestimmten und abgeschirmten elektronischen Speicherelementen.

Über die konkreten Missionsziele der Raketendetektion und des Strahlungsmonitorings hinaus soll ERNST die Leistungsfähigkeit von Kleinsatelliten für militärische Anwendungen unter Beweis stellen. Deutlich geringere Kosten und eine höhere Risikotoleranz bei einer hohen zeitlichen Abdeckung bei einem Einsatz von Konstellationen zeichnen diese Satellitenklasse aus. Für den Satellitenbus wurden die leistungsstärksten verfügbaren CubeSat-Produkte erprobt und, wenn nicht kommerziell verfügbar, am Fraunhofer EMI selbst entwickelt. Sinnbildlich für letzteres steht ein Bremssegel, das am Ende der Mission einen schnellen De-Orbit für eine nachhaltige Orbitnutzung gewährleistet.

Nach der Fertigstellung und Integration der Flughardware bereiten wir ERNST derzeit auf seinen für November 2023 vorgesehenen Start im Rahmen einer Kooperation mit der US Space Force vor.

Axel Sättler
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Nicolas Wilhelm
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI
Freiburg

info@emi.fraunhofer.de

Innenballistik-Softwarefamilie SimIB für die Auslegung der nächsten Generation Rohrwaren der Bundeswehr

Rohrwaren stellen einen wesentlichen Teil der Bewaffnung aktueller und zukünftiger Landsysteme dar. Vor diesem Hintergrund entwickelt das Fraunhofer EMI Simulationsprogramme für Amtsseite und Industrie, um neue Rohrwaren und die zugehörige Munition im Hinblick auf gesteigerte Leistungsanforderungen und sichere Handhabung auslegen und beurteilen zu können.

In der Zeit nach dem Ende des kalten Kriegs war das Einsatzprofil der Bundeswehr geprägt vom Übergang von der Landes- und Bündnisverteidigung zu den Auslandseinsätzen. Dies machte sich in der Ausrüstung der Truppe deutlich bemerkbar. Rohrwaren, insbesondere für Kampfpanzer und Artillerie, verloren an Bedeutung, denn es bestand eine technische Überlegenheit gegenüber Gegnern in asymmetrischen Konflikten. Seit der Annexion der Krim durch die Russische Föderation im Jahr 2014 und insbesondere dem Überfall auf die Ukraine und der danach eingeläuteten „Zeitenwende“ in 2022 hat sich dies massiv geändert. Die Wirkung gegen klassische Ziele auf dem Gefechtsfeld, wie schwere gepanzerte Fahrzeuge mit enormem Schutzniveau, ist innerhalb kurzer Zeit wieder in den Fokus gerückt.

Da über viele Jahre eine Modernisierung ausgeblieben ist, kann nicht mehr von einer Überlegenheit der eigenen Wirkmittel ausgegangen werden. Für eine Leistungssteigerung bestehender Systeme oder die Entwicklung neuer, leistungsgesteigerter Rohrwaren und der zugehörigen Munition werden moderne Software-Tools für die Auslegung und Beurteilung benötigt.

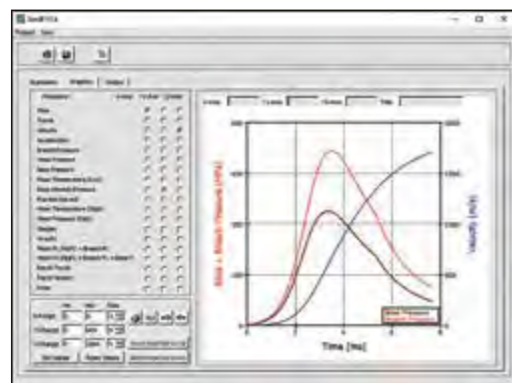


Abb. 1: Graphische Benutzeroberfläche SimIB-0D

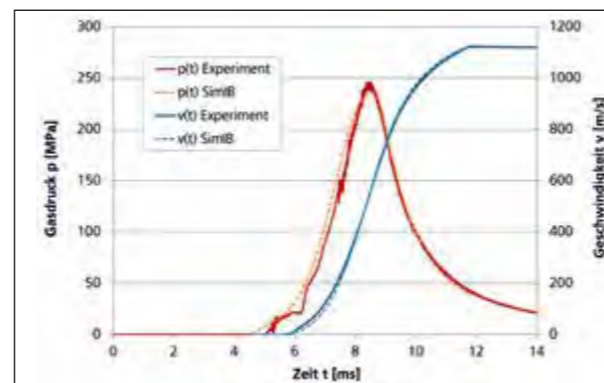


Abb. 2: SimIB-0D – der Vergleich von berechneten und experimentell ermittelten Druck- und Geschwindigkeitsverläufen zeigt eine gute Übereinstimmung

Diese müssen auf dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand basieren und in Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen die innenballistischen Abläufe vorhersagen können. Vor diesem Hintergrund arbeitet das Fraunhofer EMI daran, eine Familie moderner Innenballistik-Programme mit der Bezeichnung SimIB (Simulationstool InnenBallistik) zu erstellen. Diese soll die im Wesentlichen aus den 1980er und 1990er Jahren stammenden und bislang für derartige Berechnungen verwendeten Programme ersetzen und den zukünftigen nationalen Standard bilden.

Die erste Ausbaustufe stellt die Software SimIB-0D dar. Hierbei handelt es sich um ein Berechnungstool basierend auf der STANAG 4367, welches bei der deutschen Amtsseite und Industrie seit 2015 erfolgreich eingesetzt wird. Es stehen verschiedenste Funktionen zur Verfügung, die es erlauben, klassische Kanonen aller Kaliber mit unterschiedlichen Pulversorten zu modellieren – aber auch Zweikammersysteme für Granatwerfer und Mörser sowie Handwaffen.

Da der Gleichungslöser von SimIB ausgegliedert ist, ist es außerdem möglich, diesen über eine höhere Programmiersprache wie z. B. Python zu steuern und ganz gezielt zur Optimierung eines Antriebs einzusetzen. Ziel einer solchen Optimierung ist üblicherweise das Erreichen einer hohen Mündungsgeschwindigkeit für das Geschoss. Durch den gewählten Ansatz können auch neuartige Pulvergeometrien ohne aufwendige Versuche beurteilt werden. Für einen sicheren Betrieb wird oft die maximale Belastung der Waffe als Grenzdruck angegeben. Diesen kann SimIB als zusätzliche Randbedingung berücksichtigen, sodass dieser immer eingehalten wird.

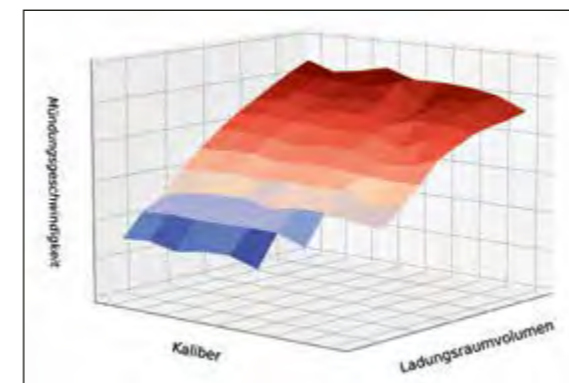


Abb. 3: SimIB-0D basierte Parameterstudie

Derzeit ist die Variante SimIB-1D Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten, welche eine gasdynamische Betrachtung der Innenballistik ermöglicht. Daher kann die Strömungsbewegung der heißen Antriebsgase und das Verhalten des Pulverbetts im Waffenrohr mit analysiert werden.

Besonders für großkalibrige Systeme, wie der Artillerie mit großen Ladungsräumen oder Panzerkanonen, die Geschosse auf Geschwindigkeiten von mehr als 1.500 m/s beschleunigen sollen, kommt dem Prozess der Anzündung des Pulverbetts eine entscheidende Bedeutung zu. Bei falscher Auslegung können sich im Ladungsraum Druckwellen aufbauen, die zum Bruch von Pulverkörnern führen – im schlimmsten Fall mit katastrophalen Folgen für Material und Einsatzkräfte. Diese Sicherheitsanforderungen können durch Simulationen mit SimIB-1D analysiert werden. Die derzeitige Version ist in der Lage, grundlegende Ladungsaufbauten zu berechnen. Die Software wird sukzessive erweitert, sodass sie ebenfalls die vielfältigen Funktionsumfang von SimIB-0D bieten kann. Eine Ausführung des Tools für mehrdimensionale Berechnungen in 2D/3D ist in Planung.

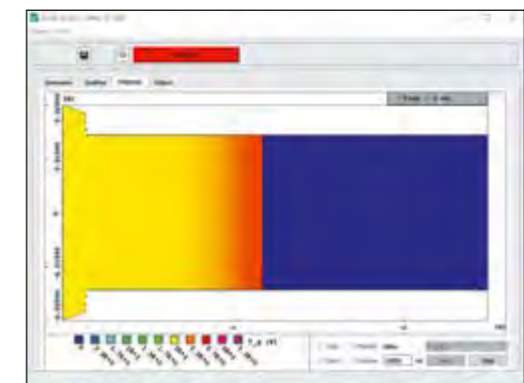


Abb. 4: SimIB-1D – Verlauf der Gastemperatur hinter dem Geschoss

Rodrigo Blazquez Garcia, M. Sc.
 Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
 Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

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

info@fhr.fraunhofer.de

Passiv-Radar mit Starlink-Satelliten

Der Aufbau neuer Satellitenkonstellationen wie Starlink für Internetdienste eröffnet vielversprechende Möglichkeiten im Bereich passiver Radarverfahren. Die Nutzung ihrer Signale, die weltweit und kontinuierlich verfügbar sind, führt zu Verbesserungen im Vergleich zu anderen Satellitenbeleuchtungen. Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR validiert diese neue Technologie mit dem SABBIA 2.0 Demonstrator.

Die Kostensenkung bei Raketenstarts hat in letzter Zeit zu einem schnellen Anstieg der Zahl von Breitband-Kommunikationssatelliten geführt, die in *Low Earth Orbits* (LEO) mit Höhen unter 2.000 km eingesetzt werden. Unter diesen neuen Satelliten sticht die Starlink-Konstellation hervor, die derzeit mit mehr als 3000 Satelliten in rund 550 km Höhe eine globale Netzabdeckung bietet.

Die Eigenschaften dieser neuen Satelliten haben eine hohe militärische Relevanz für passive Radaranwendungen: globale, dauerhafte und allwettertaugliche Abdeckung, einschließlich Ozeane, Pole und abgelegene Gebiete; hohe Zuverlässigkeit bei Naturkatastrophen oder physischen Angriffen; Signale mit hoher Bandbreite (ca. 240 MHz pro Sendekanal) für eine Bodenauflösung von bis zu 0,65 m; höhere Empfangsleistung auf der Erdoberfläche, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis und die maximale Reichweite im Vergleich zu anderen Satellitenbeleuchtungen wie Digital Video Broadcasting-Satellite (DVB-S) oder Global Navigation Satellite Systems (GNSS) verbessert werden; vorhersehbare Bewegung des Senders, die Radarbildanwendungen ermöglicht; und Senderredundanz, die eine

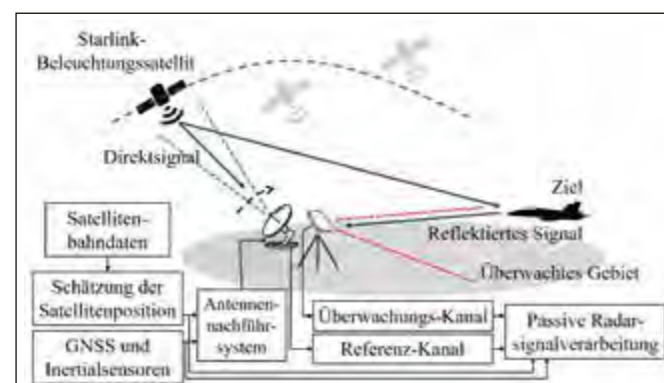


Abb. 1: Passiv-Radarsystemarchitektur basierend auf der opportunistischen Nutzung von Starlink-Signalen



Abb. 2: Entwickelter Passivradar-Demonstrator SABBIA 2.0 mit kommerziellen Parabol- und Flachantennen

Prof. Dr. Daniel O'Hagan
 Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
 Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

robuste und räumlich vielfältige Beleuchtung des Erdbodens ermöglicht.

Außerdem bietet die opportunistische Nutzung von bereits vorhandenen Sendern die üblichen Vorteile passiver Radarsysteme: keine Notwendigkeit der Frequenzzuweisung, generell niedrigere Entwicklungskosten, verdeckte Operationen, mehr Robustheit gegen Jamming, und verbesserte Detektion von Stealth-Zielen.

Aufgrund dieser vielversprechenden Möglichkeiten wurde die Eignung der Starlink-Signale zur passiven Nutzung im Frequenzband 10,7 – 12,7 GHz untersucht. Damit können passive Radarsysteme mit Bodenempfängern für die Zieldetektion und Bildgebung entwickelt werden. Die entwickelte Systemarchitektur (Abb. 1) enthält eine Hochgewinn-Referenzantenne, die den ausgewählten beleuchtenden Starlink-Satelliten verfolgt, um eine Kopie des gesendeten Signals zu empfangen, und eine Überwachungsantenne, die auf den Beobachtungsbereich ausgerichtet ist, um die Reflexionen von den Zielen zu empfangen. Diese Architektur kann mit zusätzlichen Referenzkanälen erweitert werden, um gleichzeitig mehrere Beleuchtungssatelliten mit unterschiedlichen Einfallswinkeln zu nutzen, oder mit zusätzlichen Überwachungskanälen, um polarimetrische oder interferometrische Methoden anzuwenden.



Abb. 3: Feldtest am Flughafen Frankfurt

Ein experimenteller Demonstrator (Abb. 2) wurde gebaut, der das passive Radarsystem SABBIA 2.0 des Fraunhofer FHR um die entsprechenden Fähigkeiten erweitert. Dieses leistungsstarke und modulare System kann Starlink- oder DVB-S-Signale flexibel nutzen, basierend auf Ad-hoc-Entwicklungen mit kommerziellen Antennen, die mechanisch oder elektronisch steuerbar sind. Darüber hinaus integriert das System GNSS- und Inertialsensoren, die den Betrieb auf bewegten Plattformen ermöglichen.

Mit dem entwickelten Demonstrator wurden mehrere Feldtests (Abb. 3) durchgeführt, bei denen Starlink-Signale empfangen und charakterisiert wurden (Abb. 4). Damit wurde diese neue Technologie nicht nur für die Zieldetektion und -klassifizierung, sondern auch für dauerhafte Fernerkundungsanwendungen wie die Lawinendetektion oder die Überwachung von Infrastrukturen experimentell validiert.

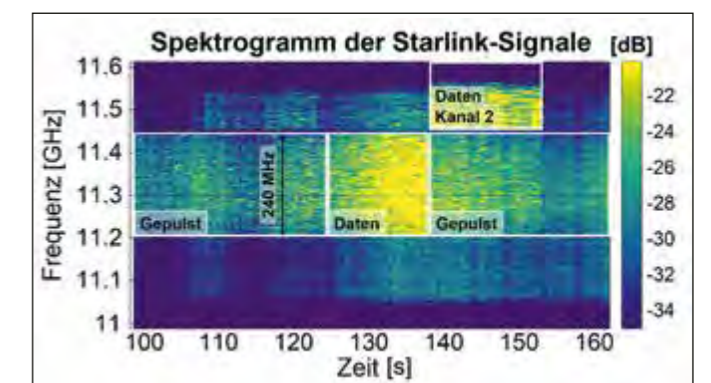


Abb. 4: Spektrogramm der experimentell empfangenen Starlink-Signale

Taher Badawy, M. Sc.
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

Dr. Thomas Bertuch
Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
Wachtberg

info@fhr.fraunhofer.de

Metamaterialien für Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung

Der Blickwinkelbereich von Gruppenantennen ist, physikalisch bedingt, eingeschränkt. Durch elektronisch abstimmbare Metamaterialien könnte er sich langfristig erweitern lassen.

Produktentwickler und -entwicklerinnen wünschen sich möglichst viele Freiheitsgrade bei Entwicklung und Design. Metamaterialien könnten diese Freiheitsgrade künftig erweitern: Deren elektromagnetischen Eigenschaften lassen sich, anders als bei herkömmlichen Materialien, von den Entwicklern selbst einstellen. Möglich sind dabei auch Werte, die in der Natur nicht vorkommen.

Einen weiteren Freiheitsgrad schaffen Metamaterialien unter anderem bei der Entwicklung von Antennen. Doch wie lassen sich militärische Radarsysteme über Metamaterialien verbessern? Dies untersuchte das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR gemeinsam mit der spanischen Firma Tafo Metawireless S. L. und der ebenfalls spanischen Universidad Pública de Navarra im Projekt METALESA II („Metamaterials for Active Electronically Scanned Arrays“) im Auftrag der European Defence Agency (EDA).

Das Fraunhofer FHR widmete sich dabei Gruppenantennen, die sich aus zahlreichen kleineren Antennenelementen zusammensetzen und deren strahlende Oberfläche gebogen ist.

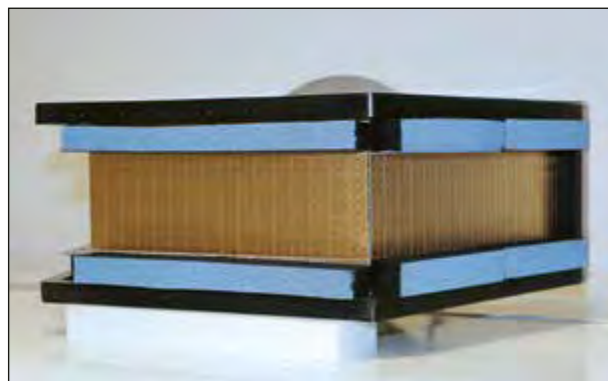


Abb. 1: Facettenförmig angeordnete Metamaterialplatten vor einer gekrümmten Gruppenantenne

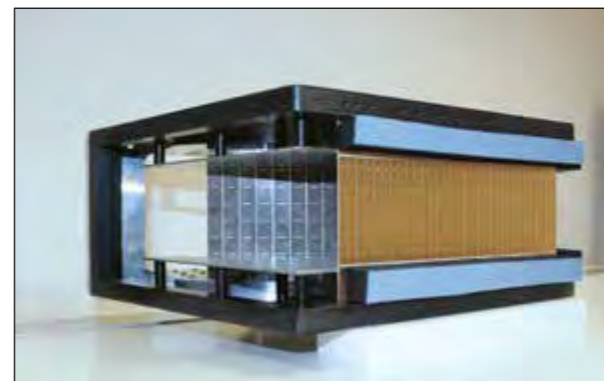


Abb. 2: Blick auf die gekrümmte Gruppenantenne hinter den Metamaterialschichten

Üblicherweise wird der Blickwinkel solcher Gruppenantennen elektronisch durch phasen- oder zeitverzögerte Anregung der einzelnen Antennenelemente angepasst, doch ist der elektronische Schwenkbereich sehr eingeschränkt.

Das Fraunhofer FHR arbeitete im Projekt METALESA II daher daran, den Scanbereich zu erweitern und verbesserten dazu die Leistung von gekrümmten Antennengruppen. Mit elektronisch abstimmbaren Metamaterialien wollen die Forschenden die Phasen der abgestrahlten Wellenfronten weiter verändern und den Schwenkbereich somit erweitern. Die phasenbeeinflussenden Eigenschaften dieser speziellen Metamaterialien lassen sich via Gleichspannung über Kapazitäten integrierter Varactor-Dioden ändern.

Doch in welchem Ausmaß sind solche abstimmbaren Metamaterialien in der Lage, die Phase der Radarstrahlung zu beeinflussen? Und wie hoch sind die Verluste, die dadurch auftreten? Dies haben die Forschenden in verschiedenen Testaufbauten untersucht. Dazu haben sie zwei große Metamaterialleiterplatten hergestellt und vermessen. In einem ersten Versuch montieren sie die abstimmbaren Metamaterialplatten vor eine Sendeantenne und untersuchen das Abstrahlverhalten. Bereits diese Ergebnisse waren sehr vielversprechend: Sowohl für die horizontale als auch für die vertikale Polarisation waren Phasenänderungen von bis zu 170° möglich. Auch die Verluste waren gering, sie lagen im Bereich von 1 bis 2 dB.

In einem nächsten Schritt entwarfen und bauten die Forschenden zwei Prototypen. Während der erste Prototyp aus nur einer abstimmbaren Metamaterialplatte, die von einem Antennenelement bestrahlt wurde, bestand, wies der zweite Prototyp eine

facettenförmige Anordnung aus mehreren Metamaterialplatten (Abb. 1 und 2), die vor einem gekrümmten Antennenarray platziert wurde, auf.

Bei der einzelnen Antenne konnten mit dem ersten Prototyp Funktionalitäten wie Phasenkompensation zur Strahlfokussierung und -bündelung und die Erzeugung von Phasengradienten im Hinblick auf Strahlschwenkung nachgewiesen werden. Für beide Polarisationen der abgestrahlten Wellen wurde ein Scanbereich von ($\pm 60^\circ$) erreicht, wobei gleichzeitig der Antennengewinn um 3 dB gesteigert werden konnte (Abb. 3 und 4). Der Prototyp mit dem gekrümmten Antennenarray erzeugte ebenfalls: Im azimutalen Scanbereich von 70° bis 90° konnte für die horizontale Polarisation eine Verbesserung des Antennengewinns um 1 bis 2 dB erreicht werden.

Wichtig sind diese Ergebnisse unter anderem für kleine Plattformen wie Drohnen. Die neue Technologie ermöglicht es künftig, statt einer Gruppenantenne ein leichtes, kostengünstiges System mit nur einer einzelnen Antenne zu nutzen und dennoch einen hohen Gewinn zu erzielen und die Blickrichtung dieser Antenne elektronisch einstellen zu können.

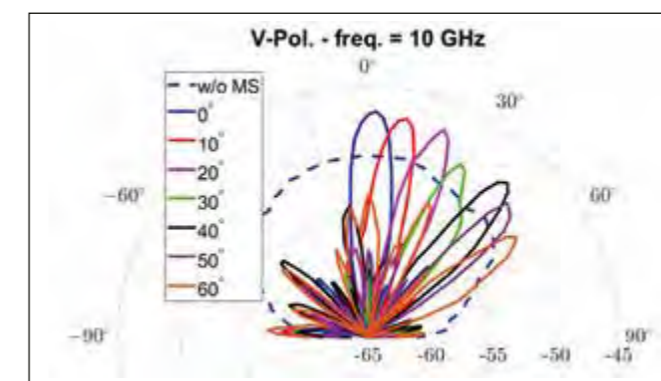


Abb. 3: Gemessenes Elementdiagramm ohne und mit abstimmbarer Metamaterialschicht (Linsenbetrieb, Strahlschwenkung von 0° bis 60° , vertikal polarisiert)

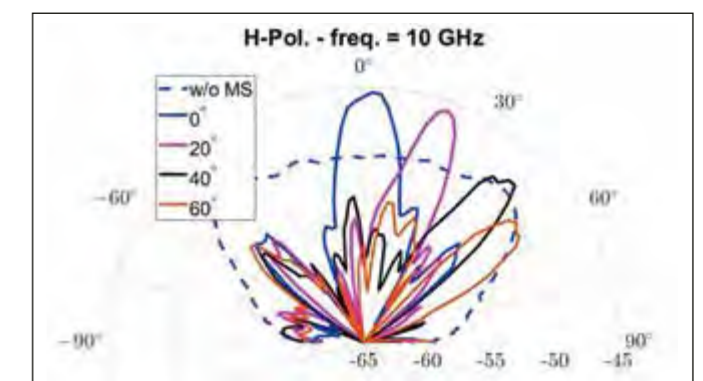


Abb. 4: Gemessenes Elementdiagramm ohne und mit abstimmbarer Metamaterialschicht (Linsenbetrieb, Strahlschwenkung von 0° bis 60° , horizontal polarisiert)

Frank Höller
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Dr. Dirk Schulz
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Automatisierte Planung zur Unterstützung der abgessenen Infanterie durch UGVs

Unbemannte Landfahrzeuge (Unmanned Ground Vehicles, UGVs) sollen in Zukunft Transportaufgaben für Infanteristen übernehmen. Der Nutzen der eingebetteten Roboter im Einsatz lässt sich durch zusätzliche Fähigkeiten weiter erhöhen. Hierfür ist meist eine automatische Einsatzplanung nötig. Eine Lösung für den Einsatz der Roboter als mobile Funkrelais zur Reichweitenerhöhung wurde dazu im Projekt „Begleitender Transport“ untersucht.

Die Entwicklung geländegängiger unbemannter Fahrzeuge, die Transportaufgaben für Infanteristen wahrnehmen können (Abb. 1) ist so weit fortgeschritten, dass die Einführung solcher Systeme in naher Zukunft möglich wird. Durch Sensoren unterstützt, bewegen sich die Fahrzeuge in geeignetem Gelände automatisiert und benötigen daher keine permanente Überwachung. Das macht sie neben dem begleitenden Transport für zusätzliche Aufgaben einsetzbar. Beispiele dafür sind Aufklärungs- und Überwachungsaufgaben sowie die Evakuierung Verwundeter oder, hier näher betrachtet, der Einsatz mehrerer Roboter als Funkrelais für die mobile Vernetzung von Einsatzkräften. Diese Art von Aufgaben für Roboter-Schwärme oder -Teams erfordert eine automatisierte Einsatzplanung, da eine manuelle Koordination der Fahrzeuge in dynamischen Einsatzlagen zu zeitaufwendig ist.

Für den Anwendungsfall der mobilen Funkvernetzung wurde am Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE im Rahmen des Projekts „Begleitender Transport“, das von der WTD81 GF340 betreut wurde, ein Planungsverfahren entwickelt, das Zielpositionen



Abb. 1: Mobile Roboter für den Materialtransport

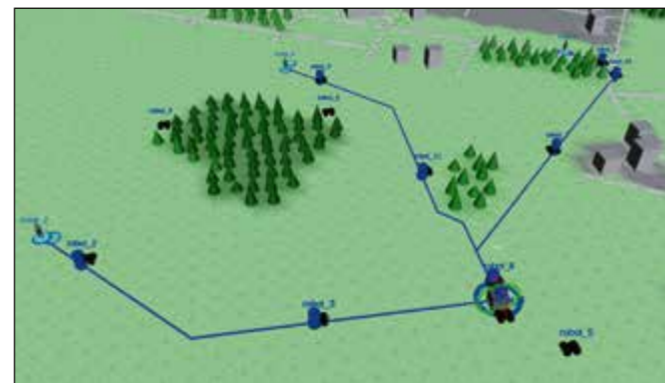


Abb. 2: Szenario: Drei Trupps (Cyan) bewegen sich mit Transportrobotern im Gelände. Sie werden durch Relaisroboter untereinander und mit der Basis verbunden

und Wege der mobilen Relais kontinuierlich so anpasst, dass die Verbindung zwischen begleiteten Infanterietrupps so lange wie möglich erhalten bleibt. Abb. 2 gibt dazu ein Beispiel.

Der Algorithmus verbindet Verfahren der kombinatorischen Optimierung für die Fahrzeugnavigation mit solchen für die Relaisplatzierung auf neuartige Weise. Eingaben sind ein digitales Wegenetz und Geländemodell, Funkvorhersagemodelle für die eingesetzten Geräte, sowie die bekannten Positionen der Trupps, die zu vernetzen sind. Die Besonderheit der Aufgabe besteht darin, dass neben der Optimierung von Relaispositionen auch deren schnelle Erreichbarkeit mit mobilen Robotern berücksichtigt werden muss. Da sich die Roboter nicht nur auf Wegen, sondern auch abseits im befahrbaren Gelände bewegen können, ist eine vollständige gleichzeitige Optimierung von Relaisplatzierungen und Fahrwegen aus Komplexitätsgründen nicht in Echtzeit möglich. Stattdessen wurde ein zweistufiger Ansatz gewählt, der zuerst ein befahrbares Wegenetz zwischen den Zielpositionen bestimmt und danach die Berechnung optimierter Relaispositionen vornimmt, eingeschränkt auf Positionen auf diesen Wegen.

Zunächst extrahiert das Verfahren aus der verwendeten digitalen Karte mit Hilfe eines schnellen Optimierungsalgorithmus ein möglichst minimales Netz befahrbarer Wege, die alle zu vernetzenden Funkteilnehmer miteinander verbinden. Abb. 3 zeigt dazu ein Beispiel. Zur Ermittlung der Relaispositionen bestimmt es dann für jeden Knoten des reduzierten Netzes mit Hilfe eines Vorhersagemodells, welche anderen Knoten über Funk erreichbar sind. Man erhält damit ein Netzwerk aller möglichen Funkverbindungen (siehe Abb. 4), aus dem wiederum mit einem schnellen kombinatorischen Optimierungsverfahren



Abb. 3: Fünf Funkteilnehmer, verbunden durch ein kürzestes Wegenetz



Abb. 4: Auf Basis eines Ausbreitungsmodells berechnete mögliche paarweise Funkverbindungen zwischen Punkten des Wegenetzes



Abb. 5: Berechnete Positionen für die Relaisroboter

die Relaispositionen bestimmt werden, über die alle Teilnehmer verbunden werden können. Abb. 5 zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung.

Der Algorithmus wurde in einer Simulation für Mehrrobotersysteme evaluiert. Er erzielt auch für Teams von mehr als zehn Robotern gute Lösungen in Sekundenbruchteilen. In Kombination mit einem optimalen Zuordnungsverfahren der Relaispositionen zu den Robotern können Relais deshalb auch während der Bewegung der Soldaten angemessen verschoben oder neu eingesetzt werden. Im kleinen Maßstab mit zwei Funkteilnehmern konnten die Simulationsergebnisse in Experimenten mit realen Robotern bestätigt werden.

Das zweistufige Verfahren kann zwar keine „optimalen“ Lösungen garantieren, dafür findet es gute und nachvollziehbare Pläne schnell. Wegen seines modularen Aufbaus ist es auch leicht auf weitere Anwendungen übertragbar. In nachfolgenden Arbeiten soll untersucht werden, wie die Methode durch Austausch der Funkmodelle mit geeigneten Sensormodellen von der Relaisplanung auf Aufklärungsaufgaben für Roboter-Schwärme adaptiert werden kann.

Effiziente Hochvolt-GaN-Transistoren für Radaranwendungen

GaN-Transistoren, die bei höheren Versorgungsspannungen betrieben werden können, ermöglichen höhere Leistungen bei gleichzeitig kleinerer Chipfläche. Mit Hilfe dieser am Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik IAF entwickelten Bauelemente sind stärkere Radarsender im L-, S-, C- und im X-Band realisierbar. Der Formfaktor der Systeme muss hierfür nicht verändert werden.

Um auch relativ kleine Objekte noch in großen Entfernungen per Radar detektieren zu können, ist neben einem hohen Antennengewinn der verwendeten Sende- und Empfangsantennen ein möglichst leistungsstarker Sender nötig. GaN-Transistoren sind aufgrund ihrer überlegenen elektrischen und thermischen Eigenschaften in der Lage, deutlich höhere Leistungen pro Chipfläche zu erzeugen als es mit Silizium- oder Galliumarsenid-basierten Bauelementen möglich ist. Das volle elektrische Potenzial von GaN-Transistoren lässt sich jedoch nur ausschöpfen, wenn sie bei deutlich höheren Spannungen betrieben werden als die bei kommerziellen Bauelementen üblichen 50 V oder 65 V. Das Fraunhofer IAF entwickelt daher Hochvolt-GaN-Bauelemente für Radaranwendungen, die für den Einsatz bei einer Versorgungsspannung von 100 V ausgelegt sind.

Auf Systemebene ergibt sich durch die Verwendung dieser neuartigen Transistoren eine Reihe von Vorteilen. Durch die höhere Versorgungsspannung wird der Strombedarf des Sendeverstärkers bei gleicher Ausgangsleistung reduziert, wodurch kompaktere Netzteile eingesetzt werden können. Zusätzlich vereinfacht sich die Zuführung der Stromversorgung, da der



Abb. 1: Chipfoto eines 100 V-GaN-Transistors mit einer Ausgangsleistung von mehr als 400 W für Anwendungen im S-Band (2 bis 4 GHz)

geringere Strombedarf die Verwendung von Kabeln mit geringerem Querschnitt erlaubt. Die gesteigerte Leistung pro Chip ermöglicht zudem bei gleichbleibender Baugröße des Senders, dessen Ausgangsleistung zu erhöhen und, damit einhergehend, die erzielbare Reichweite des Radars zu verbessern. Dies wirkt sich zusätzlich positiv auf die Kosten aus, da hierdurch weniger Chips zum Erreichen derselben Sendeleistung notwendig sind. Ein Foto eines 400 W-Bauelementes für den Einsatz im S-Band (2 bis 4 GHz) ist in Abb. 1 zu sehen.

Für den Schaltungsdesigner bietet die hohe Versorgungsspannung einen entscheidenden Nutzen in Bezug auf den Entwurf möglichst verlustarmer Anpassnetzwerke der Verstärker. Durch den stark vergrößerten Ausgangswiderstand der Bauelemente lassen sich gerade für sehr große und damit leistungsfähige Transistoren kompaktere Netzwerke realisieren, die deutlich reduzierte Verluste aufweisen können. Die Systemeffizienz kann dadurch folglich gesteigert werden.

Mit der Leistungssteigerung pro Chipfläche geht eine höhere Verlustleistung und damit höhere thermische Belastung der Bauelemente einher, die sich negativ auf die erzielbare Zuverlässigkeit im Betrieb auswirkt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, sowohl die Energieeffizienz der Transistoren weiter zu steigern, als auch die thermischen Eigenschaften durch geeignetes Layout und verbesserte Prozesstechnologie zu optimieren. Beide Punkte konnten erfolgreich demonstriert werden. Durch gezielte Anpassungen des Prozesses konnte die Ausgangskapazität im Vergleich zu Bauelementen der ersten Generation um mehr als 40 % reduziert werden. Dies spiegelt sich in den hohen gemessenen Leistungswirkungsgraden (PAE) von über 84 % bei 2.0 GHz und 66 % bei 7,2 GHz wider. Beide

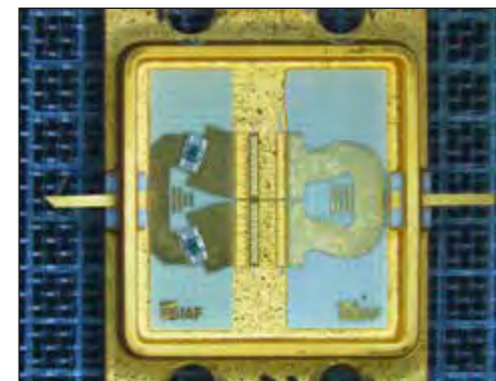


Abb. 2: Mikroskopische Aufnahme eines im Gehäuse realisierten Leistungsverstärkers (IMFET), basierend auf 100 V-GaN-Transistoren mit einer Ausgangsleistung von über 140 W bei einer Frequenz von 7,2 GHz

Werte stellen Weltrekorde hinsichtlich der Effizienz von 100 V-GaN-Transistoren bei den jeweiligen Frequenzen dar. Die erreichte Leistungsdichte beträgt bis zu 15 W/mm.

Neuartige Transistorlayouts ermöglichen außerdem eine effizientere Entwärmung der Bauelemente, bedingt durch eine bessere Ausnutzung der wärmespreizenden Eigenschaften des Substratmaterials. Im Vergleich zu konventionellen Layouts kann der Wärmewiderstand so um rund 20 % verringert werden – gleichbeutend mit einer Erhöhung der Lebensdauer um mehr als einen Faktor 10.

Ein hybrid im Gehäuse aufgebaute Leistungsverstärker (IMFET), basierend auf zwei 100 V-GaN Transistor Chips (Abb. 2), liefert bereits mehr als 140 W Ausgangsleistung und eine PAE (Power Added Efficiency, Leistungswirkungsgrad) von 46 % bei einer Frequenz von 7,2 GHz (Abb. 3). Da das verwendete Gehäuse Platz für insgesamt vier Chips dieser Bauart bietet, ist es bei entsprechender Implementierung möglich, die Ausgangsleistung pro Verstärker auf deutlich über 250 W zu erhöhen.

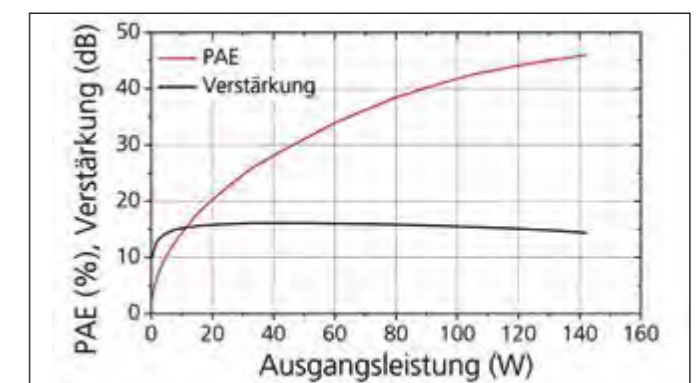


Abb. 3: Gemessene Ausgangsleistung, PAE und Verstärkung eines hybrid im Gehäuse aufgebauten Leistungsverstärkers (IMFET), basierend auf 100 V-GaN-Transistoren bei einer Frequenz von 7,2 GHz

Auf dem Weg zur Einzelphotonenkamera für aktive Bildgebung im kurzwelligen Infrarot

Laser-aktive Bildgebungssysteme zum Einsatz unter erschweren Sichtbedingungen und zur „Sicht um die Ecke“ benötigen Kameras mit der Fähigkeit, einzelne Photonen nachzuweisen. Hierbei wird der Spektralbereich des kurzwelligen Infrarot favorisiert, welcher die Forschung an InGaAs-basierten Einzelphotonendetektoren erfordert.

Bildgebende LiDAR-Systeme (engl. „light detection and ranging“) für die Umfeld- und Entfernungssensorik sind eine Schlüsselkomponente für die autonome Navigation von Land-, See- und Luftfahrzeugen auch bei wechselnden und schlechten Sichtbedingungen. In jüngster Zeit ist die „Sicht um die Ecke“ (engl. „non line of sight“, NLOS) in den Mittelpunkt des Interesses militärischer LiDAR-Anwendungen gerückt. Hierbei wird das indirekte Blickfeld betrachtet, um verborgene Szenen hinter Hindernissen zu erkunden (Abb. 1).

Die physikalische Grundlage von LiDAR-Systemen ist die Laufzeitmessung der rückgestreuten Intensität eines gepulsten Laserstrahls. Für eine ausreichend hohe Reichweite ist eine möglichst hohe Sensitivität des Photodetektors erforderlich. Die höchste Sensitivität bieten die im Geiger-Modus betriebenen Einzelphotonen-Lawinendioden (engl. „single-photon avalanche diode“, SPAD).

Gegenüber dem sichtbaren Spektralbereich bietet das kurzwellige Infrarot (engl. „short-wave infrared“, SWIR) bei Wellen-

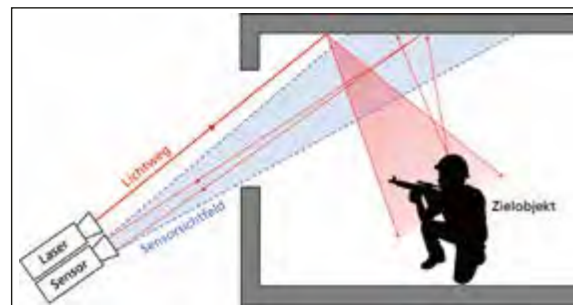


Abb. 1: Schemabild NLOS-Bildgebung (Quelle nach F. Christnacher et al., Adv.Opt.Techn. 8 (6), 403–414 (2019))

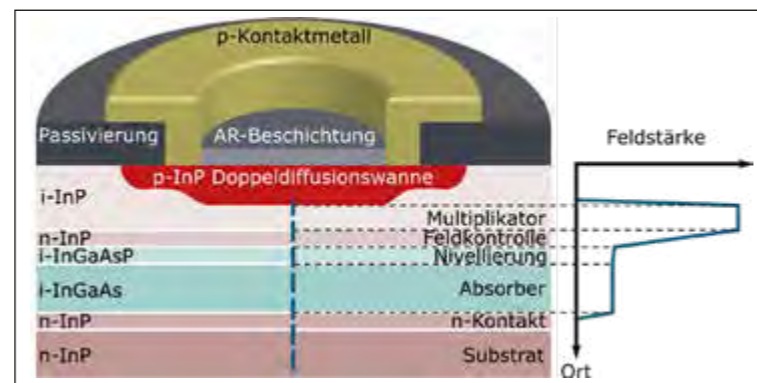


Abb. 2: Nicht-maßstäbliche Querschnittsskizze eines Einzelphotonendetektors mit elektrischem Feldstärkeprofil

längen zwischen 1 – 2,5 μm eine bessere Durchdringung von Partikeln in der Atmosphäre wie etwa Rauch, Nebel, Staub etc., die Verfügbarkeit augensicherer Laser sowie reduzierte solare Hintergrundstrahlung. Das III/V-Halbleitermaterial InGaAs ist ideal als Detektormaterial im SWIR geeignet. Räumlich hochauflösende InGaAs/InP-SPAD-Detektormatrizen sind die Kernkomponente für diese und weitere künftige, bildgebende LiDAR-Systeme im SWIR.

Eine Schlüsseltechnologie zur Herstellung von InGaAs/InP-SPADs ist die Diffusion des Dotierstoffes Zink durch eine lithographisch strukturierte Diffusionsmaske zur Herstellung eines räumlich begrenzten p-leitenden Bereichs. Die Geometrie des Diffusionsprofils hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung des Verlaufs der elektrischen Feldstärke in der aktiven Zone der SPAD. Für bestmögliche SPAD-Eigenschaften wird durch die sequentielle, zweifache Diffusion ein Dotierprofil in Form einer Doppelwanne erzeugt.

In Abb. 2 ist der Querschnitt einer klassischen InGaAs/InP-SPAD skizziert. Darin ist das Doppeldiffusionswannenprofil in Rot hervorgehoben. Die wichtigsten Funktionsschichten in der vertikalen Schichtstruktur stellen der intrinsische (i) InGaAs-Absorber zur Absorption einzelner Photonen und der i-InP-Multiplikator zur internen Verstärkung des Photostroms dar. Die übrigen, um ein Vielfaches dünnere Schichten dienen zur elektrischen Kontaktierung, zur Nivellierung des Bandkantenverlaufs zwischen InGaAs und InP sowie zur Kontrolle der elektrischen Feldstärkenverteilung, welche im rechten Teil der Abb. 2 schematisch aufgetragen ist. Je nach Wahl von Schichtdicken und -dotierungen kann der Verlauf der Feldstärke gezielt eingestellt werden.



Abb. 3: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines im Querschnitt gespaltenen InGaAs/InP-Einzelphotonendetektors unmittelbar nach der zweiten Zinkdiffusion

Für die Zinkdiffusion wurde am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF eine neuartige Methode des selektiven epitaktischen Überwachens entwickelt und erstmals auf diese Weise ein entsprechendes Doppeldiffusionswannenprofil hergestellt (Abb. 3).

Elektrooptische Messdaten der am Fraunhofer IAF hergestellten InGaAs/InP-SPADs zeigen einen von Lawinendiioden bekannten Verlauf des Dunkel- und Photostroms über die angelegte Spannung und der daraus resultierenden Verstärkung im linearen Betriebsmodus (Abb. 4). Innenliegend ist der Quantenwirkungsgrad unterhalb der Durchbruchspannung der SPAD über die Wellenlänge dargestellt, was die ideale Eignung des Detektormaterials bei aktiver Beleuchtung mithilfe eines Lasers der Wellenlänge um 1550 nm belegt. Diese ersten Charakterisierungsdaten wurden bei 240 K gemessen, was einer typischen, durch thermoelektrische Kühlung erreichbaren Betriebstemperatur für InGaAs/InP-SPADs entspricht.

Von diesen Resultaten ausgehend werden nun Konzepte zur Optimierung der Bauelementeigenschaften der SPADs sowie deren Implementierung in Bildfeldmatrizen untersucht. Diese Bildfeldmatrizen bilden das Herzstück einer zukünftigen SWIR-Einzelphotonenkamera.

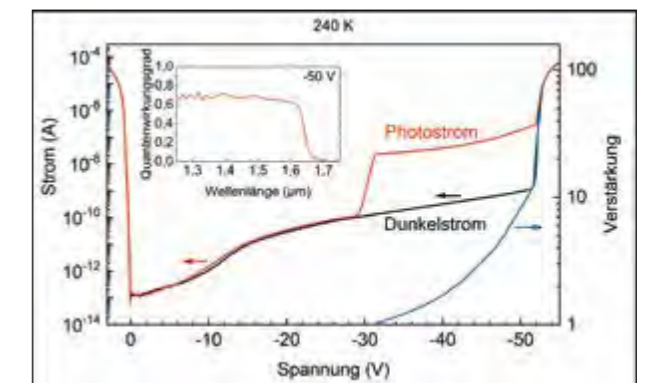


Abb. 4: Exemplarische Diodenkennlinien und spektrale Responsivität unterhalb der Durchbruchspannung

Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau
Braunschweig

info-pks@dlr.de

Dipl.-Ing. Steffen Kalow
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau
Braunschweig

info-pks@dlr.de

Aktive Verwindungsrotoren für den modernen Hubschrauber

Am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V. (DLR) werden Komponenten für den Hubschraub rotor von morgen entwickelt. Dabei geht es darum, die Aerodynamik des Hauptrotors positiv zu beeinflussen, mit dem Ziel der Lärm- und Vibrationsreduktion sowie der Reduktion des Energiebedarfes. Einer der untersuchten Bereiche ist der aktive Verwindungsrotor.

Der Anstellwinkel von Hubschraub rotorblättern, der während des Fluges eines Hubschraubers kontinuierlich angepasst werden muss, wird mittels einer Taumelscheibe und Steuerstangen eingestellt, die es ermöglichen, alle Blätter gleichzeitig (kollektiv) oder sinusförmig einmal pro Umlauf (zyklisch) im Anstellwinkel zu verändern. Eine präzisere orts-aufgelöste Einstellung des lokalen Anstellwinkels ist mit sogenannter individueller Blattkontrolle möglich. Diese erlaubt eine Reduktion des Lärmes, der Vibrationen und auch des Energiebedarfes. Aktiv verwindbare Rotorblätter können hierzu einen Beitrag leisten, jedoch stellt die Integration der auf Zug beanspruchten Aktuatorik eine Herausforderung dar.

Aktive Verwindungsrotoren sind Gegenstand der Forschung und bestehen neben der passiven Struktur auch aus strukturintegrierten piezoelektrischen Aktuatoren, welche das gesamte Blatt verwinden können. Mit Hilfe eines neuen Rotorblatt-designs ist es gelungen, auftretende Lasten in aktiv verwindbaren Rotorblättern zu reduzieren und vor allem für eine gleichmäßige Dehnungsverteilung innerhalb der Aktuatorik



Abb. 1: Experimentelle Untersuchung eines verwindbaren Rotorblattes im Schleuderversuchsstand



Abb. 2: Blattspitzenbewegung eines verwindbaren Rotorblattes

zu sorgen. Damit kann Schäden vorgebeugt werden. Die Langlebigkeit aktiver Rotorblätter kann so gesteigert werden und bildet damit die Grundlage für eine gezielte und effiziente Nutzung der aktiven Verwindungstechnologie.

Ziel ist eine Verformung des Rotorblattes um $\pm 2^\circ$ an der Blattspitze zu erreichen. Am DLR wurde dazu ein Blatt entworfen und gefertigt, das den Ansprüchen an die Aktuatoren in besonderer Weise Rechnung trägt. Neben verschiedensten strukturellen und materiellen Anpassungen, kommt unter anderem auch ein neuartiges Aktuator-Layout zur Anwendung. Die Integration einer Vielzahl an Druck- und Dehnungssensoren und deren Kabeln stellt eine große Herausforderung dar und erfordert eine effiziente Nutzung des verfügbaren Bauraums. Zur Validierung der Fertigungsmethoden und der Rotorblatteigenschaften wurden verschiedene computer-tomographische Aufnahmen ausgewertet.

Experimentelle Untersuchungen mit dem Rotorblatt konnten die Festigkeit verifizieren und gleichzeitig den Nachweis über eine Blattspitzenverwindung von $\pm 2^\circ$ bei den relevanten Einsteuersfrequenzen 2/rev, 3/rev und 4/rev erbringen. Ein vollständiger Blattsatz mit 4 Rotorblättern und einem Ersatzblatt ist bereits gefertigt und in Einzelblatttests erfolgreich qualifiziert worden. Dieser Blattsatz steht nun für die weiteren System-

qualifizierungsversuche bereit und soll im Anschluss im Windkanal die verbesserten aerodynamischen Eigenschaften unter Beweis stellen.



Abb. 3: Aktuator und Drucksensor-Vollschnitt eines verwindbaren Rotorblattes

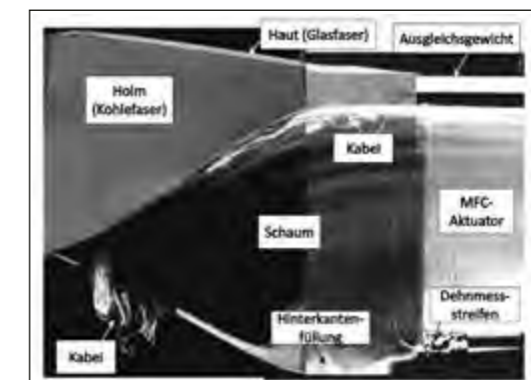


Abb. 4: Vergrößerte Ansicht der CT-Scan-Bilder im Bereich der Blattwurzel

Ismail Baris
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Dr. Rainer Speck
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Informationsfusion von verschiedenen Fernerkundungssensoren

Trotz verbesserter Datenerfassungstechniken erfolgt die Auswertung von optischen und Radar-Fernerkundungsdaten sensorspezifisch und im zweidimensionalen Raum. Eine kombinierte Verarbeitung dieser Daten im dreidimensionalen Raum kann einen signifikanten nationalen Fähigkeitengewinn in der Erdbeobachtung bedeuten. Die DLR-Institute für Optische Sensorsysteme und für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme forschen an dieser Informationsfusion.

In jüngster Zeit sehen wir uns mit einer stark steigenden Zahl an Herausforderungen in der Weltlage konfrontiert, die nicht nur kaum lösbar, sondern auch schwer analysierbar sind. Denn diese neuen Herausforderungen beinhalten komplexe ökologische, soziale und politische Prozesse, die eine sehr genaue und spezifische Informationsgrundlage erfordern, um Situationen richtig einschätzen zu können.

Wenn ein Gebäude beschädigt wurde, ist es von Interesse zu wissen, bis zu welchen Stockwerken das Gebäude noch intakt ist. Die Forderung einer akkuraten Schätzung der physischen Schäden ist auf Grund der Datenlage, die aus verschiedenen Quellen und Sensoren stammen kann, eine herausfordernde Aufgabe. Die bekannteste Datenquelle, die dabei in Betracht gezogen wird, ist der elektrooptische (EO) Sensor, der durch sein hohes Auflösungsvermögen und das intuitive Bildverständnis eine gute Auswertbarkeit der Bilddaten gewährleistet. Darüber hinaus können aus mehreren EO-Bildern, die aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen wurden, hochwertige Informationen in Form von 3D-Modellen abgeleitet werden. Als passives Abbildungssystem und der damit verbundenen Abhän-



Abb. 1: Flugzeuggestützte elektrooptische Aufnahme von Berlin, August 2017, als Orthoprojektion



Abb. 2: Satellitengestützte SAR-Aufnahme über Berlin von August 2017, aufgenommen durch den TerraSAR-X Satelliten



Abb. 3: Die fusionierte Information der flugzeuggestützten elektrooptischen- und Satellitengestützten SAR-Aufnahme

Dirk Frommholz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Optische Sensorsysteme
Berlin

info-pks@dlr.de

gigkeit von der Sonneneinstrahlung können jedoch signifikante Informationslücken entstehen. Genau diese Lücken lassen sich durch den Einsatz von aktiver Radar-Sensorik schließen, welche eine 24-Stunden Verfügbarkeit und weitest gehende Wetterunabhängigkeit bietet. Vor allem abbildende Synthetische Apertur Radar (SAR) Systeme bieten entfernungsunabhängig ein hohes Auflösungsvermögen bei großer Szenenabdeckung.

Trotz verbesserter Datenerfassungstechniken erfolgt die Auswertung dieser Daten sensorspezifisch. Um ein vollständiges Bild über die Veränderung zu bekommen, müssen diese getrennt betrachteten Informationen in einem Multi-Sensor-Verbund kombiniert werden. Im Bereich der Informationsfusion zwischen EO- und SAR-Daten liegen die zu überwindenden Herausforderungen in den unterschiedlichen Aufnahmegeometrien. Bei klassischen EO-Bildern wird typischerweise auf Basis eines digitalen Oberflächenmodells eine Senkrechtoprojektion vorgenommen (maßstabsgetreues True-Orthofoto) (siehe Abb. 1), wohingegen ein SAR-Bild eine Schrägsichtgeometrie parallel zur Flugachse hat (Seitensicht-radar) (siehe Abb. 2). Eine andere Herausforderung betrifft die Informationsverwaltung der sehr hohen Datenmengen. Alle Informationen müssen gelesen, verarbeitet und gespeichert werden und dies in einer angemessenen Zeit. Um dies zu gewährleisten wird zunächst die Aufnahmegeometrie eines



Abb. 4: SAR-Signatur (TerraSAR-X) eines Schornsteins, die aufgrund der SAR-spezifischen Aufnahmeeffekte kaum wahrzunehmen ist (Berlin, August 2017).



Abb. 5: Optische Abbildung (Flugzeuggestützte elektrooptische Aufnahme) des Schornsteins aus Abbildung 4 (Berlin, August 2017)



Abb. 6: Fusionierte Information der Abbildungen 4 und 5 ergeben die klar erkennbare Signatur eines Schornsteins

hochauflösten SAR-Bildes mit einem 3D-Modell fusioniert und im Anschluss die EO- Textur hinzugefügt (siehe Abb. 3).

Die Informationsfusion bietet einen markanten Mehrwert bei der Interpretation der Szene. Beispielsweise ist in Abb. 4 eine SAR-Signatur eines Schornsteins zu sehen, der jedoch aufgrund der SAR-spezifischen Aufnahmeeffekte kaum wahrzunehmen ist. Im Bereich der elektrooptischen Bildgebung ist der Schornstein aufgrund seines relativ kleinen Durchmessers kaum zu erfassen (siehe Abb. 5). Bei der Informationsfusion dieser Ansichten stellt sich jedoch die gesamte Dimension des Schornsteins sehr gut dar (siehe Abb. 6).

Die vielversprechenden Ergebnisse bilden eine gute Basis für eine zukünftige Weiterentwicklung im Bereich der automatisierten Informationsextraktion. Diese umfassen beispielsweise eine dreidimensionale Änderungsdetektion und die Abbildung dieser Änderungen in einem fusionierten Lagebild.

Dr. Thomas Jann
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

info-pks@dlr.de

Automatisierte Luftbetankung

Luftbetankung hat in vielen militärischen Einsätzen hohe strategische und taktische Bedeutung. Gleichzeitig ist es für Piloten immer noch eines der anspruchsvollsten und kritischsten Manöver. Um die Effektivität von Missionen mit Luftbetankung zu verbessern und die Sicherheit für die Piloten des Empfängerflugzeugs (Receiver) zu erhöhen, soll die Luftbetankung stärker automatisiert werden. Die Automatisierung ist ebenfalls eine Voraussetzung für die Luftbetankung von zukünftigen unbemannten Flugzeugen.

Luftbetankung wird der Vorgang genannt, bei dem ein Flugzeug Treibstoff an ein zweites Flugzeug oder Hubschrauber während des Fluges übergibt. Es handelt sich um eine hochanspruchsvolle Aufgabe, die oft ein Schlüsselement bei militärischen Missionen darstellt. Eine Automatisierung dieses Vorgangs wäre nicht nur eine große Hilfe für die Piloten, sondern ist auch essentiell, um zukünftig die Luftbetankung von unbemannten Flugsystemen zu ermöglichen. Im Rahmen des Projekts F(AI)²R (Future Air-to-Air Refueling) befasst sich das DLR damit, verschiedene Methoden für die automatisierte Luftbetankung von bemannten und unbemannten Fluggeräte zu entwickeln, im Simulator und teilweise auch im Flugversuch zu erproben, und schließlich zu bewerten. Die Untersuchung konzentriert sich bislang auf das sogenannte „Probe & Drogue“-Verfahren, bei dem die Tanksonde (Probe) des Receivers im Flug in den am Schlauch hängenden Betankungskorb (Drogue) des Tankers ankoppeln muss.

Das Spektrum der Unterstützungsmöglichkeiten bei der Luftbetankung reicht von Pilotenassistenzsystemen über die Teilautomatisierung bis hin zur Vollautomatisierung des



Abb. 1: Simulation einer Luftbetankung mit zwei FMTA (Future Military Transport Aircraft)

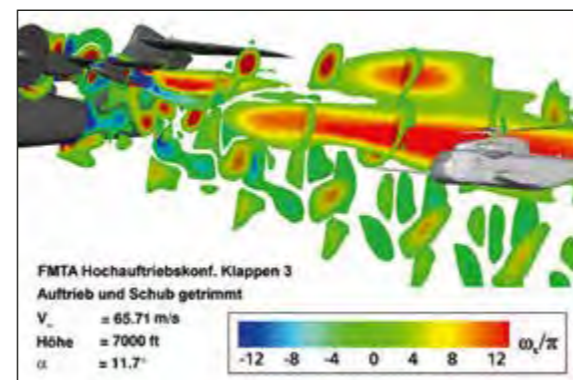


Abb. 2: Betankungsposition eines Transporthubschraubers im Wirbelfeld hinter dem FMTA

Betankungsmanövers. Eine Modifikation von Regelgesetzen (Control Laws) im Receiver kann bereits die Steuerung für den Piloten während des Ankopplungsvorgangs vereinfachen und damit Dauer und Risiken bei der Luftbetankung verringern. Für die höher automatisierte Durchführung von Luftbetankungsmissionen kommt der relativen Navigation zwischen Receiver und Tanker, aber auch zwischen Probe und Drogue eine Schlüsselrolle zu. Hierfür werden unter anderem elektro-optische Sensoren wie Infrarot-Kameras und LiDAR Systeme in Betracht gezogen, die ohne GNSS und aktivem Datenlink auskommen. Für die vollautomatisierte Luftbetankung braucht der Receiver zusätzlich ein bordseitiges Missionssteuerungssystem, welches den gesamten Ablauf überwacht und in die jeweils erforderlichen Reglermodi wechselt.

Die Basis für die Untersuchung der Automatisierungsverfahren bilden flugmechanische Simulationsmodelle der beteiligten Luftfahrzeuge, Tanker und Receiver, sowie von der Betankungseinrichtung und der aerodynamischen Interaktion. Als Tanker wird ein Modell des sog. FMTA (Future Military Transport Aircraft) genutzt, einer A400M-ähnlichen, aber generischen Konfiguration eines militärischen Transporters (Abb.1). Für den Receiver wurden, ebenfalls in Anlehnung an reale Luftfahrzeuge, weitere repräsentative Modelle für ein Kampfflugzeug, einen Transporthubschrauber und ein UAV entwickelt. Um in der Simulation die Reaktion von Korb und Schlauch realistisch wiedergeben und eine Betankungsmission in vollem Umfang durchführen zu können, wurde ein komplexes Modell des Betankungssystem mit allen wesentlichen Komponenten entwickelt. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Luftbetankung ist die aerodynamische Interaktion, insbesondere die Beeinflussung des Receivers durch das Strömungsfeld hinter dem Tanker



Abb. 3: Test eines Assistenzsystems für die Kampfflugzeug-Luftbetankung mit der Microsoft HoloLens

(Abb. 2), sowie die aerodynamische Rückwirkung des Receivers auf den Betankungskorb (sog. bow-wave), die beide in der Simulation berücksichtigt werden. Unter Nutzung des Gesamtmodells können anschließend auf den Flugsimulatoren des DLR, beispielsweise dem Air-Vehicle Simulator (AVES) oder dem Military Aircraft Research Simulator (MARS-FIT), Tests der neuentwickelten und implementierten Automatisierungsverfahren und Assistenzsysteme mit Piloten durchgeführt und bewertet werden (Abb. 3).

Als neues Konzept wird ebenfalls die aktive Steuerung des Betankungskorbes untersucht. Technologien hierfür werden im DLR entwickelt und im skalierten Maßstab unter Nutzung von UAVs im Flugversuch erprobt. Im DNW-NWB (Deutsch-Niederländische Windkanäle – Niedergeschwindigkeits-Windkanal Braunschweig) wurden Windkanalversuche durchgeführt, um Beiwerte und Derivative eines aerodynamischen Modells zu bestimmen, das für die Entwicklung der Regelungsverfahren für den Betankungskorb benötigt wird (Abb. 4). Mit einem gesteuerten Korb lassen sich Störungen infolge Turbulenzen abschwächen und der Korb in seiner Position stabilisieren, wodurch der Receiver bei der Kopplungsaufgabe stark entlastet werden kann.



Abb. 4: Windkanalmessungen am skalierten, steuerbaren Betankungskorb

Dr. Gerald Rode
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Dr. Thomas Jagdhuber
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Oberpfaffenhofen

info-pks@dlr.de

Radarsignaturbestimmung und Bewertung militärischer Fluggeräte

Bei der Entwicklung militärischer Fluggeräte ist es besonders wichtig, bereits im Entwurfsprozess die Radarsignatur zu berücksichtigen, um die Überlebenswahrscheinlichkeit eines künftigen strahlgetriebenen (unbemannten) Fluggeräts zu erhöhen. Durch die Art des Materials selbst als auch durch dessen Anordnung kann die Radarsignatur für bestimmte Blickwinkelbereiche herabgesetzt werden.

Eine numerische Simulation der Radarsignatur dient den Entwicklungsingenieuren modernster militärischer Fluggeräte als Hilfe, um detektionskritische Bereiche aufzuspüren, wobei verschiedene Flugkonfigurationen berücksichtigt werden können (Abb. 1). Auf der anderen Seite ist die Kenntnis der Radarsignatur von Bedrohungen aus der Luft zu deren frühzeitiger Detektion, Verfolgung und Identifikation, als auch zu deren Bekämpfung notwendig. Mit Blick auf hypersonische Flugkörper muss dabei die Plasmabildung an Stoßkanten berücksichtigt werden (Abb. 2).

Die Radarsignatur kann durch hochgenaue Vermessung u. U. skaliertes Modelle in einer Absorberkammer gewonnen werden (Abb. 3) oder durch computergestützte Simulationen. Zu Letzteren werden exakte Verfahren verwendet wie die Momenten- oder Multipolmethoden oder auch deutliche schnellere und Ressourcen sparende asymptotische Verfahren wie Physikalische Optik oder Strahlverfolgungsmethoden unter Berücksichtigung von Kantenstreubeiträgen und Mehrfachreflexionen. Zusätzlich unterscheidet man zwischen quellenbasierten Methoden, welche die Stromdichteverteilung über die Körperoberfläche

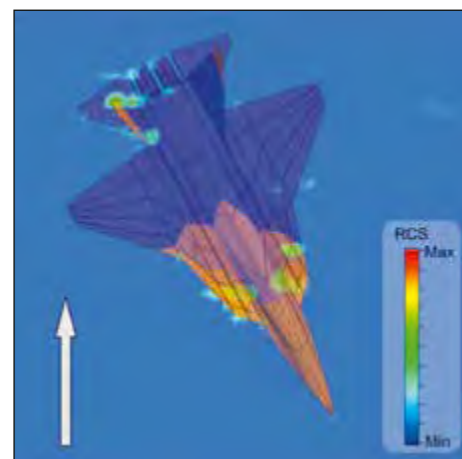


Abb. 1: Streuzentrenlokalisierung durch Inverses Synthetisches Aperturradar (ISAR), Blickrichtung siehe Pfeil

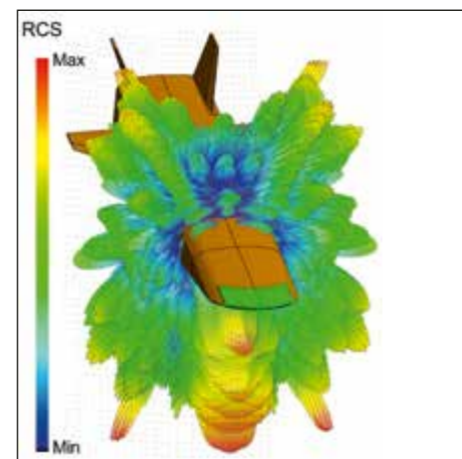


Abb. 2: Monostatische RCS-Verteilung eines Hyperschallflugkörpers unter Berücksichtigung von Plasmabildung

als Ursache der rückgestreuten Leistung ermitteln (Abb. 4), und feldbasierten, die das elektrische Feld zwischen benachbarten Volumenelementen bestimmen.

Zur Berechnung der hier gezeigten Signaturen wurde das kommerziell erhältliche Programm FEKO der Firma Altair verwendet, welches auch eine Kombination der verschiedenen Verfahren erlaubt.

Der Radarstreuquerschnitt (radar cross section, RCS) ist ein Maß für die zum Empfänger gestreute Energie. Monostatische Radaranlagen, bei denen sich Sender und Empfänger am gleichen Ort befinden, sind die am häufigsten verwendeten Sensoren zur Detektion und Aufklärung militärischer Fluggeräte. Der RCS-Wert kann für jedes Azimut-Elevations-Winkelpaar, unter dem das Flugzeug am Himmel gesehen werden kann, angegeben werden.

Bi- oder multistatische Radarsysteme mit räumlich weit getrennten Sendern und Empfängern gewinnen trotz höherer Komplexität und größerer Kosten zunehmend an Bedeutung, da sie u. A. ein wirksames Mittel gegen Stealthflugzeuge sein können. Der bistatische RCS ist durch vier Freiheitsgrade charakterisiert (Winkelposition des Empfängers und des Senders). In Abb. 5 ist daher die Senderposition fest vorgegeben.

Zusammen genommen bietet die Erforschung der Radarsignatur ein enormes Potential, die Lebensdauer von militärischen Fluggeräten auf hohem Niveau zu halten.

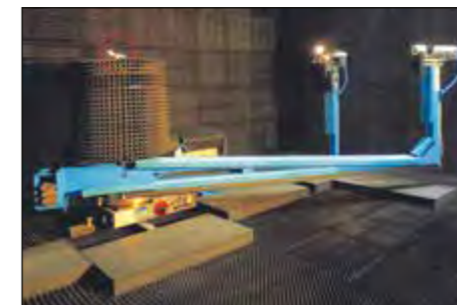


Abb. 3: Messplatz zur experimentellen Bestimmung des bistatischen Radarstreuquerschnitts (RCS, radar cross section), Messbereich 75 bis 110 GHz. Das zu messende (skalierte) Flugobjekt ist durch einen roten Kreis gekennzeichnet.

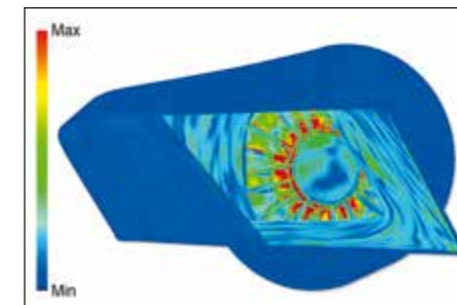


Abb. 4: Stromdichteverteilung in einem Triebwerk mit gekrümmtem Einlaufkanal als Ursache rückgestreuter Radarsignale

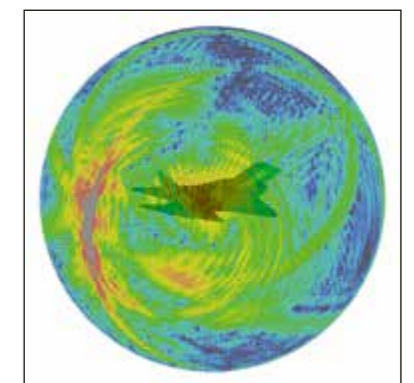


Abb. 5: Bistatische Radarsignatur, Senderposition direkt vor dem Flugzeug, 4° unterhalb der Nase

Untersuchung der instationären Aerodynamik eines Remote Carriers während des Flügelschwenkvorgangs

In dieser Studie wird die Aerodynamik und Flugmechanik eines Remote Carriers (RC) mit Schwenkflügeln numerisch untersucht. Hierzu wurde eigens eine Simulationsumgebung geschaffen, mit der auch generische Absetzmanöver solcher RCs etwa von einem A400M betrachtet werden können. Es zeigt sich, dass der Flügelschwenkvorgang beim Absetzen einen großen Einfluss auf die Trajektorie des RCs besitzt.

Remote Carrier (RC) sollen im Rahmen des Future Combat Air Systems (FCAS) im Verbund mit Kampfflugzeugen agieren und dabei möglichst lange Einsatzzeiten aufweisen. Letzteres kann durch das Absetzen des RCs von einem Trägerflugzeug (Abb. 1) in Zielgebietnähe erreicht werden. Für dieses Szenario ist ein RC mit Schwenkflügeln von Vorteil, da er beim Transport ein kleineres Lademaß und einen geringeren Luftwiderstand besitzt. Beim Absetzen muss jedoch gewährleistet sein, dass das Flügelschwenken nicht zu aerodynamisch und flugmechanisch kritischen Flugzuständen führt. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass die Massenträgheitsmomente und der Schwerpunkt während des Schwenkvorgangs variieren. In der hier präsentierten Studie wurde eine Simulationsumgebung aus DLR-eigenen Werkzeugen aufgebaut, um das aerodynamische Verhalten von RCs mit Schwenkflügeln numerisch untersuchen zu können. Neben der Berücksichtigung des Schwenkvorgangs bei der Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte erlaubt die Simulationsumgebung auch die Einbindung eines flugmechanischen Werkzeugs. Hierdurch kann etwa der freie Fall eines RCs während des Absetzens und der Übergang in die Flugphase simuliert werden.



Abb. 1: Beispiel für das Absetzen eines Remote Carriers von einem militärischen Transportflugzeug. Gezeigt ist das Absetzen einer DT25 vom A400M, welches im Rahmen des von Airbus initiierten UAV Launcher Projektes durchgeführt wurde (Quelle: Airbus)



Abb. 2: Entwicklung der Strömung am RC in Abhängigkeit des Flügelschwenkwinkels für eine Machzahl von 0,85 und einem festen Anstellwinkel von 1° . Die Abbildung zeigt die Oberflächendruckverteilung und die Wandschubspannungslinien

Die Simulationsumgebung wurde erstmalig erfolgreich am generischen RC GRC2B-2 angewandt. Dieser Entwurf eines transsonischen RCs mit Schwenkflügeln stammt aus dem DLR Flugkörperprojekt FK2020+. Charakteristisch für den RC sind die untereinander angeordneten Flügel, die in Flugkonfiguration eine positive Pfeilung von 31° bzw. einen Schwenkwinkel ϕ von 59° aufweisen.

Wie sich die Strömung am RC und im speziellen an den Flügeln bei transsonischer Fluggeschwindigkeit (Mach = 0,85) in Abhängigkeit von ϕ entwickelt, ist in Abb. 2 dargestellt. Anhand der gezeigten Oberflächendruckverteilungen und der Wandstromlinien lässt sich erkennen, dass die Flügel für kleine ϕ ($< 30^\circ$) erwartungsgemäß nur geringfügig zum Auftrieb beitragen. Das Druckniveau an der Flügeloberseite ist relativ hoch und liegt im Bereich der Anströmung. Eine weitere Zunahme von ϕ führt zu einem deutlich niedrigeren Druckniveau auf der Oberseite. Hierdurch nimmt die Auftriebswirkung der Flügel und das damit verbundene Nickmoment stark zu. Eine Analyse der Wandstromlinien für den Endzustand bei $\phi = 59^\circ$ zeigt, dass sich infolge der charakteristischen Flügelanordnung die Strömung im Bereich der Flügelwurzel asymmetrisch an Backbord und Steuerbord entwickelt. Hierdurch wird auch die Roll- und Gierlage des RCs beeinflusst.

Die Abhängigkeit der Aerodynamik vom Flügelschwenkwinkel wirkt sich auch auf das flugmechanische Verhalten aus. So hängt die Trajektorie des RCs nach dem Absetzen im freien Fall deutlich davon ab, ob der RC Schwenkflügel besitzt oder ob die Flügel sich von Beginn an in Endposition befinden. Dies konnte anhand gekoppelter Simulationen gezeigt werden. Abb. 3 präsentiert für einen Zeitpunkt 0,5 s nach dem Absetzen

die in den Simulationen ermittelte Position und Lage des RCs im Raum. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich die Flügel im Fall mit Schwenkflügel gerade in Endposition, so dass beide präsentierten Fälle denselben geometrischen Zustand besitzen, aber aerodynamisch eine unterschiedliche Vorgeschichte aufweisen. Der Einfluss des Schwenkvorgangs ist deutlich sichtbar. Infolge des zunächst geringeren Luftwiderstandes und der geringeren Auftriebserzeugung der Flügel weist der RC mit Schwenkflügel einen geringeren räumlichen Versatz zur Ausgangslage $t = 0$ s auf und auch die Rolllage wird vom Flügelschwenkvorgang deutlich beeinflusst.

Daten über das aerodynamische und flugmechanische Verhalten eines RCs sind in der Entwurfsphase eines RCs oder einer Absetzvorrichtung sowie für die Definition von Absetzszenarien von großer Bedeutung. Dasselbe gilt für die Betrachtung von möglichen Wiederaufnahmemanövern. Mittels der neu erstellten Simulationsumgebung können diese Daten jetzt auf numerischem Wege erzeugt werden.

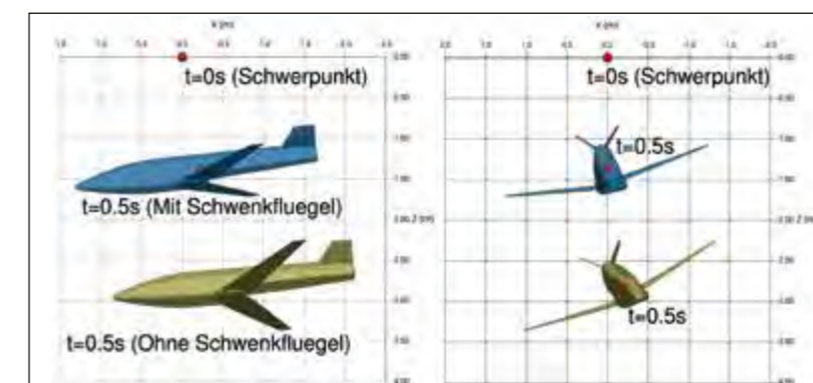


Abb. 3: Einfluss des Flügelschwenkvorgangs auf die Position und Lage des RCs im freien Fall 0,5 s nach dem Absetzen (Anfangsbedingungen: Machzahl = 0,85, Anstellwinkel = 1°)

Verifikation von Kameras für den Einsatz im Rahmen des Vertrags über den Offenen Himmel

Auch in herausfordernden Zeiten benötigen die Instrumente der Rüstungskontrolle weiterhin Aufmerksamkeit. Für den Vertrag über den Offenen Himmel wurden im Jahr 2022 neue digitale Kamerasysteme zertifiziert. Sensoren im Spektralbereich des thermischen Infrarots sollen in den kommenden Jahren folgen. Dafür müssen die wissenschaftlichen, technischen und prozeduralen Grundlagen erarbeitet werden.

Auch in Krisenzeiten ist es notwendig, die Instrumente der Rüstungskontrolle am Leben zu erhalten. Das schließt auch den 1992 geschlossenen Vertrag über den Offenen Himmel ein. Im Jahr 2022 haben Rumänien und Deutschland wichtige Schritte unternommen, die Relevanz des Vertrages zu stärken, indem sie erfolgreich neue Kamerasysteme zertifiziert haben. Dabei hat die Bundesrepublik Deutschland neben neuen Kameras auch eine neue Plattform zertifiziert – den Airbus A-319 OH und verfügt damit über das modernste Flugzeug für diese Aufgabe.

Der Vertrag über den Offenen Himmel erlaubt seinen Unterzeichnern das Überfliegen fremder Staatsgebiete und Anfertigen von Luftbildern mit gemeinsam festgelegten Parametern. Um allen Beteiligten die Sicherheit zu geben, dass diese Parameter eingehalten werden, ist eine hohe Transparenz entscheidend. Daher wurden bereits bei der Konzeption der Plattform und der Kamerasysteme Nachvollziehbarkeit und Überprüfbarkeit in den Vordergrund gestellt.

Die Verifikation von Sensoren und ihren Datenprodukten ist die zentrale Aufgabe während der Zertifizierung. Die Sensoren



Abb. 1: Das rumänische und das deutsche Flugzeug während der Inspektion am Boden



Abb. 2: Inspektoren an Bord des Airbus A319 OH während eines Inspektionsfluges (Quelle: Dagmar Benner)

müssen in vielen Belangen wie z. B. Brennweite, Scharfstellung und Blendeneinstellung unveränderbar sein, damit ihre Leistungsparameter bei späteren Missionen nicht verändert werden können. Die Inspektoren der Vertragsstaaten müssen in der Lage sein, die Eigenschaften der Kamerasysteme einfach und sicher mit den vorher zur Verfügung gestellten Dokumentationen vergleichen zu können.

Im Oktober und November 2022 versammelten sich Spezialisten aus 23 Vertragsstaaten in der Nähe des Flughafens Köln/Bonn, um die Eigenschaften und Prozeduren der neuen Kamerasysteme im Hinblick auf ihre Übereinstimmung mit dem Vertragswerk zu überprüfen. Sie konnten dabei sowohl die rumänische Antonov An-30B, als auch den deutschen Airbus A-319 OH gründlich untersuchen und die Sensoren sowohl am Boden als auch beim Betrieb aus der Luft kontrollieren.

Um spezifische Fragen in Bezug auf Sensoren, Datenverarbeitung und die Eigenschaften der Datenprodukte beantworten zu können, waren sowohl Experten der Hersteller von Sensoren und Plattform als auch Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) anwesend. Die Unterstützung durch Wissenschaftler des Instituts für Optische Sensorsysteme des DLR wurde durch einen Vertrag mit dem Zentrum für Verifikation der Bundeswehr ermöglicht.

Der Vertrag über den Offenen Himmel erlaubt auch die Verwendung von Kameras für den Spektralbereich des thermischen Infrarots. Solche Sensoren sind bereits im A-319 OH eingebaut. Um diese später ebenfalls für die Nutzung im Vertrag zertifizieren zu können, müssen Verfahren für die Zertifizierung dieser Sensoren erarbeitet und mit Experten der beteiligten



Abb. 3: Ein Inspektor bei der Bildauswertung von Aufnahmen des Kalibrierzieles (Quelle: David Porschen)

Vertragsstaaten abgestimmt werden. Die Beratungskommission Offener Himmel (OSCC) kann dann Entscheidungen treffen, wie solche Zertifizierungen durchzuführen sind.

Wissenschaftliche Unterstützung ist unabdingbar bei der Entwicklung von Methoden zur Verifikation von Kameras für das thermische Infrarot, die für alle Vertragsstaaten nachvollziehbar und akzeptabel sind. Durch die spezifischen Eigenschaften infraroter Strahlung können die bekannten Instrumente zur Verifizierung von digitalen Luftbildkameras nicht einfach übernommen werden. So sind beispielsweise neue Kalibrierziele zu entwickeln. Die Bundeswehr und das DLR werden dazu in den kommenden Jahren weiter zusammenarbeiten.

Dr. Gerd Wagner
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Technische Physik
Stuttgart

info-pks@dlr.de

Wolfgang Riede
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Technische Physik
Stuttgart

info-pks@dlr.de

Das Johannes Kepler Observatorium des DLR: Eine einzigartige Bodenstation zur laseroptischen Bewertung der Weltraumlage

Laseroptische Verfahren ermöglichen neben der Ortung von orbitalen Objekten weitere wichtige Beiträge zur Aufklärung, wie die Analyse der Objektdynamik, Materialzusammensetzung und Objektstruktur. Das Johannes Kepler Observatorium des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) ist aufgrund seiner Auslegung das leistungsfähigste Observatorium in der Europäischen Union und kann wichtige Beiträge zur Bewertung der Weltraumlage leisten.

Der sichere Satellitenbetrieb im Erdorbit wird durch eine stetig zunehmende Objektpopulation gefährdet. Ein Großteil der orbitalen Objekte besteht aus inaktiven Satelliten, aus Oberstufen bzw. Fragmenten, welche beim regulären Betrieb, und infolge von Kollisionen und Explosionen entstanden sind. Diese Objekte werden noch für viele Jahrzehnte im Erdorbit verbleiben, bevor der natürliche Bahnabstieg zum Wiedereintritt führt. Insbesondere kleine Teile mit Abmessungen von wenigen Zentimetern bis zu wenigen Dezimetern sind missionskritisch und stellen aufgrund ihrer großen Anzahl eine besondere Gefahr für Satelliten dar. Die Bahnen dieser missionskritischen Objekte sind nur zum kleinen Teil und auch nur mit unzureichender Genauigkeit bekannt.

Eine hochgenaue Ortung mit Genauigkeiten im Meterbereich bzw. Submeterbereich und anschließender Bahnbestimmung ist mit Laserlaufzeitverfahren (Satellite Laser Ranging) realisierbar. Diese genaue Bahnbestimmung ist eine Voraussetzung für fundierte Annäherungs- und Kollisionswarnungen bzw. für die Planung von effizienten Ausweichmanövern. Die Ortung dieser diffus streuenden, kleinen Schrottoobjekte erfordert einen

gepulsten Lasertransmitter mit entsprechend hoher Sendeleistung bzw. hoher Pulsenergie. Eine weitere Voraussetzung ist die Verfügbarkeit eines Empfangsteleskops mit großer Apertur, typischerweise von über einem Meter Durchmesser, um die relevanten Objektgrößen mit Abmessungen im Dezimeterbereich detektieren zu können.

Neben den (inaktiven) Weltraumschrottoobjekten hat auch die Anzahl an aktiven Satelliten deutlich zugenommen, insbesondere aufgrund des Betriebes von Satelliten in Form von Megakonstellationen wie beispielweise das Starlink Satellitennetzwerk. Für die generelle Objektaufklärung bzw. Statusanalyse von aktiven Satelliten ist entsprechend nicht nur die präzise Verortung erforderlich, sondern auch die Analyse von Struktur und Dynamik von Satelliten im Vordergrund. Diese Aufgabenstellungen können durch laseroptische bzw. passiv-optische Verfahren im sichtbaren bzw. infraroten Spektralbereich adressiert werden und sind zentraler Forschungsgegenstand des Johannes Kepler Observatoriums des DLR. Das Forschungsobservatorium für Satelliten und Weltraumschrott des DLR trägt den Namen Johannes Kepler, der als Mitbegründer der neuzeitlichen Astronomie gilt.

Das Hauptinstrument des Johannes Kepler Observatoriums ist ein Spiegelteleskop mit einem Primärspiegeldurchmesser von 1,75 Metern mit vier umschaltbaren Nasmythports und einem vorkonfigurierten Coudé-Pfad. Der Coudé-Pfad bietet zukünftig die Möglichkeit zur Einkopplung eines Lasers in das Teleskop und der zusätzlichen Nutzung als Transmitter. Die agile Montierung erlaubt die Nachführung auf Objekte im niedrigen Erdorbit.

Der Standort des Observatoriums befindet sich am Innovationscampus in Empfingen in der Region Nordschwarzwald in 520 Metern Höhe, rund 60 Kilometer südwestlich von Stuttgart auf einem zugangskontrollierten Gelände mit geringer Lichtverschmutzung. Das Observatorium hat eine Gebäudehöhe von 15 Metern und besitzt einen drehbaren Schlitzdom mit einem Durchmesser von 7,5 Metern. Hochauflösende Kameras und ein Gitterspektrometer sind für die Analyse der Objektdynamik, Materialzusammensetzung und Struktur orbitaler Objekte vorgesehen. Die Montierung ermöglicht Nachführgeschwindigkeiten von bis zu 10°/s. Hiermit ist das Objekttracking im niedrigen Erdorbit möglich. In ersten Kampagnen konnte hochgenaues optisches Tracking von kleinen Objekten in CubeSat Größe demonstriert werden.

Geplant sind zukünftig bistatische Kampagnen mit dem verlegbaren Lasercontainer und dem Kepler Observatorium, in welchen der Lasercontainer als Transmitter dient und das Kepler Observatorium als Empfänger.



Abb. 1: Aktuelle Darstellung der katalogisierten Objekte im niedrigen Erdorbit (Quelle: NASA Orbital Debris Program Office)



Abb. 2: Laseroptische Bodenstationen am Standort Empfingen: Verlegbarer Lasercontainer im Vordergrund und Johannes Kepler Observatorium im Hintergrund



Abb. 3: Spiegelteleskop und Montierung im Kuppelraum des Johannes Kepler Observatoriums



Abb. 4: Teleskopmontierung mit Empfangsteleskop (links) und Sendeteleskop (rechts) auf der Hubplattform der containerisierten Bodenstation (STAR-C: Surveillance, Tracking and Ranging Container)

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

info-pks@dlr.de

Dr. Matthias Mück
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung
Trauen

info-pks@dlr.de

OTTER – Maritimes Lagebild

Mit zunehmender Abhängigkeit von weltraumgestützten Fähigkeiten steigt die Relevanz diese kritische Infrastruktur zu schützen und sie rasch ausbauen und ersetzen zu können. Das Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung baut in diesem Kontext eine Technologiebasis auf und führt Demonstrationen durch. Die erste Kleinstsatellitenmission – OTTER – wird zu einem maritimen Lagebild beitragen können.

Im engen Austausch mit Industrie, Nutzer und Forschungsinstituten führt das durch das BMVg grundfinanzierte Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung (RSC³) des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) ein Kleinstsatellitenprojekt, genannt OTTER (Optical Traffic Tracking for Responsive Space), durch. Die Herausforderung der Mission ist das Herstellen einer Erstbefähigung des RSC³ zur Forschung an Responsive Space Fähigkeitslücken. Für den Missionszeitraum von Kick-Off bis Flugfertigkeit des Satelliten sind sechs Monate angesetzt. Die Mission bietet damit eine Grundlage zur Identifikation der Bedarfe, im militärischen Ernstfall notwendige Fähigkeiten reaktionsschnell zur Verfügung zu stellen – und zwar in allen Phasen des Satellitenentwicklungsprozesses. Dies fördert die Erschließung des nötigen Wissens, um die Forschungsinfrastruktur in Trauen geeignet auszubauen.

Das operationelle Ziel des Projektes ist es, nach erfolgreicher Verbringung des Satelliten in den Weltraum, mittels AIS-Empfänger (Automatic Identification System) und visueller Kamera kooperative Ziele auf dem Meer zu detektieren und



Abb. 1: Concept of Operations für OTTER:
1) Start mit ISAR Aerospace Spectrum Rocket aus Andøya, Norwegen
2) Separation im niedrigen, elliptischen Erdorbit 250 km bis 350 km
3) Aufnahme von AIS-Signalen und optischen Bildern von Schiffen

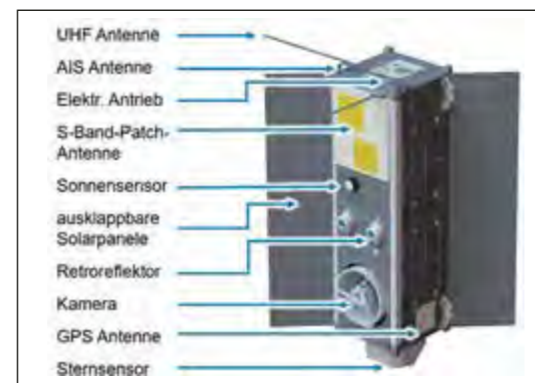


Abb. 2: Der Satellit OTTER

ihre Position optisch zu bestätigen (Abb. 1 und Abb. 2). In umgekehrter Reihenfolge wird durch die Zuordnung von AIS-Signalen zu visuellen Bildaufnahmen eines Interessengebiets das Erfassen von unkooperativen Zielen ermöglicht (Abb.3). Für das Projekt OTTER wird eine Fusion von Multisensordaten aus dem Weltraum mit luft-, land- und seegestützten (über und unter Wasser) Daten angestrebt, um einen sicherheitsrelevanten Mehrwert im Sinne der Interoperabilität und Resilienz zu bieten. Das RSC³ geht dazu in den Austausch sowohl auf nationaler und als auch internationaler Ebene mit dem DLR-Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen, dem Marine Kommando (Einsatzflottille 1) und der Industrie zur KI-basierten Auswertung. Im Kontext der NATO plant das RSC³ Kooperationen mit dem Center of Excellence for Operations in Confined and Shallow Waters sowie dem Centre for Maritime Research and Experimentation.

Auf diese Weise bedient die Mission einen sehr aktuellen Forschungsbedarf: Die Erweiterung des maritimen Lagebilds aus dem Orbit zur weiträumigen Detektion auffälligen Verhaltens von Schiffen. Illegale Eingriffe in die Infrastruktur auf See, wie im Falle der Sabotage an den Nordstream-Gasleitungen in der Ostsee, können damit aufgeklärt werden, aber auch Ölunfälle, illegale Fischerei oder Schmuggel. Für den Aspekt einer beschleunigten Bereitstellung eines AIS-Sensors konnten bereits folgende Erkenntnisse aus dem Projekt OTTER gewonnen werden: Ein Vorgehen nach ECSS (European Cooperation for Space Standardization) für die Planung einer Mission erfordert zu umfangreiche Dokumentation und zu viel Zeitaufwand, um schnell einen Bedarf zu decken. Hier werden neue schlanke Management- und automatisierte Dokumentationsprozesse zum Einsatz kommen müssen. Die Beschaffung nach EU-

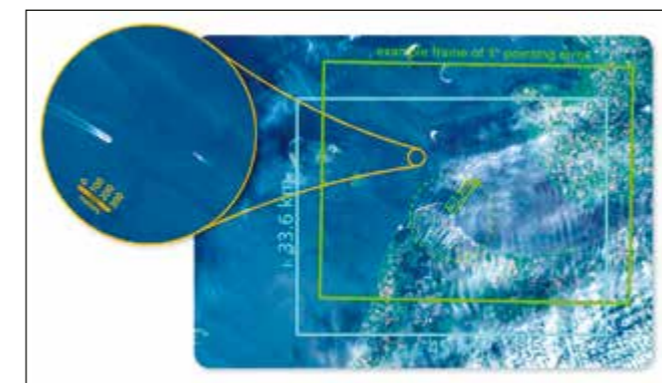


Abb. 3: Bild von Cuxhaven zusammengestellt aus ESA-Daten von Sentinel 2A (Level-1C, Echtfarben, 10 m Bodenpixelauflösung); Rechtecke zeigen OTTER's Bildgröße bei 350 km Orbithöhe, Nadir ausgerichtet und den worst case mit 1° Lagefehler. Lupe vergrößert Schiffe mit ca. 100 m und 200 m Länge

Vergaberecht im November 2021 beanspruchte mehrere Monate. Hieraus lässt sich ein Bedarf an Bevorratung von modularen, offenen und einsatzbereiten Satellitensystemen unterschiedlicher Gewichtsklassen ableiten. Diese müssen flexibel gegenüber kurzfristig angeforderten Nutzlasten sein. Für die reaktionsschnelle Verbringung einer Nutzlast sind ad-hoc Raketenstarts notwendig. Hier spielen zukünftig Micro-launcher, see- und luftgestützte Startdienstleistungen eine Rolle. Mit OTTER konnte das RSC³ bei einem Nutzlastwettbewerb, den die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ausgeschrieben hatte, einen kostenlosen Mitflug auf dem Jungferflug der Firma ISAR Aerospace gewinnen (Abb. 4). Dieser bietet eine Separation in einem 250 km bis 350 km hohen elliptischen Orbit, welcher mittels elektrischen Antriebes auf eine Höhe von 400 km zirkularisiert wird, um eine Lebensdauer von ca. 4 Jahren zu ermöglichen. Mit geplantem Start Mitte 2023 und Flugfertigkeit des Satelliten Ende 2022, kann die Lagerhaltung erprobt werden.



Abb. 4: Gewinner des ersten Nutzlastwettbewerbs für den Erstflug des deutschen Mikrolaunchers Spectrum: Das DLR-Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung (RSC³) aus Trauen

Marc Lehmann
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung
Trauen

info-pks@dlr.de

Raumgestützte Raketensignaturvermessung mit Infrarot-Kleinsatelliten anhand von Abbrandversuchen am Boden

Hyperschallflugkörper sind im Gegensatz zu ballistischen Raketen durch boden- und seegestützte Aufklärung schwer rechtzeitig zu detektieren. Eine Detektion mit größerer Vorwarnzeit kann durch raumgestützte Aufklärung realisiert werden. Ein erster Schritt zur Detektion ist die Vermessung von Signaturen von Raketenmotoren. Dieses Ziel wird durch das Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung (RSC³) mit dem Projekt HERMELIN verfolgt.

Für die raumgestützte Aufklärung von Raketenstarts und deren Flugbahnen mit Satelliten zeichnen sich Infrarot-Detektoren, welche auf die Wärmestrahlung des Raketenantriebes und des Abgasstrahls reagieren, als wichtigste Sensorik aus. Satellitengestützte IR-Sensorik ist unter anderen bereits erfolgreich zur Beobachtung von Vegetation und Waldbränden im Einsatz. Vorausgesetzt ihre Bodenpixelauflösung ist fein genug, können Satelliten als erste Technologiedemonstration der Raketen-Detektion aus dem All verwendet werden. Da diese feiner auflösenden Satelliten bisher nur einzeln als Technologiedemonstratoren auf dem Orbit sind, muss ein zu beobachtender Raketentest zeitlich sehr genau mit einem Überflug eines entsprechenden Satelliten abgestimmt werden. Für eine Signaturvermessung können aber nicht nur Testflüge von Raketen, wie beispielsweise der mobilen Raketenbasis MORABA, sondern auch bodengestützte Abbrandversuche genutzt werden. Letztere finden für die Entwicklung von Hybridraketenantrieben regelmäßig am DLR-Standort in Trauen statt.

Um diese Tests in Zukunft regelmäßig mit entsprechender Sensorik zur Erfassung der Signatur der Triebwerke begleiten



Abb. 1: Blick auf den Teststand mit den Kameras für das visuelle (links) und das infrarote Spektrum (rechts) im Vordergrund



Abb. 2: Abgasstrahl des Motors im visuellen Spektrum

zu können, hat das RSC³ mit dem Projekt HERMELIN einen Pilotversuch durchgeführt. Hierbei wurde ein Abbrandversuch des neu entwickelten Hybridraketenantriebes VISERION mit dem Überflug eines Kleinsatelliten für die Waldbrandfernerkundung synchronisiert. Um zusätzliche Daten für eine Kalibrierung zu erhalten, wurde der Versuch am Boden mit einem baugleichen Modell der IR-Kamera des Satelliten aufgenommen (siehe Abb. 1). Für eine Modellierung der Raketensignatur bieten die bodengestützten Aufnahmen, aufgrund der deutlich kürzeren Entfernung, einen höheren Detailgrad und einen vernachlässigbaren Einfluss der Atmosphäre. Gleichzeitig können die satelliten- und bodengestützten Aufnahmen direkt miteinander verglichen werden.

Für die raumgestützte Aufnahme wurde ein 20 kg schwerer Waldbrandfernerkundungs-Satellit gewählt. Diese Satellitenklasse ist aufgrund ihrer geringen Kosten besser für den Aufbau einer Konstellation geeignet, welche für eine durchgängige und lückenlose Erdfernerkundung unumgänglich ist.

Die Herausforderung der Beobachtung von Raketenmotortests mit Satelliten lassen sich in drei Punkte zusammenfassen:

- Die Abbrandversuche stellen eigenständige Versuchsanordnungen dar, die zur Entwicklung des Triebwerks durchgeführt werden.
- Die Überflüge von Satelliten erzwingen ein Zeitfenster von wenigen Minuten für den Versuch. Darüber hinaus ergibt sich in den meisten Fällen nur ein Zeitfenster pro Tag, wobei nicht jeder Überflug einen guten Sichtwinkel bietet.
- Wetter stellt einen äußeren Einfluss dar, da die Messung aus dem Weltraum einen wolkenlosen Himmel voraussetzt.

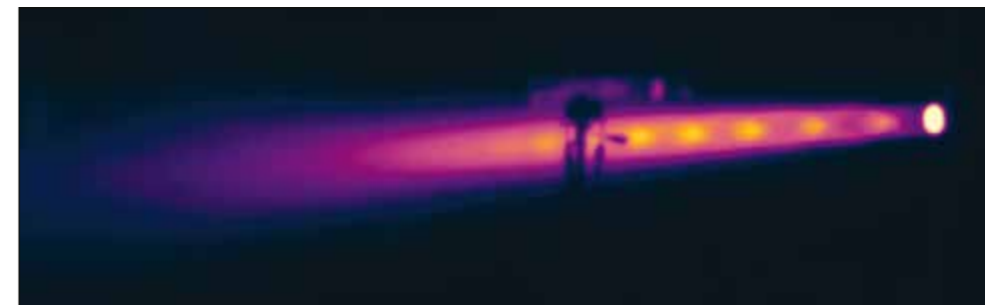


Abb. 3: Abgasstrahl des Motors im infraroten Spektrum; am Boden aufgenommen mit der gleichen Kamera, die der Satellit nutzt

Für das Team, welches den Abbrandversuch durchführt, ergeben sich dementsprechend starke zeitliche Einschränkungen. Darüber hinaus müssen jedoch keine Änderungen an dem Versuch durchgeführt werden und das Potential für Synergien ist sehr groß.

Für das Projekt HERMELIN koordinierte das RSC³ die beteiligten Teams, um den Abbrandversuch des VISERION Triebwerks in einen Zeitraum mit möglichst optimalen Überflügen des Satelliten zu legen. Am 29.09.2022 konnte erfolgreich die IR-Signatur des Triebwerks vom Boden aus vermessen werden (siehe Abb. 2 und Abb. 3). Aufgrund von Bewölkung während des Satelliten-Überflugs konnte aus dem Weltraum kein Signal aufgenommen werden.

Für die nächsten Abbrände im Jahr 2023 werden weitere Versuche unternommen, wobei die Vorhersage eines günstigen Zeitfensters und die Ablaufpläne der Experimente weiter optimiert werden. Hierdurch leistet das RSC³ am Standort Trauen jetzt Vorbereitungen für einen wichtigen Beitrag für die kommenden Satelliten, die dediziert für die Raketenfrühwarnung eingesetzt werden.

Dr.-Ing. Marvin Becker
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr.-Ing. Andreas Klavzar
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Neuronale Netze zur Bestimmung des Verhaltens von Reaktivschutz

Ein effektiver Reaktivschutz (ERA) kann gegen eine bestimmte Bedrohung mit verschiedenen klassischen Ansätzen, wie zum Beispiel Versuchen oder numerischen Simulationen, ausgelegt werden. Am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) wurde die Verwendung von Artificial Neural Networks (ANN) getestet, um das dynamische Verhalten von verschiedenen ERA Konfigurationen vorauszusagen.

Reaktivschutz wird seit den 1960er Jahren entwickelt, ist aber nach wie vor von großem Interesse als Schutzsystem gegen Pfeilgeschosse (APFSDS) oder Hohlladungsgefechtssköpfe. Insbesondere mit Blick auf neue Bedrohungen müssen Reaktivschutzlösungen in Überlegungen zum Schutz mobiler Plattformen einbezogen werden, um die Masse des ballistischen Schutzes zu begrenzen. Die Effektivität einer Reaktivschutzlösung gegen eine bestimmte Bedrohung wird von verschiedenen Parametern bestimmt, wie zum Beispiel dem dynamischen Werkstoffverhalten, der Geometrie, der Art des Sprengstoffs, dem Ort des Treffers, dem Auftreffwinkel, etc. Abhängig von der Bedrohung und der Anwendung müssen viele verschiedene Systemkonfigurationen geprüft werden, um für die verschiedenen denkbaren Bedrohungsszenarien die optimale Schutzlösung mit der geringsten Masse zu finden. Insbesondere, wenn eine ERA gegen verschiedene Bedrohungen ausgelegt werden soll, kann die Bestimmung der optimalen Lösung sehr zeit- und kostenintensiv werden.

Um eine ERA auszulegen, gibt es verschiedene klassische Ansätze, wie z. B. experimentelle Versuche, analytische Modelle,

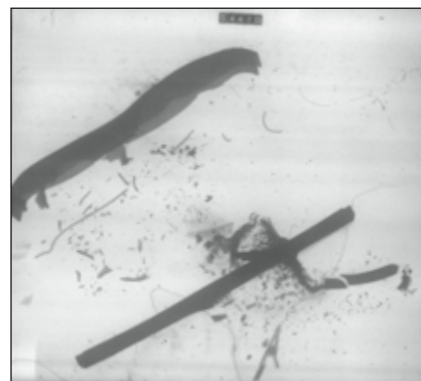


Abb. 1: Experimentelles Ergebnis einer ERA gegen ein APFSDS Projektil, einfach belichtete Röntgenblitzaufnahme



Abb. 2: Numerische Simulation einer ERA gegen ein APFSDS Projektil

oder numerische Simulationen mit Finiten Elemente Codes. Den Ergebnissen dieser Methoden mangelt es oft an Genauigkeit aufgrund von vereinfachenden Annahmen, welche getroffen werden müssen, ungenauen Werkstoffmodellen oder Zeit- und Kosteneffizienz. Außerdem wird die beste Lösung oft nach dem Verfahren „trial and error“ ermittelt.

ANN sind eine Technik der künstlichen Intelligenz (AI), welche derzeit in zahlreichen naturwissenschaftlichen Gebieten erfolgreich angewandt wird, insbesondere dort, wo große Datenmengen oder Parameterräume analysiert werden müssen, wie es z. B. bei der Interaktion einer ERA mit einer Bedrohung der Fall ist.

Am ISL wurde gezeigt, dass neuronale Netze in der Lage sind, das dynamische Verhalten einer ERA mit verschiedenen Konfigurationen aus unterschiedlichen Werkstoffen, Plattengeometrien oder den Orten der Initiierung vorauszusagen. Grundlage für die vom neuronalen Netz verwendeten Trainingsdaten waren präzise kalibrierte Simulationsmodelle. Das neuronale Netz konnte, abhängig von der Qualität der Daten, welche zum Anlernen des neuronalen Netzes verwendet wurden die Deformation und die Geschwindigkeit der ERA-Platten für verschiedene Konfigurationen mit hoher Genauigkeit und in sehr kurzer Zeit vorhersagen. Die Ergebnisse wurden anhand von Röntgenaufnahmen aus Versuchen bestätigt.

Während numerische Simulationen z. B. unter Verwendung der Finite Elemente Methode mehrere Minuten bis Stunden benötigen, bestimmt ein neuronales Netz das Ergebnis in Bruchteilen einer Sekunde. So können viele verschiedene Konfigurationen getestet werden, um eine optimale Lösung

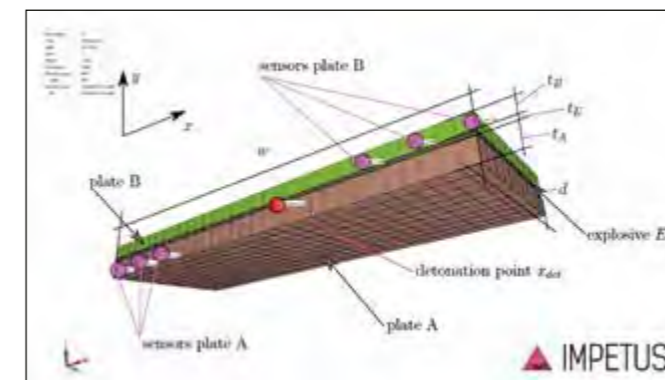


Abb. 3: Numerisches Modell als Basis der vom neuronalen Netz verwendeten Trainingsdaten

zu finden. In einem nächsten Schritt soll geprüft werden, ob mit neuronalen Netzen auch die Effektivität von verschiedenen ERA Konfigurationen hinsichtlich ihrer Masseneffektivität vorhergesagt werden kann. Darüber hinaus könnten neuronale Netze für Vulnerabilitätsanalysen in taktischen Simulationstools, bei denen viele verschiedene Szenarien in sehr kurzer Zeit geprüft werden müssen, genutzt werden.

Die Arbeit wurde beim Internationalen Ballistiksymposium in Reno, Nevada in 2022 mit dem Louis und Edith Zernow Preis für die fortschrittlichste Arbeit im Bereich der Grundlagen der Ballistik ausgezeichnet.

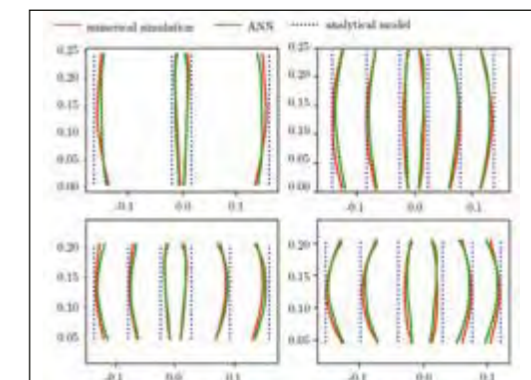


Abb. 4: Vergleich der Plattengeschwindigkeiten und -deformationen aus analytischen Lösungen, numerischen Simulationen und aus einem neuronalen Netz

Dr. Ralf Hassdorf
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr. Sigo Scharholz
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

SiC-basierte Leistungshalbleiter-Bauelemente für die wehrtechnische Anwendung

Das Deutsch-Französische Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) stärkt Technologie- und Vorausentwicklung zu unikalen Hochleistungshalbleiter-Bauelementen auf der Basis des Halbleitermaterials Siliziumkarbid (SiC). Es stellt eine weithin anerkannte Expertise zur qualifizierten Charakterisierung von Halbleiter-Bauelementen mit seiner automatisierten Wafer-Testplattform bereit. Darüber hinaus entwickelt das ISL kompakte, induktive Zwischenspeicher und auf SiC basierte Hochspannungs-Impulsgeneratoren mit hoher Repetitionsrate.

Elektrisch betriebene Waffen- und Schutzsysteme erfordern spezifische Hochleistungsimpulsversorgungen, in ihrer Form so kompakt und effizient wie möglich. Diese sind jedoch kommerziell zumeist nicht verfügbar. Im ISL wurden umfangreiche Forschungsarbeiten zu leistungselektronischen Komponenten betrieben, insbesondere zu Leistungshalbleiter-Bauelementen, zu konventionellen Halbleiterschaltern auf Basis von Silizium (Si) sowie zu neuartigen Halbleitermaterialien wie Siliziumkarbid (SiC).

Aufgrund seiner herausragenden physikalischen Eigenschaften übertrifft SiC das Standardmaterial Si bei weitem und erlaubt eine Herstellung von Bauelementen mit höherer Sperrfähigkeit, einer zehn- bis hundertfach höheren Leistungsdichte sowie höheren Schaltgeschwindigkeiten. Bipolare SiC-Bauelemente gelten als Schlüsselemente für künftige elektrisch betriebene Waffen- und Schutzsysteme. In Kooperation mit seinem Partner „Laboratoire Ampère“, Lyon, gelang dem ISL als erstem, die lichtgetriggerte Zündung eines Thyristors mittels emittierender Leuchtdioden darzustellen. Das ISL entwickelte einen vollständigen Herstellungsprozess für innovative und hocheffiziente



Abb. 1: 100 mm-Epi-Wafer samt SiC-Thyristor-Bauelementen mit unterschiedlichen Abmessungen

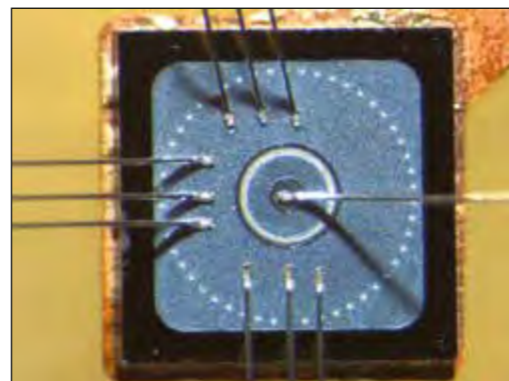


Abb. 2: Abbild eines experimentellen, 3,2 x 3,2 mm² großen, SiC-amplifying gate-Thyristors in elektrischer Testkonfiguration (verbunden mit Bond-Drähten sowie rückseitig aufgelötet). Quelle: Aus S. Scharholz et al., <https://doi.org/10.4028/p-ztr5d7>

Dr. Rainer Bischoff
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Dr. Bertrand Vergne
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

SiC-Thyristoren in der 10 kV-Klasse und konsolidierte seine Bauelement-Technologie bis hin zu einem qualifizierten 100 mm-Wafer-Prozess (Abb. 1). Im Rahmen eines von französischer Seite geförderten Projekts konzentrierte das ISL seine Entwicklung auf elektrisch getriggerte amplifying gate-Thyristoren (Abb. 2) und demonstrierte ein konzeptionelles Design, das typischerweise in konventionellen, großflächigen phase control- und lichtgetriggerten Si-Thyristoren Anwendung findet. Als nächster Schritt werden die gewonnenen Ergebnisse an industrielle Partner transferiert und im Rahmen einer Kleinserienfertigung der wehrtechnischen Anwendung zugänglich gemacht.

Das ISL bietet mit seiner automatisierten 20 kV-Wafer-Testplattform (Abb. 3) weithin anerkannte Dienstleistungen im Bereich der Charakterisierung von Leistungshalbleiter-Bauelementen an. Das System erlaubt eine systematische Prüfung von einzelnen Bauelementen bis zu einem vollständigen wafer mapping bei Temperaturen von bis zu 700 K, wodurch wichtige Informationen zu Betrieb und Zuverlässigkeit der Elemente, wie Durchbruchfestigkeit und Verlustleistung, zugänglich werden.

Die rasch fortschreitende Entwicklung im Bereich der halbleiterbasierten Hochspannungs-Schalterlösungen ermöglicht es, die klassischen gasentladungs-basierten Hochspannungsgenera-

toren (Marx) durch halbleiterschalter-basierte Modelle zu ersetzen und die Forderung nach solchen gepulsten Stromquellen für spezielle wehrtechnische Kurzpulsanwendungen zu erfüllen. Die potenziellen Vorteile sind bemerkenswert, wie z. B. Zuverlässigkeit, unmittelbare Betriebsbereitschaft, erhöhte Puls-wiederholfrequenz, präzise Synchronisation und einfache Skalierbarkeit. Im Auftrag des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Schutztechnologien – ABC-Schutz (WIS) entwickelt das ISL Schaltarrays auf der Basis von kommerziell verfügbaren (COTS) SiC-MOSFET-Bauelementen, die die Anforderungen an Schließ-schalter in einem halbleiter-basierten Marx-Generator erfüllen. Ziel ist eine Schaltspannung von mindestens 15 kV bei einem Laststrom von einigen kA, verbunden mit einer Anstiegszeit von weniger als 20 ns. Mit Hilfe eines speziellen Testboards (Abb. 4) wurden die notwendigen technischen Lösungen für einen Generator der 100 kV-Klasse erarbeitet: eine induktive galvanische Trennung der in Reihe geschalteten SiC-MOSFETs, Schutzschaltungen gegen transiente Überspannungen, Spannungsausgleich zwischen den einzelnen SiC-MOSFETs und eine spezielle Ansteuerung für ein synchrones, aktives Ein- und Ausschalten aller SiC-MOSFETs.

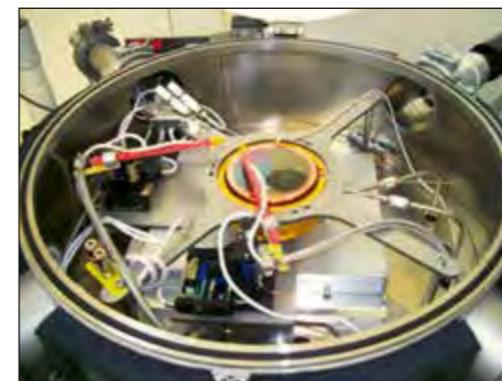


Abb. 3: Einblick in das Innenleben der automatisierten 20 kV-Vakuum-Waferprober-Teststation des ISL



Abb. 4: Testboard zur Untersuchung von SiC-MOSFET-Schalter-Arrays, hier bestückt mit 40 SiC-MOSFETs in einer (10 x 4)-Anordnung

Inflation bei Rüstungsgütern: Auswirkung der Teuerung auf die Beschaffung von Waffensystemen

Aufgrund der Entwicklungen in 2022 widmete sich die Forschungsgruppe Defence Acquisition & Supply Management (DASM) den Folgen steigender Preise. Die Inflation liegt im Verteidigungssektor über der allgemeinen Teuerung, was bzgl. des Sondervermögens gravierende Kaufkrafteffekte hat. Insgesamt besteht ein „Kostendilemma“, was die weitere Etablierung eines strategischen Kostenmanagements erfordert.

Der Verteidigungssektor lebt – wie fast alle anderen staatlichen Sektoren und Wirtschaftsbranchen auch – von arbeitsteiligen Systemen. Die Bundeswehr beauftragt Unternehmen. Einsatz- und Leistungsfähigkeit der Bundeswehr hängt daher in materieller Hinsicht von der Leistungsfähigkeit der Lieferkette ab.

Von entscheidender Bedeutung ist, dass der Auftraggeber strategische Kostenkompetenz hat, um die Kostenstrukturen seiner Lieferanten beurteilen zu können. Nur so ist eine Angebotsbewertung bzw. eine Beurteilung von Kostenabweichungen während der langen Produktlebensdauer möglich. Vor dem Hintergrund des 100 Mrd. €-Sondervermögens bzw. der Ankündigung der Bundesregierung, sowohl das 2 %-Ziel der NATO einzuhalten als auch eine der an den besten ausgerüsteten Armeen in Europa zu bekommen, wird strategische Kostenkompetenz (mit) erfolgsentscheidend sein.

Im September bzw. Oktober 2022 berichtet das Statistische Bundesamt (Pressemitteilung Nr. 397 und 458) von einer allgemeinen Inflationsrate i. H. v. 10,4 % und gar von einem Anstieg der Erzeugerpreise um 45,8 %. Diese Entwicklungen

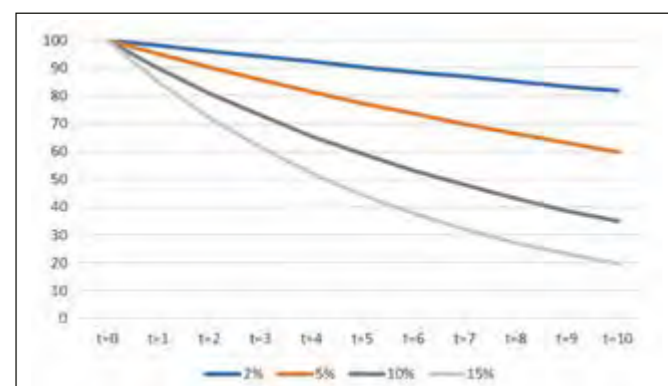


Abb. 1: Indikation für mögliche Kaufkraftverluste des Sondervermögens

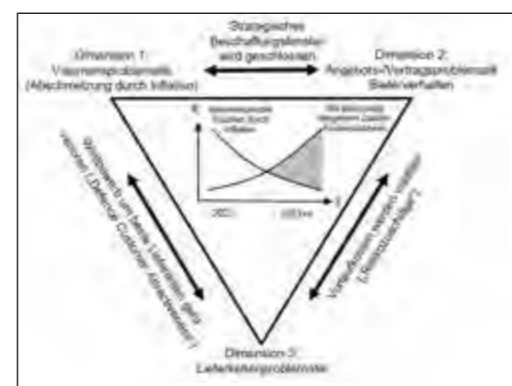


Abb. 2: Strategisches Kostendilemma

müssen in einem strategischen Kostenmanagement zwingend berücksichtigt werden. Lieferanten können diese Preissteigerungen nicht mehr alleine bewältigen, da diese existenzgefährdend sein können und so die Versorgungssicherheit der Bundeswehr akut gefährden. Hinzu kommt, dass gleichzeitig die Inflationsrate das Sondervermögen abschmelzen lässt. Abhängig von der Inflationsrate ergäben sich gravierende Kaufkraftverluste. So führt eine dauerhafte Teuerung von 5 % dazu, dass die reale Kaufkraft des Sondervermögens in fünf Jahren um etwa ein Viertel sinkt (in Szenarien in Abb. 1). So entsteht ein strategisches Kostendilemma der Bundeswehr-Lieferkette.

Das strategische Kostendilemma der Bundeswehr-Lieferkette resultiert aus gegenläufigen Tendenzen des grundgesetzlich festgeschriebenen statischen Sondervermögens („Budgetkonstanz“) und den Kostensteigerungen bei den Erzeugerpreisen („Lieferkostensteigerung“) und lässt sich anhand dreier Dimensionen beschreiben:

Dimension 1 beschreibt die inflationsbedingt sinkende Kaufkraft des fixierten Sondervermögens (sinkende Kurve in Abb. 2). Dimension 2 beschreibt die gleichzeitig steigenden Erzeugerpreise der Rüstungsindustrie (steigende Kurve in Abb. 2). Diese wird verstärkt durch die Einbindung dieser Industrie (auch) in zivile Zulieferketten, bspw. in die Halbleiterindustrie, welche zusätzliche Knappheiten durch andere (zivile wie militärische) Nachfrager nach sich zieht.

Es besteht deshalb die Gefahr, dass das Rüstungsversprechen des Sondervermögens hinter seinen Erwartungen zurückbleibt. Dies trifft umso mehr zu, je weiter in der Zukunft die Verausgabung der Mittel real erfolgt.



Abb. 3: Universität der Bundeswehr München (Bibliotheksbau)

Analysen zu Preissteigerungen bei Rüstungsgütern zeigen für den Zeitraum der 1950er bis 1970er Jahre mit 10 % hohe Werte, verlängert man diesen von den 1950ern bis Anfang der 2000er Jahre, steigt er gar auf 11 %. Die Ursachen dafür sind vielfältig, weshalb man zwischen Defence Inflation (DI) und (Intergenerational) Cost Escalation (ICE) unterscheidet: DI steht für das Geld, das Verteidigungsministerien für alle Arten von Gütern bezahlen müssen – inklusive Gebäude, Grund und Boden, Personalausgaben, Investitionsgüter etc. pp.

ICE bezeichnet hingegen die Kostensteigerungseffekte, welche aus verbesserten Fähigkeiten neuer Technologiegenerationen resultieren. Wesentlicher Unterschied ist, dass bei ICE den steigenden Kosten auch steigende Leistungen gegenüberstehen, während DI keine positiven Leistungseffekte umfasst.

Generell muss der Inflationsthematik wieder mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Gerade weil angesichts aktueller Lageänderungen die Bundeswehr in vielen Bereichen neu ausgerüstet wird, ist eine präzise Kenntnis von Kosten- und Preisentwicklungen wichtige Planungsgrundlage. Die Forschungsgruppe DASM trägt mit ihrer Forschungsarbeit hierzu auch in 2023 bei.



Abb. 4: Forschungsgruppe DASM

Dr.-Ing. Ralf Knott
HPS GmbH
München

info@hps-gmbh.com

Dr.-Ing. Martin Lösch
HPS GmbH
München

info@hps-gmbh.com

Dr.-Ing. Ernst K. Pfeiffer
HPS GmbH
München

info@hps-gmbh.com

Satellitenkommunikation „to go“ – Entfaltbares Leichtbau-Manpack-Antennensystem

Im Projekt ILKA entwickelt die Firma HPS GmbH mit Unterstützung der Universität der Bundeswehr München ein neues transportables Antennensystem im „Manpack“-Format. Das Komplettsystem wiegt unter 25 kg und ist mit einem 1,2 m Reflektor für schnelle Datenübertragung ausgelegt. Transportabel und einsetzbar in jedem Gelände ist es geeignet für den Einsatz in hochmobilen Trupps.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine zuverlässige Führung und Informationsübermittlung im Einsatzgebiet ist Kommunikation, wobei Satellitenkommunikation zur Überwindung weiter Strecken unerlässlich ist. Neben strategischen und taktischen Verbindungen zu festen Bodenstationen spielen in einem dynamischen und hochmobilen Einsatzumfeld besonders schnell verlegfähige Terminals eine entscheidende Rolle. Die Terminalklasse bis 1,2 m Durchmesser bietet Datenraten von mehreren Mbit/s und unterstützt gängige Frequenzbänder vom X-Band über das Ku-Band bis hin zum Ka-Band. Heute marktverfügbare Systeme sind jedoch charakterisiert durch ihr vergleichsweise hohes Gewicht sowie durch zeitaufwändigen Zusammenbau der meist aus unabhängigen Segmenten bestehenden Reflektoren. Darüber hinaus sind für den Transport meist mehrere Transportkoffer nötig, was die Mobilität stark einschränkt.

Diese Fähigkeitslücke adressiert das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Forschungsverbundvorhabens „Integrierte, entfaltbare Leichtbau Manpack Komplet-Antenne (ILKA)“. Das Projekt beinhaltet die Machbar-



Abb. 1: Antennensystem in Einsatzkonfiguration

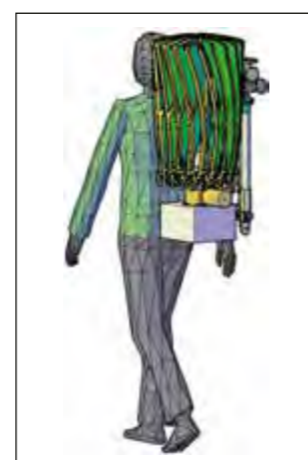


Abb. 2: Antennensystem in Transportkonfiguration

Dr.-Ing. Robert Schwarz
Universität der Bundeswehr München
Institut für Informationstechnik
Neubiberg

office.sp@unibw.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Knopp, MBA
Universität der Bundeswehr München
Institut für Informationstechnik
Neubiberg

office.sp@unibw.de

keitsuntersuchung eines komplett ausgerüsteten, entfaltbaren Kommunikationssystems mit einem Reflektordurchmesser von 1,2 m inklusive aller notwendigen Subkomponenten (RF-Feed, Elektronik, Stromversorgung, Antennen-Ausrichttechnologie, Stativ, Rucksack) und Einsatzspektrum im X- und Ku-Band (Abb. 1). Unter der Führung der HPS GmbH hat sich hierfür ein deutsches Konsortium mit den Partnern Blackwave GmbH, Technische Universität München (Lehrstuhl für Carbon Composites) und mtex antenna technology GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München (UniBw M) zusammengeschlossen.

Bei der Entwicklung wird das Prinzip radial verlaufender Rippen wie bereits in einer Vorgängerentwicklung beim Vorhaben KEAN (Kleine entfaltbare Antennenkomponenten) betrachtet und positiv bewertet nun auch im aktuellen Vorhaben als Weiterentwicklung des Kommunikationssystems zugrunde gelegt. Das System wird mit geringem Packmaß und einem betriebsfähigem Systemgewicht von unter 25 kg von einer Person transportabel sein (Abb. 2). Neben der Kompaktheit stellen eine einfache Bedienbarkeit und damit verbunden der schnelle Aufbau einer Satellitenverbindung in unter 15 Minuten ergänzende Charakteristika des Antennensystems dar. Dies erfordert neben der konzipierten innovativem Fall-Kinematik des Reflektors und dem Miniaturisierungs-

konzept der Elektronikkomponenten, ein serientaugliches Fertigungskonzept für Reflektorblätter aus faserverstärktem Kunststoff in Leichtbauweise. Dabei kommt eine innovative Kombination von kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen zum Einsatz, um die hohen HF-Reflektionsanforderungen mit der nötigen Steifigkeit und Formstabilität sowie geringem Gewicht zu kombinieren (Abb. 3).

Nach Abschluss der Entwicklung und Konstruktion läuft aktuell die Prozessentwicklung und Fertigung des Labormusters. Am Munich Center for Space Communication (Abb. 4), einer Referenz- und Testanlage für Satellitenkommunikation an der UniBw M, sind anwendungsnahe „Ende zu Ende“ Verbindungstests sowie System- und Handhabungstests vorgesehen. Mit Abschluss des Vorhabens Mitte 2023 werden die Weichen für die Umsetzung einer ersten Kleinserie gestellt.

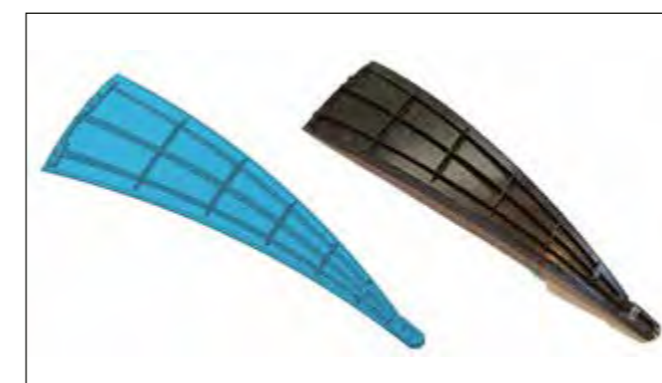


Abb. 3: Versteifte Reflektorblattrückseite in CAD (links) und Umsetzung als serientaugliches CFK-Bauteil (rechts)



Abb. 4: Referenz- und Testanlage für Satellitenkommunikation: das Munich Center for Space Communications

Bernd Dutschke, M.Sc.
Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL)
Saint-Louis, Frankreich

isl@isl.eu

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Mundt
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

info@unibw.de

Aerodynamische Charakterisierung drallstabilisierter Geschosse bei Steilschüssen

Das Deutsch-Französische Forschungsinstitut Saint Louis (ISL) erforscht das Flugverhalten drallstabilisierter Artilleriegeschosse bei Steilschüssen. Mithilfe von Windkanalversuchen und numerischen Strömungssimulationen werden die aerodynamischen Eigenschaften von Geschossen bei großen Anstellwinkeln untersucht. Diese werden benötigt, um Geschossflugbahnen bei Steilschüssen präzise vorherzusagen.

Artilleriegeschosse werden beim Abschuss in eine Rotation um die Längsachse versetzt, wodurch die Flugbahn stabilisiert und ein Überschlagen des Geschosses verhindert wird. Das Konzept der Drallstabilisierung stößt an seine Grenzen, wenn der Abschusswinkel (Elevation) mehr als 70° beträgt. Verringerte aerodynamische Kräfte in Verbindung mit einer stark gekrümmten Flugbahn führen dazu, dass der Anstellwinkel im oberen Totpunkt der Flugbahn stark anwächst (vgl. Abb. 1). Abhängig von den Abschussbedingungen, den aerodynamischen Eigenschaften des Geschosses und den Windbedingungen stabilisiert sich das Geschoss auf dem abfallenden Ast der Flugbahn entweder in der ursprünglichen Lage mit der Geschosspitze voran, oder in rückwärtiger Lage, sodass das Geschossheck zuerst am Boden aufschlägt. In besonderen Fällen kann es auch zu sogenannten Grenzyklen kommen, bei denen das Geschoss in einer mehr oder weniger stabilen Trudelbewegung zum Boden gleitet.

Während derartige Steilschüsse im operationellen Umfeld eine untergeordnete Rolle spielen, werden sie bei der Erprobung von Munition zum Beispiel im Rahmen von Zünderuntersuchungen eingesetzt. In diesen Fällen werden Geschosse gezielt mit aus-

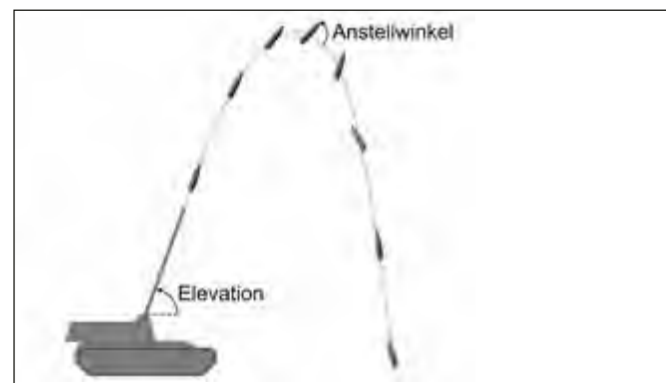


Abb. 1: Typische Flugbahn eines Artilleriegeschosses bei Steilschüssen mit Elevationen über 80°



Abb. 2: CAD-Modell der Windkanal-Messstrecke mit Modellhalterung und montiertem Geschossmodell

reichender Elevation verschossen, um eine Umkehrung der Fluglage herbeizuführen und eine Beschädigung des an der Geschosspitze befindlichen Zünders beim Aufprall am Boden zu verhindern. Für eine sichere Festlegung der Gefährdungsbereiche müssen mögliche Flugbahnen im Vorfeld rechnerisch bestimmt werden. Dazu ist die Kenntnis der aerodynamischen Beiwerte der Geschosse bei subsonischen Geschwindigkeiten und Anstellwinkeln bis 180° erforderlich. Diese können entweder gemessen oder mittels numerischer Strömungssimulationen berechnet werden. Da experimentelle Daten bisher nicht ausreichend vorhanden sind, kann auch die Zuverlässigkeit der Simulationsverfahren unter den vorliegenden Bedingungen mangels experimenteller Validierungsmöglichkeiten nicht gewährleistet werden.

Zur aerodynamischen Charakterisierung von Artilleriegeschossen werden am ISL subsonische Windkanalversuche an skalierten Geschossmodellen durchgeführt (vgl. Abb. 2). Die Messung der aerodynamischen Kräfte und Momente erfolgt durch eine in das Modell integrierte Sechskomponenten-Kraftwaage. Die Rotation der Geschossoberfläche wird durch einen zwischen Kraftwaage und Geschosshülle verbauten Elektromotor realisiert.

Zusätzlich werden die Strömungsfelder um das rotierende Geschoss mittels optischer Methoden vermessen. Abb. 3 zeigt die Druckverteilung in einer axialen Schnittebene um ein rotierendes Geschoss, wie sie aus Geschwindigkeitsmessungen mittels Particle Image Velocimetry (PIV) rekonstruiert wurde. Wie im dargestellten Beispiel erkennbar, kommt es aufgrund der Rotation zu einer asymmetrischen Druckverteilung an der Geschossoberfläche. Das Phänomen wird als Magnuseffekt

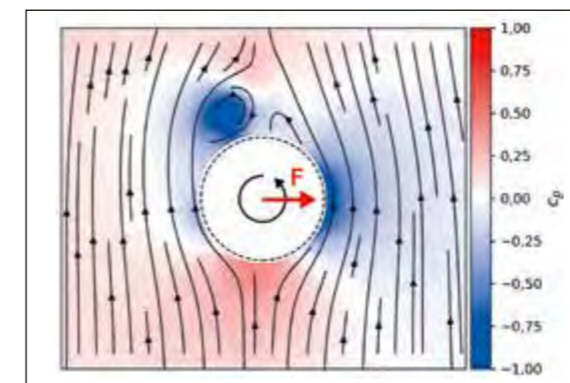


Abb. 3: Aus PIV-Messdaten rekonstruierte Druckverteilung (Druckbeiwert C_p) um ein rotierendes Geschoss bei 40° Anstellwinkel. Ebenfalls eingezeichnet sind die Richtung der resultierenden Seitenkraft F sowie die Pseudoströmlinien des planaren Geschwindigkeitsfeldes. Der kreisförmige Pfeil markiert die Drehrichtung des Geschosses

bezeichnet und führt dazu, dass drallstabilisierte Geschosse Seitenkräfte erfahren, die eine seitliche Abdrift der Flugbahn verursachen und das Stabilitätsverhalten maßgeblich beeinflussen.

Experimentelle Messungen des Strömungsfelds dienen nicht nur zur phänomenologischen Erklärung der gemessenen Kräfte, sondern stellen auch eine hervorragende Möglichkeit zur Validierung der Prognosefähigkeit numerischer Simulationsmethoden dar. Neben klassischen stationären RANS-Verfahren kommen am ISL auch skalenauflösende, instationäre Simulationsverfahren zum Einsatz (vgl. Abb. 4).

Durch das Zusammenspiel aus Kraftwaagenmessungen, Strömungsvisualisierungen und numerischen Simulationen ergeben sich zuverlässige aerodynamische Daten für Artilleriegeschosse bei großen Anstellwinkeln. Diese werden benötigt, um Geschossflugbahnen bei Steilschüssen präzise vorherzusagen. Unter Berücksichtigung der Windverhältnisse können auf diese Weise verlässliche Angaben zu den Gefährdungsbereichen bei Erprobungsschüssen gemacht werden.

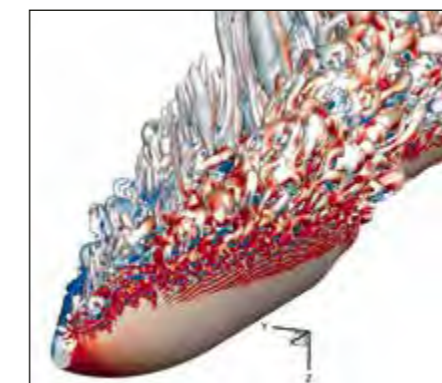


Abb. 4: Mittels skalenauflösender Large-Eddy Simulationen berechnete Wirbelstrukturen der abgelösten Strömung auf der Leeseite eines angestellten Geschosses

Christopher Lange, M.Sc.
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

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

forschungsbuero@hsu-hh.de

Reaktive Strukturmaterialien – Interdisziplinäre und multiskalige Grundlagenforschung in Experiment und Simulation

Fragmentierungshüllen aus Reaktiven Strukturmaterialien können die Leistung von Gefechtsköpfen drastisch steigern. Beim Aufprall geben reaktive Materialien zusätzlich zur kinetischen Energie auch große Mengen chemischer Energie ab. In enger Kooperation setzen das Deutsch-Französische Forschungsinstitut (ISL) und die Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU/UniBw H) Simulationen und Experimente zur Aufklärung des komplexen endballistischen Verhaltens ein und entwickeln neue Methoden.

Das Potenzial von reaktiven Strukturmaterialien als Ersatz für herkömmliche Gefechtskopfmaterialien genießt sowohl von Schutz- als auch von Wirkungsseite her großes Interesse. Dabei ist der Effekt, der zur Freisetzung chemisch gebundener Energie beim Impact führt, bisher ungeklärt. Insbesondere muss untersucht werden, welche Rolle mechanische und chemische Prozesse und ihre Wechselwirkung spielen. Zu ihrer Aufklärung ist eine interdisziplinäre und multiskalige Betrachtung nötig.

ISL und HSU/UniBw H kombinieren ihre individuellen Stärken zu einem gemeinsamen Fähigkeitsprofil, das die Erforschung von Reaktiven Materialien (RM) mit unterschiedlichen Methoden auf unterschiedlichen Skalen ermöglicht.

Auf makroskopischer Ebene wird am ISL das endballistische Reaktionsverhalten einzelner Fragmentsurrogate bis in den Hypervelocity-Bereich experimentell untersucht. Dabei kommen Pulverkanonen und Gaskanonen zum Einsatz. Sprengtechnisch verbrachte RM und Surrogatladungen werden am institutseigenen Versuchsgelände untersucht. Hochge-



Abb. 1: Hochgeschwindigkeitsaufnahme vom Durchtritt eines Fragment-surrogats durch eine Platte aus Sicherheitsstahl von links nach rechts. Deutlich zu erkennen sind die Energiefreisetzung und die sich ausbreitenden Reaktionszone nach dem Zieldurchschlag

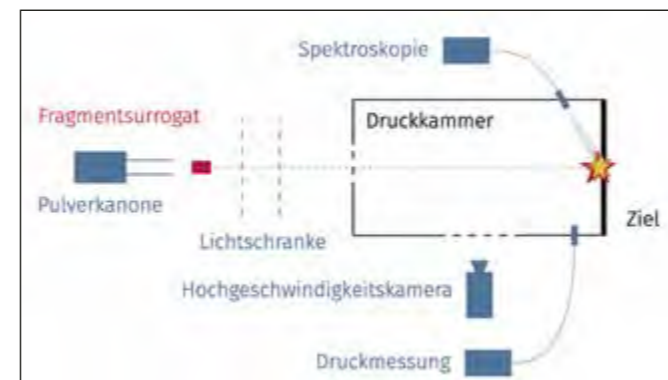


Abb. 2: Versuchsstand am ISL mit gleichzeitiger Aufnahme von Flugbedingungen (Lichtschanke, Hochgeschwindigkeitskamera), quantitativen Reaktionswerten (Druckmessungen) und qualitativen Reaktionswerten (Spektroskopie)

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

isl@isl.eu

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

isl@isl.eu

Dr. rer. nat. Lothar Reich
Wehrtechnische Dienststelle für Waffen
und Munition (WTD 91)
Meppen

WTD91posteingang@bundeswehr.org

schwindigkeitskameras bzw. Röntgenblitzanlagen begleiten die Versuche bildgebend. Mithilfe von Druckkammern wird die Energiefreisetzung quantifiziert. Spektroskopische Untersuchungen der Impactzone liefern Erkenntnisse über die entstehenden Spezies bei der Reaktion und unterstützen die Aufklärung von Reaktionspfaden (s. Abb. 1 und 2).

Die nötigen RM können am ISL pulvermetallurgisch hergestellt und in ihrem dehnratenabhängigen Verhalten mechanisch charakterisiert werden. Abgeleitete Parameter finden Eingang in Finite Elemente Simulationen, die das Fragmentierungsverhalten von RM auf mesoskopischer Ebene abbilden.

Einen Beitrag zur Untersuchung des Fragmentierungsverhaltens werden Computertomographie-Anlagen am Lehrstuhl für Computational Material Design (CMD) der HSU/UniBw H liefern, die im Rahmen von dtec.bw aufgebaut wurden. Ebenfalls im Rahmen von dtec.bw wird hier derzeit eine neue Anlage zur physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) in Betrieb genommen, die künftig die Herstellung von Dünnschichten aus RM und gradierte Werkstoffe auf ihrer Basis im Labormaßstab ermöglichen wird.

Auf atomarer Ebene werden RM am CMD-Lehrstuhl simulativ mit Methoden der quantenchemischen Modellierung und

Molekulardynamik untersucht. Dabei können beliebige Materialkombinationen und Einflüsse auf das chemische Verhalten betrachtet werden. Zum Beispiel wird der Einfluss mechanischer Dehnungszustände aus dem Impact auf den Reaktionsverlauf untersucht (s. Abb. 3). Die Informationen über die beim Impact auftretenden Dehnungen werden aus Molekulardynamik Simulationen gewonnen.

Berechnungen werden mit vollautomatisierten Workflows im „high-throughput“-Verfahren am neuen High Performance Computing Cluster „HSUper“ der HSU/UniBw H durchgeführt (s. Abb. 4). Dies ermöglicht die Identifikation vielversprechender Materialien für künftige Anwendungen aus einer Vielzahl an Ausgangsmaterialien.

Die so erhaltenen Erkenntnisse verschiedener Dimensionen werden langfristig zu einem mehrskaligen digitalen Zwilling von Reaktiven Materialien zusammenfließen, von der atomaren bis hin zur makroskopischen Ebene. Ziel ist das ganzheitliche Verständnis des Materialverhaltens.

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

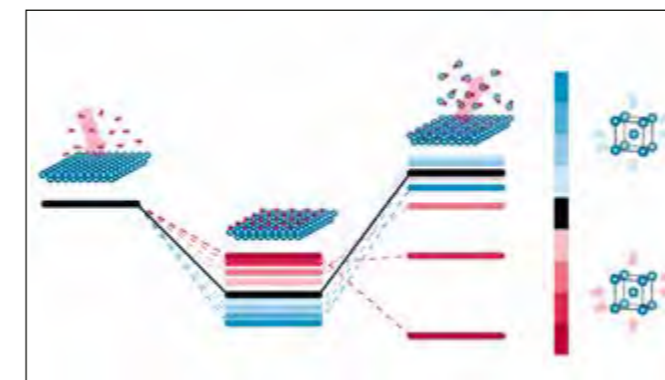


Abb. 3: Oberflächenoxidation und -degradation von Zirkonium im ungedehnten Zustand (schwarz), bei isotroper Kompression (rot) und isotroper Zugdehnung (blau). Ausreichend hohe Kompressionen begünstigen die Energiefreisetzung



Abb. 4: Rechenressourcen (HPC Cluster HSuper) wurden vom Projekt hpc.bw bereitgestellt. Das Projekt hpc.bw wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert

Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Laboratorium Fertigungstechnik
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Major d.R. Marc Fette, M.Sc., MBA
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Laboratorium Fertigungstechnik
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Integration Additiver Fertigung in die Deutsche Marine

Additive Fertigung (AF) in der Deutschen Marine geht in die nächste Etappe. Nach den erfolgreichen Experimenten auf verschiedenen Schiffsklassen wie Fregatten, Korvetten und Einsatzgruppenversorgern im Jahr 2021 und dem abschließenden Concept Development & Experiment (CD&E) „3D-Druck in der Bundeswehr“ führten die vielversprechenden Ergebnisse im letzten Jahr zu einer ersten Beschaffung von MEX (Materialextrusion)-Druckern.

Im Jahr 2023 startet nun die Ausbildung der Soldatinnen und Soldaten an der Marinetechnischschule in Stralsund. Die ersten Einheiten werden anschließend mit einem 3D-Drucker ausgestattet. Ziel ist es, die Verfügbarkeit der Einheiten durch die Nutzung der neuen Technologie zu erhöhen. Jedoch müssen dafür die Grundsteine gelegt werden. Diese liegen in der Ausbildung und dem richtigen Mindset, sowie dem Aufbau einer Datenbank für Teile. Hierdurch soll innerhalb der nächsten Jahre ein digitales Ersatzteillager aufgebaut werden und somit zukünftig auch Ersatzteile auf See im Einsatz hergestellt werden.

Da die Begriffe 3D-Druck und Additive Fertigung Sammelbegriffe sind, aber Fachbegriffe wie Selektive Laser Melting (SLM) oder Fused Filament Fabrication (FFF) meist nur von Fachpersonal genutzt wird, wurde im Rahmen der Forschung eine neue Cluster- und Einteilungssystematik entwickelt. Hierdurch sollen Probleme bei abteilungsübergreifender Kommunikation minimiert werden. Die Integrationslogik ist auf die Unterstützung zeitweise autarker Systeme ausgelegt. Für die Deutsche Marine wurden vier Level bzw. Ebenen der AF sowie der entsprechenden Anlagentechnik identifiziert. Die Grundstruktur



Abb. 1: Levelstruktur für die Additive Fertigung
(Quelle: nach Hartig <http://dx.doi.org/10.24405/14321>)



Abb. 2: CD&E Experiment Fregatte SACHSEN: Integration eines Level 2 MEX-Druckers



Abb. 3: Anwendungsfall eines additiv gefertigten Filtereinsatzes des Seekühlersystems auf Fregatte SACHSEN. Aufgrund der Größe nur mittels Level 2 3D-Druckern möglich

Kapitänleutnant Sascha Hartig, M.Sc.
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Laboratorium Fertigungstechnik
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

ist ähnlich aufgebaut wie eine Pyramide (Abb. 1), wobei die horizontale Achse die Verbreitung und die vertikale die Komplexität darstellt. Die Einteilung erfolgt prinzipiell aufgrund der Organisationsstruktur zusammen mit den nutzbaren Ressourcen an Bord. Kleine MEX-Drucker, mit einem geringen Ressourcenbedarf für Platz, Ausbildung des Bedienpersonals können auf dem überwiegenden Großteil aller Einheiten eingesetzt werden und sind dem Level 1 der AF zugeordnet. Größere Systeme, die z. B. Peripherie benötigen, höherfeste Polymere nutzen und entsprechend komplexere Anwendungsfälle umsetzen zu können und dementsprechend weiter geschultes Personal benötigen, können nur auf größeren Einheiten eingesetzt werden. Dies ist in Abb. 2 dargestellt. Durch die ersten beiden Level können Schiffe zur Teilegenerierung befähigt werden, um so Bedarfe kurzzeitig zu decken, bis das logistische System nachversorgen kann.

Die Verfügbarkeit dieses Systems wird wiederum mithilfe der beiden höheren Level optimiert. Level 3 der AF, die z. B. auf die Laser Powder Bed Fusion Technologie setzen, können an Bord aufgrund der verfügbaren Ressourcen und der Gefährdung des Personals infolge des krebserregenden Ausgangsmaterials nicht eingesetzt werden. Eine Nutzung an Land, z. B. im Marinearsenal, ist eine gute Möglichkeit, die Vorteile dieser Technologien auszunutzen und auch Synergieeffekte aufgrund des Bedarfs

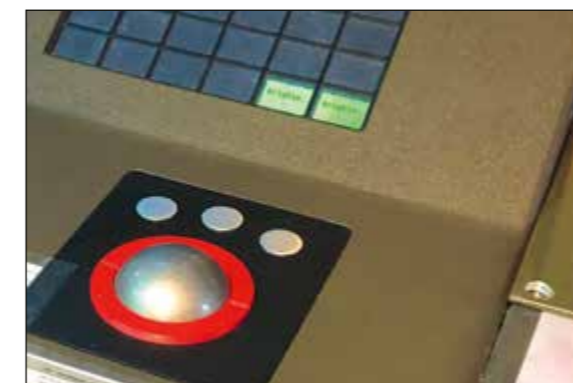


Abb. 4: Anwendungsfall eines additiv gefertigten Trackballhalterings auf Fregatte SACHSEN

Eugen Musienko, M.Eng.
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Laboratorium Fertigungstechnik
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

der verschiedenen Einheiten zu nutzen. In Zukunft sollen mit Technologien und Prozessen im Level 4 der AF durch Zusammenarbeit mit der Industrie die Herstellung zertifizierter Ersatzteile ermöglicht werden. Bis dahin werden für die Behelfsinstandsetzung sogenannte Interimsbauteile hergestellt. Diese werden eingesetzt, bis das Ersatzteil über das bestehende Logistiksystem versorgt werden kann.

Level 1 der AF wurden nun im Zuge der Integration beschafft und sollen auf allen Einheiten der Marine auf See, sowie auch an Land eingesetzt werden. Dies erfolgt im Grundkonzept vom Einfachen zum Schweren. Anhand der Evaluation der Daten wird anschließend die nächste Stufe des Integrationskonzepts umgesetzt. Die Einheiten mit den nötigen verfügbaren Ressourcen wie Platz, Arbeitskraft, Energie etc. werden mit einem leistungsfähigeren System Level 2 der AF ausgestattet.

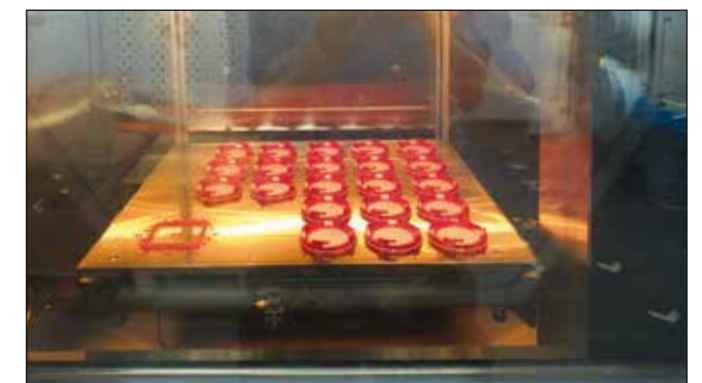


Abb. 5: Herstellung der Trackballhalteringe im Bauraum eines Level 2 MEX-Druckers

Prof. Dr. Cristina Besio
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Dr. Christine Posner
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Führungskulturen im digitalen Zeitalter – Der Fall der Bundeswehr „FüKu.Bw“

Der Megatrend der Digitalisierung stellt besondere Anforderungen an eine komplexe Organisation wie die Bundeswehr. Wir betrachten den sozialen Prozess der Einführung und Nutzung digitaler Tools und untersuchen insbesondere Akzeptanz und Widerstände bei der Anwendung datenintensiver Algorithmen und deren Auswirkungen auf Führungsentscheidungen.

Die zunehmende Verfügbarkeit großer Datenmengen und die Nutzung datenintensiver Algorithmen bringt auch für die Entscheidungsprozesse im Geschäftsbereich des BMVg fundamentale Veränderungen mit sich. Der Fokus unserer Forschung liegt auf den Herausforderungen, die den Führungsprozessen der Bundeswehr hieraus erwachsen. In einer Kooperation mit Prof. Gabi Dreo, Professur für Kommunikationssysteme und Netzsicherheit, UniBw München, verbinden wir Softwareengineering mit organisationssoziologischen Fragen und analysieren, wie organisationale und technische Faktoren den Umgang mit Analytics Tools beeinflussen. Die zunehmende Digitalisierung wirkt sich auf die Führung und ihre Verhaltensweisen aus und birgt das Potenzial, die Führungskultur zu verändern. Aber auch die bestehende Führungskultur hat einen beträchtlichen Einfluss auf die Prozesse der Digitalisierung der Bundeswehr. Dementsprechend gehen wir von einem rekursiven Verhältnis von Führung und datenintensiven Algorithmen aus (Abb. 1).

Methodisch wurde ein qualitativer Ansatz mit der leitfadengestützten Durchführung von Experten- und themenzentrierten Interviews gewählt. Erste Ergebnisse zeigen, dass sich die



Abb. 1: Rekursivität



Abb. 2: Begrüßungsseite Online-Fragebogen

Cornelia Fedtke M.A.
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Bundeswehr mit der Analyse großer Datenmengen und der Entwicklung und dem Einsatz von KI (künstlicher Intelligenz) noch relativ am Anfang befindet. Die Organisation verfügt allerdings über umfangreiche Datenbestände. Diesen „Rohstoff“ (Datenstrategie GB BMVg, 2021, S. 4) gilt es zukünftig zu erschließen und im Sinne der Konzeption nutzbar zu machen. Grundlegende Herausforderung in Bezug auf Data Analytics ist die Nutzbarmachung solcher Datenvorräte sowie die Gewährleistung von Datenqualität und der flächendeckende Einsatz der Anwendungen. Insbesondere die Frage des Verständnisses bzw. die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse datenintensiver lernender Algorithmen (Blackbox Algorithmus) führt auch in der Bundeswehr zu Widerständen. Zugleich ist das Bewusstsein vorhanden, dass diese Auswertungsstrategien in der Vorbereitung informierter Entscheidungen einen großen Mehrwert bieten. In einer stark hierarchisch strukturierten Organisation wie der Bundeswehr kann die Führung über alle Ebenen hinweg einen gelebten Willen zur Umsetzung der Digitalisierung zeigen und somit als Schlüsselfaktor des Digitalisierungsprozesses dienen. Gleichzeitig steigt mit der fortschreitenden digitalen Transformation die Notwendigkeit vom traditionellen Führungsprozess zu einem Führungsverhalten zu gelangen, das an ausgewählten Stellen agilere Elemente einschließt. Für das Gelingen der digitalen Transformation ist es dabei von zentraler Bedeutung, ein Bewusstsein über die konkreten Ziele, Möglich-

keiten und Grenzen digitaler Technologien zu entwickeln, sodass ein klares Verständnis vorherrscht, wozu bestimmte Technologien verwendet werden sollen, wozu sie fähig und geeignet sind, aber auch was sie nicht leisten können und wo ihre Grenzen liegen.

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den qualitativen Interviews wurde ein quantitatives Erhebungsinstrument entwickelt. Der online Fragebogen zur Messung der Wirkungen der Digitalisierung auf Führungsprozesse wird in einem nächsten Schritt getestet und kann für den Einsatz in Organisationsbereichen der Bundeswehr zur Verfügung gestellt werden (Abb. 2).

Das Projekt FüKu.Bw läuft von April 2021 bis März 2024 und wird aus Mitteln des dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr – gefördert (Abb. 3).



Abb. 3: dtec.bw Zentrum

Prof. Dr. Jörg Felfe
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Dr. Annabell Reiner
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

A l'étranger avec des amis: Zufriedenheit und Commitment der Bundeswehrangehörigen und ihrer Familien am neuen Standort Évreux, Frankreich

Im Auftrag des Kommandos Luftwaffe untersuchte das Projektteam der HSU Hamburg, wie zufrieden die Bundeswehrangehörigen und ihre Familien am Standort Évreux sind und leitete Handlungsempfehlungen ab, welche die Integration und Lebensqualität vor Ort steigern können. Handlungsbedarf zeigte sich vor allem bei der medizinischen Versorgung der Angehörigen, dem Immobilienangebot und der Sprachausbildung.

In den meisten Auslandseinsätzen dienen Bundeswehrangehörige zwei bis sechs Monate. Die Verwendung am Standort Évreux stellt eine Besonderheit dar: Bei der binationalen Staffel, welche sich seit 2021 im Aufbau befindet, ist das Personal drei bis sechs Jahre vor Ort. Dadurch ergeben sich für die Betroffenen besondere Herausforderungen: Sie müssen vor Ort eine Unterkunft finden, sich mit Sprache und Kultur arrangieren und auf die örtliche Infrastruktur zurückgreifen. Viele Soldatinnen und Soldaten ziehen zudem gemeinsam mit ihrer Familie nach Frankreich und müssen demnach auch die Schul- und Betreuungssituation für ihre Kinder sowie ggf. Arbeitsmöglichkeiten für ihre Partner bzw. Partnerinnen sicherstellen.

Die HSU Hamburg war beauftragt, das Vorhaben wissenschaftlich zu begleiten. Es sollte untersucht werden, inwiefern sich die Soldatinnen und Soldaten und ihre Familien in Frankreich integriert fühlen, ob sie hinreichend auf ihre Aufgabe und den Auslandsaufenthalt vorbereitet wurden und welche Faktoren zur Zufriedenheit, Integration, Motivation und Bereitschaft, längerfristig in Évreux zu bleiben, beitragen. Aus diesem Lagebild sollten anschließend Maßnahmen abgeleitet werden,



Abb. 1: Kathedrale von Évreux



Abb. 2: Rathaus von Évreux

um die Situation für die Bundeswehrangehörigen vor Ort zu verbessern und zu ihrer Integration und Bleibebereitschaft beizutragen. Zudem sollten Erwartungshaltung und Einstellung zum Standort positiv beeinflusst werden, damit sich auch in Zukunft genügend Kräfte für diese Verwendung finden.

Das Projektteam der HSU reiste im Februar 2022 nach Évreux, um sich ein Bild von der Lage vor Ort zu verschaffen und die Datenerhebung durchzuführen. Dazu wurden $N = 51$ Bundeswehrangehörige sowie $N = 14$ Familienangehörige, die mit in Frankreich leben, mittels eines standardisierten Fragebogens befragt. Dieser erfasste die Bewertung der aktuellen Arbeits- und Lebensbedingungen, die wahrgenommene Integration in Frankreich sowie Arbeitszufriedenheit, Commitment, Motivation, Gesundheit und Bleibebereitschaft. Zudem wurden $N = 15$ qualitative Interviews geführt, um die quantitativen Befunde zu ergänzen.

Die Bundeswehrangehörigen bewerteten die Tätigkeit, den Auftrag und die Führung sehr positiv und das Commitment gegenüber der Bundeswehr und dem Auftrag fiel hoch aus. Die Lebensqualität in Évreux (kulturelles Angebot, Vereine, Umgebung) wurde sehr positiv eingeschätzt (s. Abb. 1 bis 4), andere Aspekte der Lebenssituation in Frankreich wurden aber vor allem von Personen mit Familie vor Ort weniger gut bewertet: Sie schätzten die medizinische Versorgung, das Angebot an Immobilien und Sprachkursen sowie die Vorbereitung und Information vor der Entsendung eher negativ ein. Die bisherige Integration wurde als mittelmäßig wahrgenommen, was insbesondere auf mangelnde Sprachkenntnisse und fehlenden Kontakt zu Französischen und Franzosen außerhalb des Dienstes zurückgeführt wurde. Auch wenn diese Faktoren mit



Abb. 3: Pittoreske Ecken in Évreux

negativerem Gesundheitserleben (mehr psychische Belastung und Beschwerden) zusammenhängen, wurde insgesamt eine vergleichsweise hohe Motivation berichtet. Die Familienangehörigen schätzten die Situation ähnlich ein, wobei sie zusätzlich mangelnde Arbeitsmöglichkeiten beklagten und deshalb beruflich kürzer treten mussten. Die Kinder fanden aus ihrer Sicht jedoch leicht Anschluss. Trotz dieser Umstände wird aktuell insgesamt eine hohe Bereitschaft berichtet, längerfristig in Évreux zu bleiben.

Da die medizinische Versorgung und Wohnsituation sehr kritisch bewertet wurde, besteht hier dringender Handlungsbedarf. Dieser sollte vor allem durch zusätzliches Personal der Sanität und Wohnungsfürsorge realisiert werden. Für eine gute Integration und Bleibebereitschaft ist die Zusammenarbeit und Verständigung mit den Französischen und Franzosen essenziell, weshalb die Bereitstellung von (mehr) Sprachkursen, auch für die Angehörigen, empfohlen wurde. Weitere empfohlene Maßnahmen sind ein realistisches Erwartungsmanagement im Vorfeld, die Zentralisierung von Informationen, klare Zuständigkeiten sowie eine bessere Versetzungsplanung und Organisation der Abläufe.



Abb. 4: Hafen von Deauville am Atlantik, 1h von Évreux entfernt

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

pressestelle@hsu-hh.de

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

pressestelle@hsu-hh.de

Leistungselektronik für Hochleistungspulsanwendungen am Beispiel einer kompakten Energieversorgung elektrischer Waffen

Die Professur für Leistungselektronik der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) kooperiert auf Basis von drei Promotionen mit dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL). Kondensatorladesysteme mit hoher Effizienz und herausragender Leistungsdichte sowie innovative Leistungshalbleiter auf Silizium-Karbid (SiC) für kompakte Hochleistungspulsgeneratoren stehen im Fokus der Entwicklungen.

Basierend auf dem seit 2016 bestehenden Kooperationsrahmenvertrag (Abb. 1) zwischen der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) und dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL), kooperiert die Professur für Leistungselektronik mit der ISL-Gruppe für Hochleistungspulstechnik im Rahmen von drei Promotionen.

Diese Forschungsgruppe innerhalb des ISL fokussiert sich dabei auf die Entwicklung einer kompakten Energieversorgung für die elektromagnetische Schienenkanone (Railgun), bei deren Weiterentwicklung das ISL mit ihren experimentellen Anlagen eine zentrale Rolle innerhalb der EU einnimmt (Abb. 2). Dabei konnte insbesondere durch die Entwicklung des XRAM Generators (Abb. 3), einem Hochleistungspulsgenerator basierend auf induktiven Energiespeichern mit hoher Energiedichte anstatt konventioneller Kondensatorbänke weltweite Aufmerksamkeit erzeugt werden. Die Energieversorgung eines mittelgroßen Schienenbeschleunigers anhand eines 1 MJ Prototypen mit einer Energiedichte von $4,5 \text{ MJ/m}^3$ wurde ebenso erfolgreich demonstriert wie auch eine Wiederholungsrate von 13 Hz im Zusammenhang mit einer batteriebasierten Energieversorgung.



Abb. 1: Handschlag der ISL-Direktoren (mitte, rechts) mit dem Präsidenten der HSU (links) zur Erweiterung der Kooperationsvereinbarung 2019



Abb. 2: Schienenkanone NGL 60 und kondensatorbasierte Versorgungsanlage PEGASUS



Abb. 3: Generator – induktiver Pulsstromgenerator für Schienenkanonen

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

isl@isl.eu

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

isl@isl.eu

Eine Schlüsselkomponente bei dieser Art von Hochleistungsgeneratoren ist eine komplexe Schaltungstechnik, die wiederum auf Hochspannungskondensatoren zur Thyristorlöschung angewiesen ist.

Unabhängig davon, ob sich kapazitive oder induktive Hochleistungspulsenergie durchsetzen werden, sind Kondensatoren und daraus resultierend deren Hochspannungsladesystem essenziell. Die Weiterentwicklung dieser Ladesysteme mit dem Ziel einer hohen Leistungsdichte und eines hohen Wirkungsgrades ist deshalb ein Forschungsschwerpunkt der Zusammenarbeit zwischen dem ISL und der Professur für Leistungselektronik, die insbesondere im Bereich der modernen Stromrichter-technik eine hohe Expertise aufweist.

Das am ISL aufgebaute Kondensatorladesystem (Abb. 4) wurde aufgrund extrem hoher Ströme mit einer glasfaserverstärkten und ferritlosen Speicherspule sowie einem passenden Hochleistungsschalter aufgebaut. Ein Spannungswandler dieser Leistungsklasse und Bauart ist weltweit einzigartig. Innerhalb der Forschungskoooperation wurde die Schaltung anhand einer ausführlichen Analyse von Verlustparametern (Abb. 5) optimiert. Durch eine Verbesserung des Schaltungsaufbaus konnte die Ladeleistung bei gleichem Volumen um 180 % auf 300 kW gesteigert werden. Die daraus resultierende Leistungsdichte

von mehr als 4 kW/dm^3 sowie der Wirkungsgrad sind dabei höher als die von vergleichbaren, kommerziell erhältlichen Ladesystemen. Basierend auf einem selbst entwickelten, umfangreichen Simulationsmodell konnten Grenzen der aktuellen Topologie identifiziert werden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes soll die bereits einzigartig hohe Leistungsdichte weiter gesteigert werden. Ziel ist die Entwicklung eines modularen und redundanten Ladesystems mit einer Gesamtleistung von 1000 kW. Durch die Verwendung hochmoderner Silizium-Karbid (SiC) Leistungshalbleiter in einer auf die Applikation adaptierten Resonanzwandler-Topologie soll der Betrieb bei einer sehr hohen Schaltfrequenz ermöglicht werden. Die damit verbundene Erhöhung der Resonanzfrequenz reduziert sowohl das Volumen der Resonanzelemente als auch des Transformators signifikant, wodurch die Leistungsdichte deutlich ansteigt. Dabei muss ebenfalls ein hoher Wirkungsgrad angestrebt werden, um das Kühlsystem der Halbleiter kompakt realisieren zu können.



Abb. 4: Experimenteller Aufbau der Inverswandler-Topologie

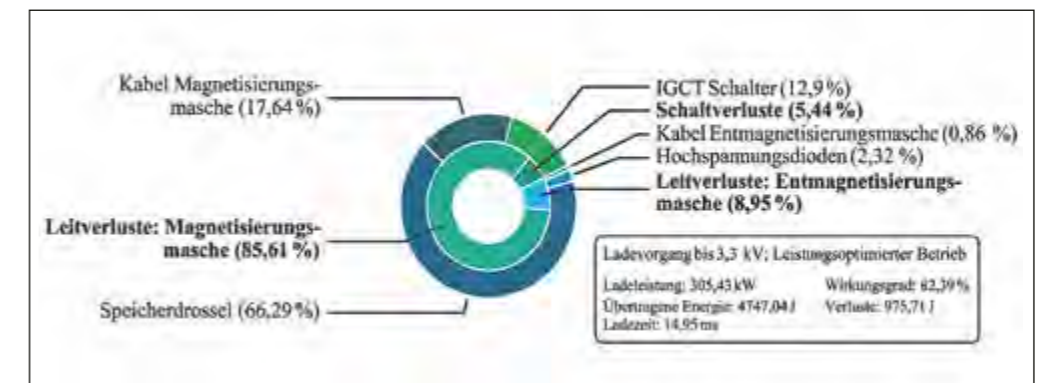


Abb. 5: Verlustanalyse der Inverswandler-Topologie zur Kondensatorladung; innerer Ring (fett): Art der Verluste; äußerer Ring: Verlustkomponente

Matthias Armster, MSc.
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Zentrum für technologiegestützte Bildung
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Digitalisierung mitgestalten: Bildungsforschung zur Stärkung gesellschaftlicher Resilienz in unsicheren Zeiten

Zur Schärfung digitaler Kompetenzen und zur Realisierung resilienzfördernder Maßnahmen wird im Projekt „Kompetenzen für die digitale Arbeitswelt (KoDiA) – Ertüchtigung zur Digitalisierung“ erforscht, wie Bildung zur Stärkung der Resilienz in gelebter Demokratie beitragen kann. Das Forschungsprojekt ist eines von insgesamt 68 Projekten des „Zentrums für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (dtec.bw)“, die an den beiden Universitäten der Bundeswehr in Hamburg und München durchgeführt werden (Abb. 1).

Das dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr – ist ein von den Universitäten der Bundeswehr Hamburg und München getragenes wissenschaftliches Zentrum und Bestandteil des Konjunkturpakets der Bundesregierung zur Überwindung der COVID-19-Krise. Es unterliegt der akademischen Selbstverwaltung. Die Mittel, mit denen das dtec.bw ausgestattet wurde, werden an beiden Universitäten zur Finanzierung von Forschungsprojekten und Projekten zum Wissens- und Technologietransfer eingesetzt. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

Digitalisierung wirkt sich grundlegend darauf aus, wie Bürger und Bürgerinnen sich in demokratische Gestaltungsprozesse einbringen und auf Basis welcher Art von Informationen und Informationsgewinnungsprozessen sie das können. Damit verbunden sind Chancen (z. B. der niedrighwellige Zugang zu Informationen weltweit) aber auch Risiken (z. B. „Fake News“, Desinformation, Manipulation). Den Kompetenzen, den Faktengehalt und damit die Vertrauenswürdigkeit digitaler Information beurteilen zu können, kommt deshalb besondere Bedeutung zu. An diesem Punkt setzt das Projekt „Kompetenzen für



Abb. 1: Logo Dtec.bw



Abb. 2: Übersicht der KoDiA-Arbeitspakete

die digitale Arbeitswelt (KoDiA) – Ertüchtigung zur Digitalisierung“ an: Es soll das Spektrum digitaler Interaktion auch unter Nutzung virtueller Räume tiefer ausleuchten und durch praxisorientierte Testszenarien ergänzen. KoDiA fragt, wie Bildung den Kompetenzerwerb für die digitale Arbeits- und Lebenswelt nachhaltig unterstützen kann. Es wird ein Ansatz kontextualisierter Forschung verfolgt. Das bedeutet, dass theoretische Konzepte in konkreten institutionellen Kontexten der Aus-, Fort- und Weiterbildung in der Bundeswehr und außerhalb erprobt und auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse weiter entwickelt werden.

Der Aspekt „Ertüchtigung des Subjekts“ steht im Fokus des ersten von drei Arbeitspaketen (AP) bei KoDiA (Abb. 2). Mündige Teilhabe an Digitalisierung ist erforderlich, wenn es gilt, demokratische Prozesse und Prinzipien zu festigen und Resilienz von Gesellschaft und Staat zu stärken. Der Forschungsansatz vernetzt Erkenntnisse der Ausbildungsforschung der Bundeswehr mit pädagogischer Expertise ziviler beruflicher Bildung. Dabei orientiert sich die Forschung an Empfehlungen der Kultusministerkonferenz und den Standardberufsbildpositionen des Bundesinstituts für Berufsbildung. Konkret wird z. B. mit der Logistikschule der Bundeswehr erforscht, wie Mixed Reality die Ausbildung von Kraftfahrlehrern und -lehrerinnen unterstützen kann oder wie in hybriden Szenarien die Methode Eduscrum eingesetzt werden kann.

Unter dem Titel „Öffentliche Wissenschaft“ geht es im zweiten AP um innovative Kooperationen, die einen vermehrten Austausch zwischen Wissenschaft und Gesellschaft befördern könnten. In diesem Projekt stellt der (Aus)Bildungskongress der Bundeswehr als seit 2022 hybrid ausgerichtete Veranstaltung



Abb. 3: Diskussionsrunde „Digitalität, Sicherheit & Resilienz“, mit (v.l.) R. Kiesewetter, MdB, Prof. Dr. D. Schulz, Moderator Prof. Dr. M. Schulz, M. Çapar und Prof'in Dr. J. Schlicht (Quelle: Fotoarchiv, HSU/UniBw H, Ulrike Schröder)



Abb. 4: Forum „Förderung beruflicher Handlungskompetenz mit Hilfe adaptiver Lernsysteme“ mit Professor Dr. Stefanie Hiestand, Pädagogische Hochschule Freiburg (Quelle: Fotoarchiv HSU/UniBw H, Ulrike Schröder)



Abb. 5: Präsentation virtueller Technologien für die Ausbildung (Quelle: Fotoarchiv HSU/UniBw H, Ulrike Schröder)

für das Themenfeld einen Use Case dar (Abb. 3). Der Kongress bietet ein Forum für Wissenschaft, Wirtschaft, Behörden sowie (Aus)Bildungseinrichtungen, das auch den virtuellen Raum als Ort der Begegnung zwischen Wissenschaft und Gesellschaft erschließt. Dafür nutzt der Kongress die Internetlernplattform der Bundeswehr „Link and Learn“. Erkenntnisse aus diesem Nutzungskontext fließen direkt in die Weiterentwicklung der Plattform und den Aufbau der „Virtuellen Lernumgebung Bundeswehr“ ein, die im Rahmen des HERKULES Folgeprojekts derzeit entwickelt wird (Abb. 4 und 5). Der Kongress will einen Referenzrahmen faktenbasierter, wissenschaftlich begründeter Information bilden, der helfen soll, Digitalisierungsprozesse beherrschbarer zu machen, digitale Teilhabe zu vereinfachen und Selbstwirksamkeit zu verbessern.

Im dritten AP wird die zunehmende Zergliederung wissenschaftlicher Disziplinen in den Blick genommen, dies mit dem Ziel, Forschungs- und Entwicklungsprozesse wie -ergebnisse durch transdisziplinären Austausch anschlussfähig zu gestalten. Zentral wird das Konzept des Stakeholder Balancing als Werkzeug erprobt. Als Forschungskontext dient dabei ein mit der Pädagogischen Hochschule Freiburg gemeinsam initiiertes Netzwerk zum Thema Bildung für eine innovative Energiewende, in dem neben Forschenden verschiedener Disziplinen auch Experten und Expertinnen aus Wirtschaft, Industrie, Berufsbildung und Bundeswehr zusammen arbeiten.

Der Forschungskontext Bundeswehr wird im KoDiA-Projekt gemeinsam mit dem Forschungskontext allgemeiner und beruflicher Bildung in Schulen, Betrieben und Hochschulen verbunden, so dass Erkenntnisse überall genutzt werden können.

Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der
 Bundeswehr Hamburg
 Laboratorium Fertigungstechnik
 Hamburg

Major d.R. Marc Fette, M.Sc. & MBA
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der
 Bundeswehr Hamburg
 Laboratorium Fertigungstechnik
 Hamburg

Eugen Musienko, M.Eng.
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der
 Bundeswehr Hamburg
 Laboratorium Fertigungstechnik
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

forschungsbuero@hsu-hh.de

forschungsbuero@hsu-hh.de

Konzeptioneller Aufbau eines ganzheitlichen Surrogats zur Prüfung von nichtletalen Wirkmitteln in Form von kinetischen Projektilen

Das Laboratorium Fertigungstechnik und die Wehrtechnische Dienststelle 52 GF 320 hat in einem Experten-Workshop mit verschiedenen Dienststellen der Bundeswehr, Forschungsinstituten und Kliniken die Anforderungen an ein Surrogat zur Prüfung von nicht letalen Wirkmitteln in Form von kinetischen Projektilen aufgestellt (siehe Abb. 1).

Die wichtigste Anforderung ist die Validierungsfähigkeit des menschlichen Ersatzmodells. Es soll sich dem Organismus Mensch bezüglich wichtiger mechanischer Kennwerte, wie Dichten, Festigkeiten, Steifigkeiten und Messwerten ideal anpassen. Dies soll anhand von Literaturkennwerten, eigenen Versuchsaufbauten oder Daten anderer Dienststellen/ Institute berücksichtigt werden. Die Geometrie soll ein Abbild des Menschen abgeben und das Toleranzverhalten reproduzierbar sein. Die Biofidelität soll gewährleistet sein und als Referenz kann der 95 %ige- oder 50 %ige Mann genommen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte es einen modularen sowie mehrfachverwendbaren Aufbau aus Komponenten haben. Die Formgebung sollte aus medizinischer Sicht zunächst den Bereich des Abdomens und des Thorax fokussieren, da hier die größten Belastungen erwartet werden. Als Prüfkonzept wurden fünf Stufen erarbeitet, nach denen das Surrogat entwickelt werden soll (siehe Abb. 2).

In Stufe 1 werden Versuche an Coupons durchgeführt, um bestimmte Kennwerte wie E-Modul, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Dichte zu ermitteln. Diese Coupons sind Prüfkörper mit

Kriterium	Gewichtung	Rang
Validierungsfähigkeit	0,19	1
Genauigkeit	0,17	2
Mehrfachverwendungsfähigkeit	0,15	3
Aufbau des Surrogates	0,13	4
Formgebung Abbildung der Körperform	0,11	5
Prüfmöglichkeiten	0,09	6
Material	0,070	7
Fertigungsverfahren	0,050	8
Kosten	0,030	9
Grenzschichten	0,010	10

Abb. 1: Zusammengefasste Anforderung mit Gewichtung für eine Surrogatfertigung

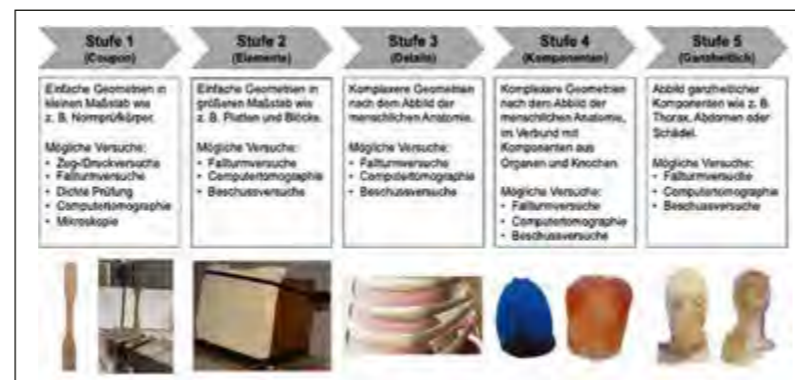


Abb. 2: Geplante Prüfungen zur Validierung von möglichen Surrogaten und Materialien eingeteilt in 5 Stufen

Frank Landmann
 Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52)
 Schneizleuth

wtd52posteingang@bundeswehr.org

Dipl.-Ing. (FH) André Knörnschild, M.Sc.
 Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52)
 Schneizleuth

wtd52posteingang@bundeswehr.org

einfacher Geometrie, die nach bestehenden Normen hergestellt werden. Als Validierungsbasis dienen Erkenntnisse aus Untersuchungen von biologischem Material des Menschen oder Tier. In Stufe 2 werden Versuche an bestehenden Prüfaufbauten wie z. B. nach der NATO STANREC 4744 durchgeführt. In Stufe 3 werden komplexe Geometrien hergestellt, die der menschlichen Anatomie ähnlich sind, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit einer bestimmten Anzahl an Surrogaten zu untersuchen. In Stufe 4 sollen weitere Details in Form von Materialkombinationen und unterschiedlichen Komponenten des menschlichen Körpers, wie mehrere Organe und Knochen, abgebildet werden. Es empfiehlt sich, nur einen Teilbereich abzubilden, um die Kosten und den Aufwand im Rahmen zu halten. In Stufe 5 werden größere Komponenten wie z. B. ein gesamter Rumpf mit allen Organen und Blutgefäßen gefertigt und die entwickelten Prüfaufbauten genutzt, um das Surrogat zu validieren. Mit den Erkenntnissen können neue Standards zur Prüfung von Projektilen konzipiert werden, die dienststellenübergreifend eingesetzt werden können.

Aktuell wird an der der Entwicklung eines Surrogats des menschlichen Thorax für Beschusstests gearbeitet. Dazu wurden zunächst die Anatomie des Rumpfs sowie das Verletzungsverhalten untersucht. Es wird ein Konzept für ein modulares Thoraxsurrogat entwickelt, das aus mehreren wiederverwend-

baren Komponenten besteht. Das Konzept basiert auf einem 3D-Modell aus einem CT-Scan eines männlichen des Thorax, das von der Abteilung Biomechanik und Unfallforschung am Institut für Rechtsmedizin, LMU München zur Verfügung gestellt wurde (siehe Abb. 3). Es wird in Teilkomponenten für das Weichgewebe, den knöchernen Teil, die Organe und die Messensorik unterschieden. Hierbei wurde zunächst der PUR-Kautschuk PMC-770 und anschließend 20% ballistische Gelatine verwendet (siehe Abb. 4).

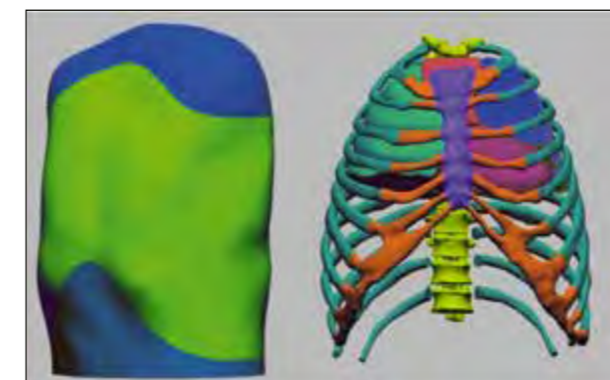


Abb. 3: 3D Modell eines CT-Scans des Thorax (Quelle: Abteilung Biomechanik und Unfallforschung am Institut für Rechtsmedizin, LMU München)



Abb. 4: Gussform mit Kern, aus additiver Fertigung zur Herstellung des Weichgewebeanteils

Dr.-Ing. Steffen Ungnad
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Maschinenbau und Bauingenieurwesen
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Prof. Dr.-Ing. Delf Sachau
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Maschinenbau und Bauingenieurwesen
Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

Aktive Beeinflussung der Unterwasserschallsignatur von Marineeinheiten

Aufklärungsmethoden und ziviles Geräuschmonitoring unter Wasser können zur Enthüllung von eingestuftem Signaturmerkmalen des abgestrahlten Geräusches von Marineeinheiten führen. Die Fragestellung, inwieweit eine Signatur mithilfe von Inertialschwingerregern geeignet modifiziert und verfremdet werden kann, wird an einem Schiffsmodell aus Stahl (Maßstab 1:8) untersucht.

Unter der akustischen Signatur eines Schiffes fasst man die spektralen Eigenschaften des Wasserschalls zusammen, die von verschiedenen Geräuschquellen verursacht werden. Hierzu gehören beispielsweise Geräuschanteile von Maschinen, strömungsinduzierte Geräusche und Kavitationsgeräusche.

Diese Signatur kann mittels passiver Sonare oder Sensoren und geeigneter signalanalytischer Verfahren zur Detektion und Identifikation eines Schiffes verwendet werden.

Maßgebliche Signaturmerkmale sind hierbei die Spektrallinien, d. h. schmalbandige Geräuschanteile im Spektrum, die aus dem Hintergrundgeräusch hervorstechen. Diese Geräuschanteile werden meist durch Maschinen mit rotierenden Bauteilen wie Motoren erzeugt und als Schall über die Außenhaut des Schiffes in das umgebende Wasser abgestrahlt.

Die auftretenden Frequenzen der Spektrallinien sind meist Grundfrequenz und Harmonische der entsprechenden Drehzahlen der Aggregate oder Bauteile. Die Kombination der Frequenzen mehrerer Linien in einem Muster – akustischer



Abb. 1: Großausführung Schnellboot-Klasse 148 (Quelle: Karr 2015, Deutsche Marine)



Abb. 2: Schnellbootmodell im Maßstab 1:8 mit einer Länge von ca. 6 m



Abb. 3: Schnellbootmodell befestigt unterhalb der Messstelle der WTD 71 im Plöner See

Dr. Andreas Müller
Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Hamburg

info.mbbm-gmbh@mbbm.com

Dr. Carsten Zerbs
Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Hamburg

info.mbbm-gmbh@mbbm.com

Anton Homm
Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen
Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)
Eckernförde

wtd71posteingang@bundeswehr.org

Fingerabdruck – kann zu einer Klassifikation führen und sogar Informationen über den Schiffszustand enthalten.

Passive Maßnahmen werden zur Reduzierung der Geräuschübertragung an Bord und zur Verminderung der Signaturabstrahlung ins Wasser eingesetzt. Dazu zählen beispielsweise die elastische Entkopplung der an Bord befindlichen Geräuscherzeuger und die Verwendung kavitationsarmer Propeller. Um diese etablierten Systeme zu ergänzen, wird eine adaptive Steuerung zur aktiven Signaturbeeinflussung (ASB) eingesetzt, welche auf Basis von an Bord gemessenen Daten die vorhandene akustische Signatur mit Hilfe von Aktoren auf der Außenhaut geeignet verschleiert.

Entscheidend ist hierbei, dass neben dem Reduzieren und Verstärken auch das Hinzufügen von Geräuschanteilen ohne eine Erhöhung der Verratsreichweite realisiert wird.

Für die Modellversuche wurde von der WTD 71 ein Schiffsstrukturmodell aus Stahl ohne Decksaufbauten, Aggregate oder Antriebe zur Verfügung gestellt. Dieses Modell bildet die Schnellboot-Klasse 148 sorgfältig nach und erreicht eine hohe geometrische sowie akustische Ähnlichkeit zur Großausführung (Abb. 1 und Abb. 2).

Im Anschluss an die Systementwurfsphase und erste Versuche an Land erfolgt der Systemtest in Wasser an der Messstelle der WTD 71 im Plöner See (Abb. 3). Die aus einem Tonkomplex bestehende Ist-Signatur wird dabei über Geräuscherzeuger an Positionen von Motorersatzmassen abgespielt. Nach dem anschließenden Einschalten des ASB-Systems werden Echtzeit-Messdaten an Bord genutzt, um über acht Inertialschwingerregger an der Außenhaut gezielt zusätzliche Geräuschanteile in die Struktur einzuleiten (Abb. 4). Die daraus resultierenden Interferenzeffekte im Körperschall führen im vorher festgelegten Monitorbereich, bestehend aus sechs Hydrofonen rundum die Messstelle, zu messbaren Signaturänderungen (Abb. 5). Die steuerungsinterne Vorgabe der gewünschten Soll-Signatur bietet hierbei vielseitige Möglichkeiten und dient als Grundlage zur Implementierung in ein Signaturmanagementsystem.

Das militärische Geräuschmonitoring, aber auch das zivile akustische Monitoring im Umweltschutz unter Wasser spielen eine immer größere Rolle und beeinflussen zunehmend das Verhalten von Marineeinheiten. Der hier untersuchte Ansatz kann daher entscheidend sein, um in Zukunft hydroakustische Signaturen vor bekannten als auch vor unbekanntem Erkennungs-, Identifikations- und Klassifikationsverfahren der Aufklärung zu schützen.



Abb. 4: Inertialschwingerregger im Schnellbootmodell zur Erzeugung der Ist-Signatur (links) und Inertialschwingerregger sowie Beschleunigungssensoren auf der Außenhaut zur Erzeugung der gewünschten Soll-Signatur (rechts)

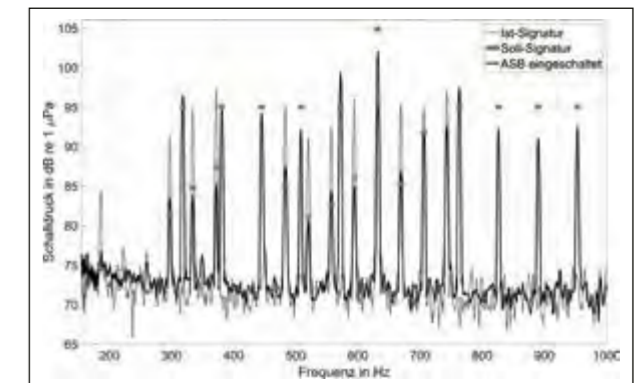


Abb. 5: Erzieltes Messergebnis an Hydrofonen während des Tests des Systems zur aktiven Signaturbeeinflussung (ASB) an der Messstelle der WTD 71 im Plöner See

Marcel Pietsch, M.Sc.
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
 Fakultät für Maschinenbau und Bauingenieurwesen
 Hamburg

Gunnar Marsch, M.Sc.
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
 Fakultät für Maschinenbau und Bauingenieurwesen
 Hamburg

forschungsbuero@hsu-hh.de

forschungsbuero@hsu-hh.de

Eine Methode zur verbrennungstechnischen Untersuchung synthetischer und alternativer Kraftstoffe

Der Einsatz alternativer und synthetischer Flüssigkraftstoffe und die „Single Fuel Policy“ der NATO führen zu verbrennungstechnischen Fragestellungen für eine bestehende dieselmotorisch angetriebene Fahrzeugflotte. Die entwickelte Methode hilft, diese Fragen besser zu beurteilen. Eine Methode zur motorischen Anpassung auf sich ändernde Kraftstoffqualitäten wird zusätzlich vorgestellt.

Alternative und synthetische Kraftstoffe sind geeignet, um einen Teil des Bedarfs an CO₂-neutraler und emissionsarmer Mobilität zu decken. Sie lassen sich in bestehenden konventionellen Dieselmotoren ohne größere Anpassungen einsetzen, wenn die verschiedenen Kennwerte der gegebenen Kraftstoffspezifikationen eingehalten werden. In Europa sind Dieselmotoren in der DIN EN 590 genormt. Sie enthält Vorgaben für chemisch-physikalische Eigenschaften wie die Dichte oder die Viskosität, aber auch für verbrennungstechnische Kennwerte wie die Cetanzahl, die mit motorischen Prüfverfahren bestimmt wird. Da die Cetanzahl ein Maß für die Zündwilligkeit von Dieselmotoren ist (siehe Abb. 1), muss sie in einem engen Bereich liegen, um einen verlässlichen und sicheren Motorbetrieb zu gewährleisten. Der eingesetzte Prüfmotor nutzt ein älteres Brennverfahren und wurde für den Einsatz von fossilen Dieselmotoren konzipiert.

Die Aussagekraft der ermittelten Cetanzahlen für alternative Kraftstoffe muss überprüft werden, denn Kraftstoffe unterschiedlichen Ursprungs unterscheiden sich in ihrem chemischen Aufbau und in ihrer Stoffzusammensetzung. Dies hat einen

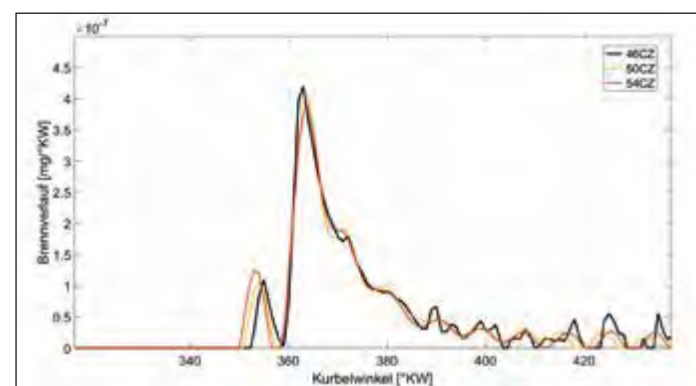


Abb. 1: Brennverläufe – Variation der Cetanzahl (gleicher Betriebspunkt)

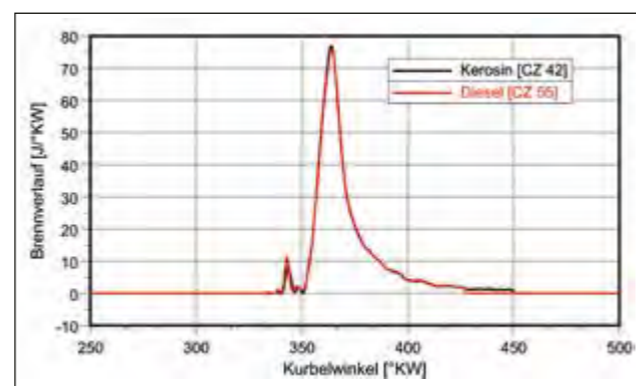


Abb. 2: Brennverläufe – Variation des Kraftstoffs (gleicher Betriebspunkt)

Einfluss auf die dieselmotorische Verbrennung sowie auf die Emissionsbildung.

Am Beispiel von paraffinischen Dieselmotoren und der dafür gültigen DIN EN 15940 ist ersichtlich, dass auch von der DIN EN 590 abweichende Kraftstoffe für den dieselmotorischen Betrieb genutzt und von Herstellern zugelassen werden können.

Die NATO begann bereits früh mit Untersuchungen zum Einsatz alternativer Kraftstoffe in Dieselmotoren. Daraus entstand die „Single Fuel Policy“, die den Einsatz von Kerosin als Kraftstoff für Luft- und Landfahrzeuge vorsieht. Die Sicherstellung der Kompatibilität für die eigenen Luft- und Landfahrzeuge wurde an die einzelnen Mitgliedsstaaten übertragen. Frühere Untersuchungen mit älteren Dieselmotoren zeigen eine grundsätzliche Verwendbarkeit, auch bei Abweichung von der DIN EN 590. In Abb. 2 sind die Brennverläufe von Kerosin und Diesel bei gleichem Betriebspunkt dargestellt. Sie sind trotz großer Unterschiede in der Cetanzahl kaum unterscheidbar.

Die Bundeswehr muss sich mit dieser Fragestellung auch bei Auslandseinsätzen beschäftigen, um die Einsatzbereitschaft von Fahrzeugen und Gerät sicherzustellen, wenn kein Dieselmotorkraftstoff oder sonstiger spezifikationsgerechter Kraftstoff verfügbar ist. Beispielsweise zeigten Kerosinproben aus Einsatzgebieten Cetanzahlen von weniger als 40 und damit auch für Kerosin eine ungewöhnlich geringe Zündwilligkeit.

In Zusammenarbeit mit dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) wurde eine Methode entwickelt, die eine bessere Beurteilung von nicht normgerechten Kraftstoffen hinsichtlich der verbrennungstechnischen



Abb. 3: Einzylinder-Forschungsdieselmotor

Eignung in Dieselmotoren ermöglicht. Ziel war es, eine schnelle und aussagekräftige Methode zu entwickeln, die die Prüfmöglichkeiten der Bundeswehr berücksichtigt. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist der geringe Einsatz von zeit- und kostenintensiven Motorprüfständen (Abb. 3), da schon in der Versuchsplanungsphase mit statistischer Versuchsplanung und Simulationstools gearbeitet wird. Zusammen mit der genauen Zylinderdruckindizierung und einer anschließenden thermodynamischen Analyse des Motorprozesses sowie der umfangreichen Messung von gasförmigen und festen Emissionen ist eine umfangreiche Möglichkeit geschaffen worden, synthetische und alternative Kraftstoffe im dieselmotorischen Betrieb zu beurteilen.

Darüber hinaus arbeiten wir an einem Forschungsprojekt zur Anpassung der Motorsteuerung für sich ändernde Kraftstoffqualitäten mit Hilfe von eigens entwickelten Steuer- und Regelungsfunktionen in freien Steuergeräten auf der Grundlage von Kraftstoffdaten (Abb. 4).

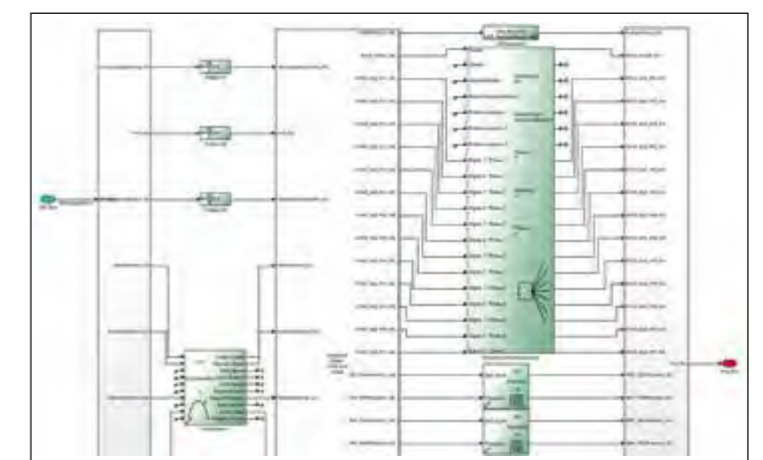


Abb.4: Übersicht des Einspritzmodells auf der Funktionsebene

Timo Watzelt, M.Sc.
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien
– ABC-Schutz (WIS)
Munster

WISPosteingang@bundeswehr.org

Dr. rer. nat. Elke Reifer
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien
– ABC-Schutz (WIS)
Munster

WISPosteingang@bundeswehr.org

Umsetzung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von Vorfiltrationstechnologien für die Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächengewässern

Die Bundeswehr benötigt schnell verlegbare Wasseraufbereitungsanlagen für die zuverlässige Verfügbarkeit von Trinkwasser in allen Einsatzszenarien. Mit den Forschungsergebnissen des Wehrwissenschaftlichen Instituts für Schutztechnologien – ABC-Schutz (WIS) steht jetzt ein reproduzierbares Prüfverfahren zur Verfügung, mit dem Vorfiltrationstechnologien für mobile Wasseraufbereitungsanlagen hinsichtlich ihrer Feldtauglichkeit bewertet werden können.

Während stationär eingesetzte Wasseraufbereitungsanlagen speziell auf die vorliegenden Verhältnisse einer Rohwasserquelle ausgelegt werden können, fordert die Bundeswehr die generelle Einsatzbarkeit der mobilen Ausstattung. Zur Trinkwasseraufbereitung aus verschiedensten Rohwasserqualitäten – von kristallklarem Wasser bis Hafenbeckenwasser, bei Bedarf sogar im ABC-Fall – nutzen die Anlagen das Prinzip der Umkehrosmose (RO, engl.: reverse osmosis). Diese Technologie stellt hohe Anforderungen an die Vorfiltration, um unerwünschte Ablagerungen auf den RO-Modulen zu vermeiden.

Die Auslegung mobiler Trinkwasseraufbereitungsanlagen orientiert sich an den technischen Forderungen nach DIN 2001-3. Hier werden Grenzfälle der Belastung der aufzubereitenden Grund- und Oberflächenwässer anhand von anorganischen und organischen Summenparametern definiert und eine entsprechende Zuverlässigkeit der Wasseraufbereitungsanlage gefordert. Stark schwankende Gewässerbelastungen mit Algen, Biopolymeren und Partikeln stellen für die Wasseraufbereitung eine große Herausforderung dar.



Abb. 1: Erprobungsteich WIS mit Algen



Abb. 2: Organisches Testwasser im Becken mit Rührwerk

Um eine jahreszeitlich unabhängige Bewertung von Vorfiltrationstechnologien durchführen zu können, wurden Herstellungsverfahren für naturidentische Testwässer beim WIS erforscht.

Als erstes Ergebnis wurde ein „anorganisches Partikeltestwasser“ entwickelt und patentiert. Dieses bildet die Trübungslastungen von Oberflächengewässern durch den Einsatz von suspendierten Teststäuben aus den Mineralien Kaolinit, Quarz und Eisenoxid naturidentisch nach. Der Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Testwassersuspension mit den Werten von natürlichen Oberflächengewässern, wie Flüssen, Meerwasser und Seen belegte die Realitätsnähe.

Ergänzt wird das patentierte Verfahren jetzt durch ein „organisches Testwasser“, welches nach umfangreichen Recherchen und Voruntersuchungen aus lysierten Chlorella-Algen reproduzierbar und naturgetreu hergestellt werden kann. Dieses Testwasser enthält Algenzellen, Zellfragmente, Biopolymere und Huminstoffe. Durch den Ultraschall-gestützten Zellaufschluss (Lyse) von Mikroalgen werden die hochmolekularen organischen Verbindungen freigesetzt. Diese weisen im Testwasser ähnliche filterblockierende Eigenschaften auf wie algenbelastetes Oberflächenwasser (Abb. 1).

Durch definierte Verfahrens- und Versuchsbedingungen sowie festgelegte relevante Parameter können jetzt reproduzierbare Ansätze des „organischen Testwassers“ zubereitet und zur Erfassung der Leistung von Vorfiltrationstechnologien eingesetzt werden (Abb.2). Mit einer gezielten Nachdosierung des Algenlyseprodukts (Abb. 3) gelingt es dabei, die organische Belastung auch für Langzeitversuche aufrecht zu erhalten. Damit steht



Abb. 3: Algenlysebehälter und Lyseprodukt

ein Prüfverfahren im Technikumsmaßstab für die Leistungsprüfung auch regenerativer Vorfiltrationsverfahren zur Verfügung (Abb. 4). Erste Anwendungen über Tage haben darüber hinaus die erfolgreiche Anwendbarkeit der kombinierten Testwässer bestätigt.

In weiteren Schritten wird ein Becken für größere Testwassermengen ausgelegt und die Automatisierung des Prüfverfahrens vorangetrieben.

Die im WIS entwickelte Prüfmethode erlaubt erstmals die reproduzierbare Bewertung der Leistungsfähigkeit von Vorfiltrationstechnologien unter DIN 2001-3-Vorgaben, wobei vor allem regenerative Technologien für die Zukunft betrachtet werden können. Mit dieser Erweiterung der Bewertungsfähigkeit von Vorfiltrationstechnologien steigt die Beratungsfähigkeit hinsichtlich der modernen technischen Auslegung der mobilen Wasseraufbereitung. Dies trägt erheblich zur Verbesserung der zuverlässigen Wasserversorgung bei.



Abb. 4: Regenerative Anlage beim Versuch mit organischem Testwasser mit klarem Filtrat und Rückspülbecken

Dipl.-Ing. (FH) Cindy Bagge
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

Dipl.-Ing. (FH) Marina Weiße, M. Sc.
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

Dr. rer. nat. Carsten Zimmermann
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

wiwebposteingang@bundeswehr.org

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Digitales Einkleiden „BundesWEAR“

Für die Digitalisierung der Einkleidung der Bundeswehrsoldatinnen und -soldaten wird eine KI-gestützte Bildverarbeitung zur Ableitung relevanter Körpermaße und ein digitaler Zwilling realisiert. Eine Smartphone-App mit diesen Funktionalitäten ermöglicht eine automatisierte Größenzuweisung von passformgerechten Bekleidungsartikeln und damit ein effektiveres und effizienteres Bekleidungsmanagement.

3D-Bodyscanning zur digitalen Erfassung von Körpermaßen und -geometrien sowie der Einsatz von KI-gestützter Bildverarbeitung zur Ableitung dieser Daten aus Fotos oder Videos versprechen sowohl im Hinblick auf eine Digitalisierung der passformgerechten Entwicklung als auch der Distribution von Bekleidung erhebliche Effizienz- und Effektivitätssteigerungen. Die Einkleidung der Streitkräfte kann so durch konsequente Digitalisierung von einem aktuell sehr zeit- und ressourcenintensiven zu einem nutzerorientierten, effizienten logistischen Prozess entwickelt werden.

In Kooperation mit der BWI wurde eine App entwickelt, die neben einer Bodyscan-Funktion über eine Reihe weiterer Anwendungen verfügt. So können u. a. Bestell-, Tausch- und Retouren-Prozesse abgewickelt werden. Der primäre Bodyscan wird auf Basis eines 360°-Grad-Videos des Nutzers durchgeführt, welches vor einer Smartphone-Kamera aufgenommen und im Gerät prozessiert wird. Mittels KI-gestützter Bildverarbeitung erfolgt die Ableitung relevanter Körpermaße, wobei u. a. ein Abgleich mit einer anthropometrischen Datenbank erfolgt. Dabei ist dieser Prozess weitgehend tolerant hinsicht-



Abb. 1: Online-Bestellportal BundesWEAR (links vorn) – Smartphone-Scan (rechts vorn) – Liste der ermittelten Körpermaße (rechts im Hintergrund) sowie der automatisch zugewiesenen Konfektionsgrößen (links im Hintergrund)

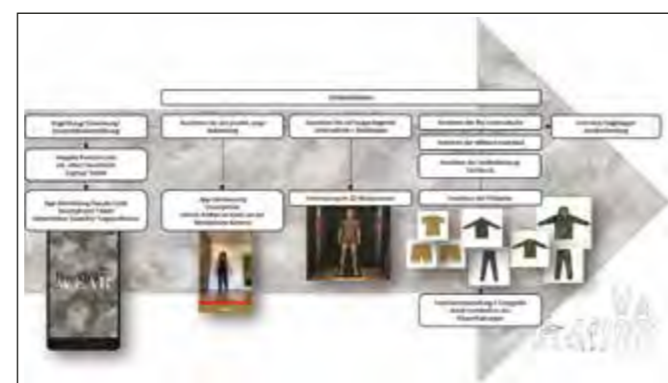


Abb. 2: Experiment – Ablaufplan

PD Dr. Ing.-habil. Jens Holtmannspötter
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Dominik Oehlschläger, M. Sc.
Universität der Bundeswehr München
Arbeitsgebiet Beschaffung
Neubiberg

sekretariat.essig@unibw.de

lich der beim Scan getragenen Bekleidung. In Kombination mit einigen spezifischen persönlichen Angaben des Nutzers kann auf dieser Datengrundlage eine automatisierte Zuweisung der bestmöglichen Konfektionsgrößen aus einem Portfolio (z. B. des persönlichen Ausstattungssolls) seriengefertigter Artikel erfolgen (Abb. 1). Diese innovative Online-Bestellplattform wurde unter dem Namen BundesWEAR etabliert und mit 63 Testpersonen (23,8 % ♀; 76,2 % ♂) im WIWeB in einem umfassenden Probandenversuch erprobt (Abb. 2).

Die objektive Passformprüfung erfolgte an zehn ausgewählten Artikeln der Feldbekleidung in verschiedenen Bekleidungskonfigurationen und diversen standardisierten Prüfposen, die eine Auswahl soldatischer Bewegungsarten repräsentieren. Parallel wurden alle Testpersonen in einem 3D-Bodyscanner gescannt, um die mit der Smartphone-App ermittelten Körpermaße zu validieren. Alle Testpersonen wurden darüber hinaus durch Wissenschaftler der UniBw München befragt, um subjektive Einschätzungen hinsichtlich Komfort, Technologieakzeptanz des BundesWEAR-Systems und Tragegewohnheit statistisch zu erfassen.

Die Ermittlung der Körpermaße über die App konnte nach einer Korrelation mit den entsprechenden Ergebnissen aus der Vermessung mit dem 3D-Bodyscanner für beide Geschlech-

ter als vergleichbar präzise bewertet werden. Jeweils 91 % der Messstrecken (z. B. Brustumfang) wurden ausreichend genau ermittelt, um diese den Fertigmaßen der Bekleidungsartikel zuzuordnen. Die automatisierte Größenzuweisung führte bei den Männern zu signifikant besseren Ergebnissen als bei den Frauen (Abb. 3). Gründe hierfür sind vor allem, dass die sogenannten Unisex-Artikel eigentlich für Soldaten konstruiert und heute ohne Anpassung an anatomische Unterschiede der Geschlechter zusätzlich von den Soldatinnen getragen werden. Zudem umfassen die Konfektionsgrößen der Feldbekleidung für die Frauen jeweils zwei Größen, was zu einer deutlich schlechteren Passform führen kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Digitalisierung des Einkleidungsprozesses mittels einer App bereits heute möglich ist. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein enormes Potenzial für signifikante Verbesserungen bei logistischen Prozessen wie der Ausstattung der Streitkräfte mit Bekleidung ersichtlich.

Das Vorhaben BundesWEAR ist Teil umfangreicher Forschungsaktivitäten am WIWeB im Bereich Ergonomie und Digitalisierung des Innovationslabors „System Soldat“, in deren Zentrum mit der Nutzung Digitaler Zwillinge im Bereich der Bekleidungsentwicklung und -distribution neue Wege beschritten werden.

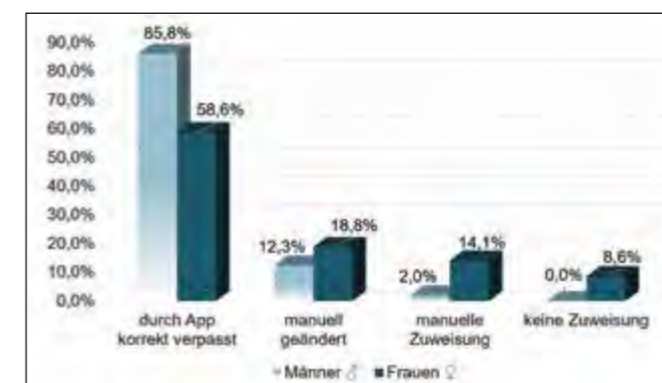


Abb. 3: Ergebnisse der automatisierten Größenzuweisung (relative Häufigkeiten in %)

Hptm Maximilian Krönert, M.Eng.
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

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

wiwebposteingang@bundeswehr.org

Additive Fertigung von ultrahochmolekularem Polyethylen

Ultrahochmolekulares Polyethylen (UHMWPE) ist ein Hochleistungskunststoff, welcher für Schutzanwendungen eingesetzt wird. Die Materialeigenschaften werden wesentlich von der Verarbeitung bzw. dem Herstellungsverfahren beeinflusst. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird das Potenzial additiver Fertigungsverfahren von UHMWPE für Schutzanwendungen untersucht.

Ultrahochmolekulares Polyethylen (UHMWPE) ist ein Kunststoff mit extrem hohem Molekulargewicht. UHMWPE zeichnet sich u. a. durch eine hohe Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit aus. Es eignet sich daher für verschiedenste Anwendungen, z. B. für Gleitelemente im Maschinenbau, Implantate in der Medizintechnik oder als Verbundmaterial für ballistischen Schutz.

Aufgrund des hohen Molekulargewichts hat UHMWPE eine hohe (Schmelz-)Viskosität, wodurch eine Verarbeitung mittels Spritzguss oder Extrusion erschwert wird. Daher wird UHMWPE meist zu Halbzeugen, wie z. B. Blöcke oder Stäbe, gepresst und anschließend mechanisch bearbeitet. Fasern aus UHMWPE werden z. B. mittels Gelspinnen hergestellt und anschließend weiterverarbeitet. Das Herstellungsverfahren und die verwendeten Prozessparameter wirken sich auf die Morphologie, d. h. die Orientierung der Molekülketten, aus und beeinflussen erheblich die Materialeigenschaften.

Eine Alternative UHMWPE zu verarbeiten wäre die additive Fertigung, wodurch sich insbesondere hinsichtlich der Geo-

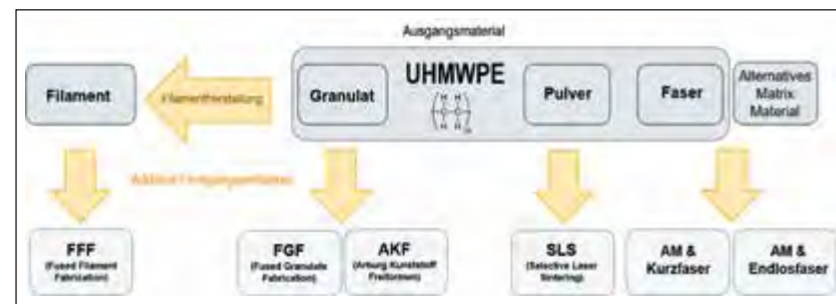


Abb. 1: Schematische Darstellung der betrachteten Ausgangsmaterialien und additiver Fertigungsverfahren

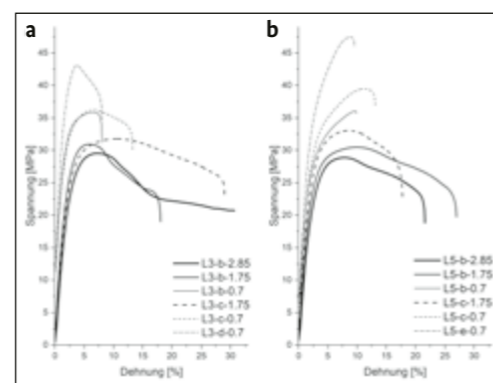


Abb. 2: Spannungs-Dehnungs-Diagramme repräsentativer Filamentproben aus UHMWPE, hergestellt aus Granulat, mit einem mittleren Molekulargewicht von 0.9×10^6 g/mol (Bild a) und mit einem mittleren Molekulargewicht von 2.3×10^6 g/mol (Bild b)

PD Dr.-Ing. habil. Jens Holtmannspötter
Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

metrie enorme Freiheiten ergeben würden. Die Untersuchung additiver Fertigungsverfahren und die Bewertung der dazugehörigen Druckerzeugnisse sowie der Materialeigenschaften ist ein Forschungsprojekt am 3D-Druckzentrum der Bundeswehr im Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB). Im Rahmen dieses Projektes werden unterschiedliche Ausgangsmaterialien (z. B. Pulver, Pellets und Fasern) und deren Verarbeitung betrachtet (siehe Abb. 1). Ziel ist es, Wissen über die spezifischen Materialeigenschaften und die Einflüsse von Prozessparametern zu erarbeiten und das Potential für Schutzanwendungen zu bewerten.

Neben kommerziell verfügbaren Fasern, Pulvern und Granulaten aus reinem UHMWPE mit unterschiedlichem mittlerem Molekulargewicht werden auch Vor- und Nachbehandlungsmöglichkeiten untersucht, wie zum Beispiel eine physikalische Vorbehandlung mit Decalin.

Als Grundlage für filamentbasierte Verfahren und zur Betrachtung eines Extrusionsprozesses wurden – mit Hilfe eines Extruders – eigene Filamente hergestellt. Durch Variation der Parameter bei der Extrusion konnten dabei die Eigenschaften der UHMWPE-Filamente deutlich verändert werden. Die Festigkeit der Filamente konnte bereits um bis zu 50 % gesteigert werden, wobei einzelne (positive) Ausreißer mit

einer Steigerung von bis zu 215 % zeigen, dass eine noch stärkere Änderung der Materialeigenschaften möglich ist (siehe Abb. 2 und 3). Zur Untersuchung additiver Fertigungsverfahren, wurden erste Prozessparameter für den Selective Laser Sintering (SLS) und Fused Filament Fabrication (FFF) Prozess experimentell ermittelt. Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften wurden Zugproben gefertigt und geprüft (siehe Abb. 4).

Erste Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Verarbeitungsprozesse und -parameter die Morphologie des Kunststoffes und dessen Eigenschaften beeinflussen. Eine erfolgreiche Verarbeitung von UHMWPE mit additiven Fertigungsverfahren konnte auf Probekörperebene umgesetzt werden. Möglichkeiten zur Anwendung im Bereich Schutz werden daher grundsätzlich gesehen, jedoch sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich und werden im Projekt verfolgt. Vorstellbar wären z.B. die individualisierte Fertigung ballistischer Schutzplatten oder auch die Fertigung (form-)angepasster Schutzstrukturen im Feldlagerbau.



Abb. 3: Bruchfläche eines Filaments aus UHMWPE mit erhöhter Festigkeit (REM Aufnahme, Spannung 0.805 kV, Arbeitsabstand 2.1 mm)



Abb. 4: Herstellung einer Zugprobe aus UHMWPE mittels FFF

Jonas Remiger, M.Sc.
 Universität der Bundeswehr München
 Institut für Strahltriebwerke
 Neubiberg

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

isa@unibw.de

isa@unibw.de

Das Engine Mission Simulation System: Triebwerkssimulation in der virtuellen Flugmission

Bei der Auslegung zukünftiger Luftfahrzeuge muss das gesamte System, bestehend aus Fluggerät, Antrieb, Energiemanagement und Missionsführung, bereits in einem frühen Auslegungsstadium miteinander gekoppelt berücksichtigt werden. Das Engine Mission Simulation System (EMSS) ermöglicht eine parallele Simulation des Antriebs- und Energieversorgungssystems mit dem Fluggerät in einer virtuellen Mission. So können innovative Technologien schnell und kostengünstig entwickelt und bewertet werden.

Insbesondere bei unbemannten fliegenden Systemen verkürzen sich die Entwicklungszyklen stetig, während die Anforderungen der Streitkräfte an die Fluggeräte steigen. Um gleichzeitig die immer komplexeren, neuartigen Technologien schnell und effizient entwickeln sowie bewerten zu können, ist eine gekoppelte Betrachtung der fliegenden Plattform mit ihrem Antriebs- und Energiesystem innerhalb mehrerer repräsentativen Missionen nötig. Das Institut für Strahltriebwerke der Universität der Bundeswehr München entwickelt aus diesem Grund gemeinsam mit der Wehrtechnischen Dienststelle 61 ein multidisziplinäres Simulationswerkzeug zur Untersuchung und Bewertung der Antriebs- und Energieversorgungsanlage von fliegenden Systemen.

Die grundsätzliche Programmstruktur des Engine Mission Simulation System ist in Abb. 1 einschließlich der wichtigsten Datenverbindungen dargestellt. Um in der Zukunft einzelne Softwareteile austauschen, erweitern oder durch Hardware ersetzen zu können, wurde besonderer Wert auf Modularität gelegt. Durch den Einsatz verschiedener Programme wie NPSS, MATLAB/Simulink® oder X-Plane 11 sind eine Vielzahl von

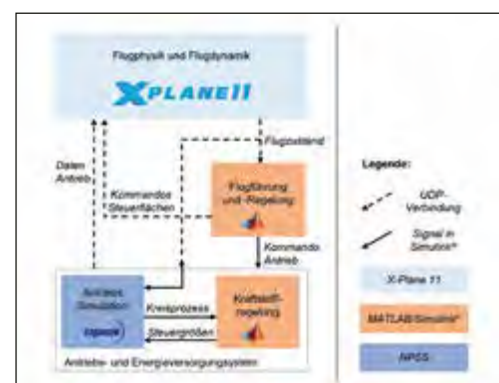


Abb. 1: Programmstruktur des Engine Mission Simulation Systems



Abb. 2: Render einer Studie eines Unmanned Propulsion and Energy Research Aircraft

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

isa@unibw.de

Schnittstellen vorhanden, die sowohl einen effizienten Einsatz als auch eine einfache Weiterentwicklung der Software ermöglichen.

Als virtuelle Forschungsplattform im EMSS dienen vor allem Modelle unbemannter Fluggeräte in einer Größenordnung bis zwei Tonnen maximaler Abflugmasse, wie eines exemplarisch in Abb. 2 dargestellt ist. Um die physikalische Abbildung dieser Fluggeräte im EMSS verifizieren bzw. kalibrieren zu können, werden mit numerischen Strömungslösern Rechnungen an exemplarischen Punkten der Flug-Envelope durchgeführt. Das Ergebnis einer solchen Rechnung zeigt Abb. 3. Hier ist auf der Oberfläche des Fluggeräts die Druckverteilung in schwarz-weiß skizziert, während in der Schnittebene in der Symmetrieachse des UAVs die Machzahlverteilung in Farbe gezeigt wird.

Zum aktuellen Zeitpunkt wird das EMSS bereits für verschiedene Untersuchungen eingesetzt, deren Schwerpunkt auf Integrationsaspekten des Antriebs und seines Energiemanagements liegt. Bei der Antriebsintegration in ein bestehendes Fluggerät sind insbesondere die Auswirkung von Einlaufstörungen auf die Triebwerksperformance sowie ein intelligentes Design der Düse von besonderem Forschungsinteresse. Zur Untersuchung der Einlaufstörungen wird auf

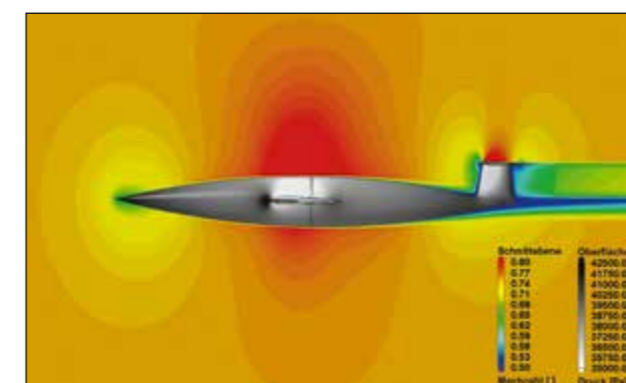


Abb. 3: CFD-Simulation eines simplen UAV-Entwurfs

Dipl.-Ing. (univ.) Michael Krummenauer
 Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät der Bundeswehr (WTD61)
 Manching

WTD61AntriebFuT@bundeswehr.org

die langjährige Erfahrung des Instituts zurückgegriffen, das seit mehreren Jahren experimentell und numerisch aerodynamische Phänomene in stark gekrümmten Einlaufsystemen untersucht. Ein typisches Störmuster eines solchen Triebwerkeinlaufs ist in Abb. 4 dargestellt. Diese breite Datenbasis wird über dimensionslose Kennzahlen in das EMSS überführt, und dort in verschiedenen Flugzuständen ihr Einfluss auf die Antriebs- und somit Flugzeug-Performance untersucht. Gleichzeitig wird auch am anderen Ende des Triebwerks geforscht. Aufbauend auf detaillierten CFD-Untersuchungen (CFD: Computational Fluid Dynamics, Numerische Strömungsmechanik), wird im EMSS der Einfluss von fluidischen Schubvektorsystemen sowohl auf die Trimmwiderstände als auch die Rückwirkung auf das Triebwerk untersucht.

Das Engine Mission Simulation System liefert bei allen Untersuchungen zeitaufgelöste Daten aus dem Antriebssystem, dem Flugzustand und der Aerodynamik. Aufbauend auf diesen Daten können zu jedem Missionszeitpunkt Aussagen über die Leistungsfähigkeit und mögliche Einsatzgebiete einer Technologie bereits in einem frühen Entwicklungsstadium getroffen werden.

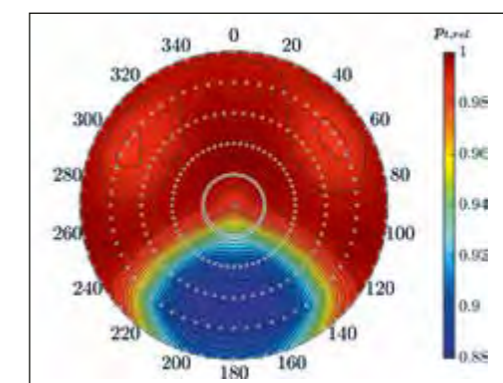


Abb. 4: Typisches Druckstörbildungsbild an der Triebwerkeintrittsebene nach einem gekrümmten Einlauf

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

WTD71posteingang@bundeswehr.org

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

WTD71posteingang@bundeswehr.org

Parametrische Spektralschätzung für die Analyse hydroakustischer Zeitreihen

Durch zeitlich aufgelöste Messung des sich im Wasser ausbreitenden Schalls erhält man hydroakustische Zeitreihen, deren Analyse eine wichtige Rolle bei der Aufklärung der Lage in einem Seegebiet oder auch beim Betrieb von Sonarsystemen spielt. An der Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung WTD 71 wird eine Klasse moderner Algorithmen zur Zeitreihenanalyse, die Zustandsraum-Modellierung, eingesetzt und weiterentwickelt, die verbesserte Schätzungen des Leistungsspektrums ermöglicht.

Während sich elektromagnetische Wellen im Wasser nur sehr begrenzt ausbreiten, können dies akustische Schallwellen über deutlich größere Entfernungen. Daher eignet sich die Messung und Aufzeichnung hydroakustischer Signale mittels geeigneter Sensoren (Hydrophone) für eine passive militärische Aufklärung sowie für die Kommunikation unter Wasser. Auch beim Betrieb aktiver Sonarsysteme besteht die Notwendigkeit zur Analyse und Filterung der empfangenen Zeitreihen. Hydrophone werden einzeln, beispielsweise in abgesetzten Meßbojen, oder als driftende oder geschleppte Arrays eingesetzt.

Als Ergebnis von Messungen des Schalls im Wasser erhält man Zeitreihen; falls mehrere Hydrophone in einem Horizontal- oder Vertikal-Array verwendet werden, kann man mittels Beamforming gezielt bestimmte räumliche Richtungen betrachten. Ein einzelnes Hydrophon zeichnet alle Schallquellen auf, die sich in der Umgebung befinden, darunter Überwasser- und Unterwasser-Schiffe, aber auch Meeressäuger und Witterungseinflüsse.

Zeitreihen werden heutzutage in vielen Fachwissenschaften erhoben und analysiert; für ihre Analyse hat sich innerhalb



Abb. 1: Meßboje der Firma Jasco Applied Sciences, mit Einzelhydrophon (rechts); Ausbringen der Boje vom FS ELISABETH MANN BORGESE (links)

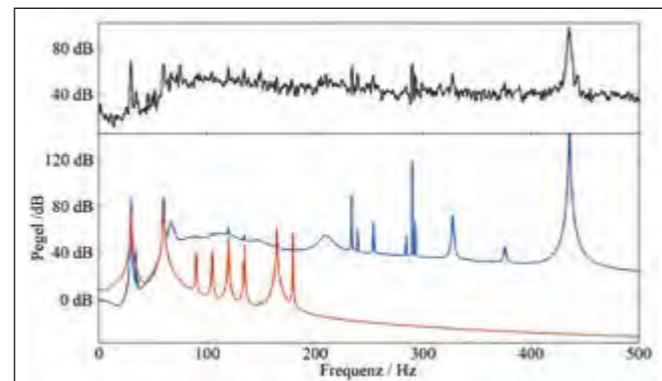


Abb. 2: Beispiel für die Schätzung des Leistungsspektrum einer Zeitreihe, die in der Ostsee von einer Meßboje gemessen wurde und Schiffslinien des FS ELISABETH MANN BORGESE enthält, mittels Fourier-Transformation (oben, schwarz), sowie mittels parametrischer Zustandsraum-Modellierung (unten, blau); in Rot ist der Anteil des Leistungsspektrums gezeigt, der durch den Linienkamm des Schiffsdiesels erzeugt wird

der Statistik die Zeitreihenanalyse als eigenständiges Gebiet etabliert. Verschiedene Algorithmen zur Analyse von Zeitreihen haben weite Verbreitung gefunden, so etwa die Schätzung von Leistungsspektren mittels Fourier-Transformation, durch welche die in der Zeitreihe enthaltene Leistung nach Frequenz geordnet aufgeteilt wird. Im Falle zeitlich veränderlicher Zeitreihen kann eine zeitabhängige Schätzung des Leistungsspektrums durchgeführt werden, deren Ergebnis man als Spektrogramm bezeichnet. Wird in einem Spektrogramm der breitbandige Untergrund entfernt, so daß nur schmalbandige Komponenten (Linien) dargestellt werden, so spricht man von einem Lofargramm.

Moderne Algorithmen für die Zeitreihenanalyse verwenden eine parametrische Modellierung anstelle der Fourier-Transformation; eine sehr leistungsfähige Klasse parametrischer Modelle ist unter dem Begriff „Zustandsraum-Modelle“ (engl.: state space models) bekannt. Das Zentrum für Wasser-, Körper- und Luftschall an der WTD 71 befasst sich mit der Entwicklung entsprechender Modellierungsalgorithmen und ihrer Anwendung auf hydroakustische Zeitreihen. Als Resultat erhält man parametrische Schätzungen des Leistungsspektrums.

Zur Forschung an Algorithmen für die Zeitreihenanalyse gehört auch die Erzeugung geeigneter Datensätze bei Experimenten auf See. Bei solchen fährt beispielsweise ein Forschungsschiff auf einem bestimmten Kurs an einem abgesetzten Meßsystem vorbei, um die Reichweite von Signaturkomponenten untersuchen zu können (siehe Abb. 1).

Ein Vorteil der Spektralschätzung mittels parametrischer Modellierung besteht in einer verbesserten Rauschunterdrückung

(siehe Abb. 2), wodurch die Detektierbarkeit schwacher Signale erhöht wird. Des weiteren ist es in entsprechend strukturierten Zustandsraum-Modellen möglich, in Signalgemischen einzelne Komponenten zu trennen und zu rekonstruieren; dies ist auch möglich bei Komponenten mit variabler oder schlecht definierter Frequenz. Im Anschluss an die Trennung von Komponenten ist auch gezieltes Filtern möglich. Als Beispiel ist in Abb. 2 (unten) die parametrische Schätzung des Leistungsspektrums einer Zeitreihe dargestellt, welche bei der Vorbeifahrt eines Forschungsschiffes an einer abgesetzten Meßboje aufgezeichnet wurde (vgl. Abb. 1): In Blau ist das gesamte Leistungsspektrum dargestellt, während in Rot nur derjenige Anteil dargestellt ist, der durch den Linienkamm des Schiffsdiesels erzeugt wird, mit einem Linienabstand von 15 Hz.

Da in einem Zustandsraum-Modell die Eigenschaften der Komponenten, wie etwa die Hauptfrequenz, explizit durch Modellparameter repräsentiert werden, lassen sich direkt aus diesen Modellen parametrische Lofargramme erzeugen; diese können verwendet werden, um ausgewählte Signaturkomponenten zu verfolgen (Tracking). Ein Beispiel zeigt Abb. 3.

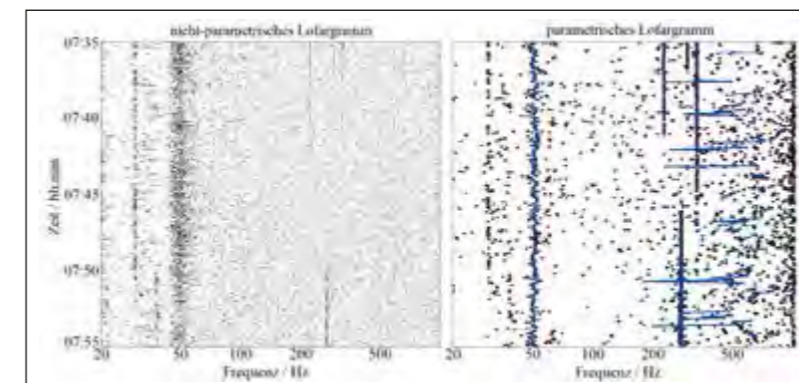


Abb. 3: Konventionelles (nicht-parametrisches) Lofargramm (links) und parametrisches Lofargramm (rechts), für eine 20 Minuten lange Zeitreihe, die in der Nordsee von einer Meßboje gemessen wurde. Die sichtbaren Signatur-Linien gehören zu zwei Schiffen, darunter FS ELISABETH MANN BORGESE

Dr. Alexandra Schäfke
 Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen,
 Maritime Technologie und Forschung – WTD 71
 Eckernförde

WTD71posteingang@bundeswehr.org

Demonstrator für die Simulation der Bi- und Multistatischen U-Jagd

Für die U-Jagd ist die Vorhersage von akustischen Entdeckungswahrscheinlichkeiten wesentlich. Sie erfolgt mittels Simulationsprogrammen zur Sonarleistungsanalyse, die für ein Szenario die Schallausbreitung berechnen. Die moderne U-Jagd arbeitet mit bi- oder multistatischen Verfahren, bei denen Sender und Empfänger disloziert sind. Dies stellt neue Herausforderungen an die Simulation.

Aufgrund ihrer deutlich höheren Reichweite in Wasser kommen bei der U-Jagd Sonarsysteme basierend auf Schallwellen anstelle von elektromagnetischen Sensoren zum Einsatz. Mit einem Simulationsprogramm zur Sonarleistungsanalyse kann für ein gegebenes Szenario die Entdeckungswahrscheinlichkeit berechnet werden. Das heißt, es kann bestimmt werden, ob ein feindliches U-Boot in einem Umkreis um das eigene Schiff entdeckbar ist. Umgekehrt kann auch ermittelt werden, ob man selbst durch eine feindliche Einheit aufgeklärt werden kann.

In der modernen U-Jagd wird oft im Verbund gearbeitet. Soll ein feindliches U-Boot (Ziel) mittels aktiv ausgesendeten Sonar-Pings aufgespürt werden, sind Sender des Pings und Empfänger des am Ziel reflektierten Pings nicht notwendigerweise auf derselben Einheit. Man spricht in diesem Fall von einem bistatischen oder, bei mehr als zwei beteiligten Einheiten, von einem multistatischen Szenario. Um Vorhersagen für Entdeckungswahrscheinlichkeiten treffen zu können, müssen daher auch die Simulationsprogramme die Schallausbreitung in solchen Szenarien berechnen können.

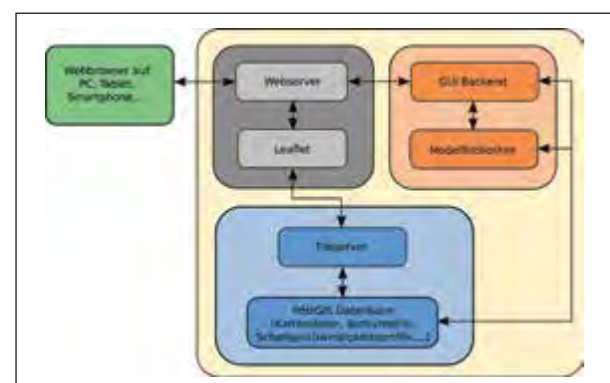


Abb. 1: Aufbau des webbasierten Demonstrators zur bi- und multistatischen Sonarleistungsanalyse

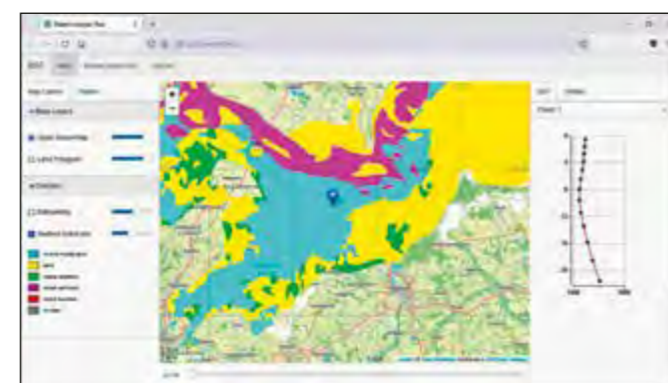


Abb. 2: Screenshot der Bedienoberfläche im Webbrowser: Darstellung von Umgebungsdaten (hier Sedimenttyp) als Overlay und Schallgeschwindigkeitsprofil an der ausgewählten Position. Das Schallgeschwindigkeitsprofil beeinflusst wesentlich die Schallausbreitung

Für monostatische Szenarien wird von der Marine das deutsche Simulationsprogramm MOCASSIN (Monte-Carlo Schallstrahlen Intensitäten) zur Sonarleistungsanalyse verwendet, das an der WTD 71 betreut und weiterentwickelt wird. Eine Erweiterung auf bi- und multistatische Szenarien stellt aufgrund der Vielzahl an benötigten Einzelrechnungen deutlich höhere Anforderungen an die Rechenleistung und an die grafische Darstellung der Ergebnisse. Des Weiteren sind für die bistatische Streuung an Grenzflächen und für das dreidimensionale Zielmaß (Reflexionsverhalten des aufzuklärenden Ziels) komplexere Modelle als die bisher verwendeten erforderlich. Daher ist eine Neuentwicklung erforderlich. In einem Demonstrator sollen zunächst sowohl das Konzept eines webbasierten Ansatzes untersucht werden, der eine Separation von Rechnerserver und Anwendungsklient ermöglicht, als auch eine geeignete Darstellung der Ergebnisse.

Hierzu wurde der FORTRAN Rechenkern von MOCASSIN in seine Einzelteile zerlegt, modernisiert und um neue Komponenten ergänzt. Diese C++ Programmibliothek, die die für ein multistatisches Szenario erforderlichen Berechnungen durchführt, läuft zusammen mit dem Backend des Graphical User Interface (GUI) auf einem leistungsfähigen Modellserver. Der Zugriff erfolgt über eine Webseite, die im Browser eines einfachen Clients läuft.

Zusätzlich enthält der Demonstrator einen Datenbankserver, der Umgebungsdaten wie Wassertiefen, Bodendaten und Schallgeschwindigkeiten bereitstellt, die für die Berechnung der Schallausbreitung benötigt werden. Hierfür wurde zunächst eine PostgreSQL / PostGIS Datenbank gewählt und zunächst mit frei im Internet verfügbaren Daten von EMODnet und

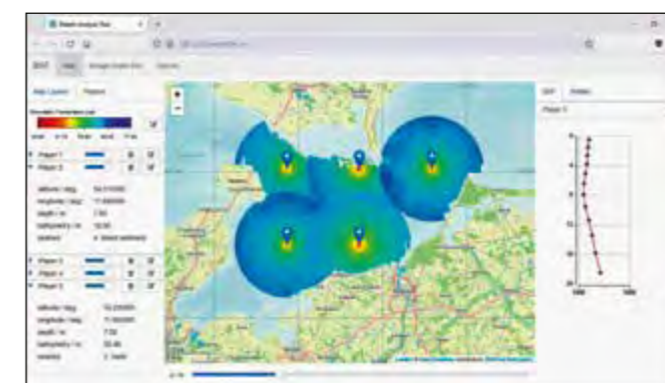


Abb. 3: Screenshot der Bedienoberfläche im Webbrowser: monostatischer akustischer (einfacher) Ausbreitungsverlust für verschiedene Positionen

Copernicus gefüllt. Später kämen hier eingestufte Datenbanken der Marine zum Einsatz.

Dritte Komponente des Demonstrators ist ein lokaler Fileserver, der für die Bereitstellung von Karten (z. B. basierend auf Open Street Map Daten) und Overlays (z. B. Bathymetrie) verantwortlich ist, die im Einsatz auch ohne Anbindung an das Internet funktionieren muss.

Der Bedienende platziert über Mausclicks die Einheiten an den gewünschten Positionen. Dabei wird die Berechnung der Schallausbreitung in Entfernungs-Tiefen-Schnitten um die Position automatisch angestoßen. Die Auswahl zweier Einheiten als Sender und Empfänger führt zu einer Kombination der Einzelberechnungen und, unter Berücksichtigung des Hintergrundgeräusches, bistatischem Nachhall und Zielmaß, zu einer Vorhersage der Entdeckungswahrscheinlichkeit. Die Ergebnisse werden direkt in der Karte für eine auswählbare Zieltiefe dargestellt.

Dies erlaubt dem Anwendendem, interaktiv geeignete Positionen und Kurse mit geringer eigener Entdeckungswahrscheinlichkeit festzulegen oder sicherzustellen, dass Bedrohungen rechtzeitig aufgeklärt werden können.

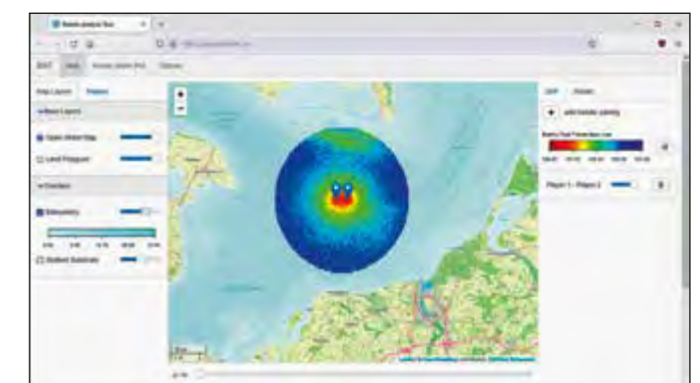


Abb. 4: Screenshot der Bedienoberfläche im Webbrowser: bistatischer akustischer Ausbreitungsverlust für ein Sender-Empfänger-Paar

Dipl.-Ing. Michael Schäffer
 Fraunhofer-Institut für Chemische Technologien ICT
 Pfinztal

Prof. Dr. Karsten Pinkwart
 Fraunhofer-Institut für Chemische Technologien ICT
 Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

info@ict.fraunhofer.de

Postfossiles Energiemanagement in der Bundeswehr: Bundeswehrrelevante Stromspeicher und Energiewandler für erneuerbare Energien

Mit Inkrafttreten des Bundes-Klimaschutzgesetzes ist eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2045 mit Ersatz fossiler Energien vorgeschrieben. Dies betrifft auch die Bundeswehr. Ziel der Studie „Innovative nachhaltige Energiesysteme“ (INES-Bw) ist es daher, mittels einer wissenschaftlich fundierten Strategie die Energiewende Bundeswehr mit einem Maximum an Energiesicherheit und Energieresilienz schnellstmöglich zu gestalten.

Im Rahmen der Energiewende sieht sich auch die Bundeswehr mit Herausforderungen bzgl. der Energiesicherheit und -resilienz ihrer Liegenschaften und mobilen Systeme mit ihren besonderen Fähigkeits- und Leistungsprofilen konfrontiert. Der steigende Anteil an volatilen Erneuerbaren Energien (Wind und Sonne) und der Wegfall konventioneller Kraftwerke erfordern die Integration von Stromspeichern ins Energienetz, die saisonale als auch zirkadiane Erzeugungslücken ausgleichen. Zusätzlich müssen bis 2045 fossile Brenn- und Kraftstoffe durch klimaneutrale synthetische und biogene Energieträger substituiert werden.

Der Nettostromverbrauch der Liegenschaften der Bundeswehr lag zuletzt jährlich bei ca. 1 TWh, der Wärmeverbrauch bei ca. 2,9 TWh. Davon konnten 2019 bereits 61 % (Stromverbrauch) bzw. 11,4 % (Wärme) durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden (siehe Abb. 1). Der CO₂-Ausstoß belief sich dabei auf 0,82 Mill.t in der Infrastruktur und 0,63 Mill.t für die militärische Mobilität. Systeme zur Gewinnung und Speicherung von Erneuerbarem Strom aus den volatilen Energiequellen Sonne und Wind stellen eine Option zur elektrischen Energieversor-

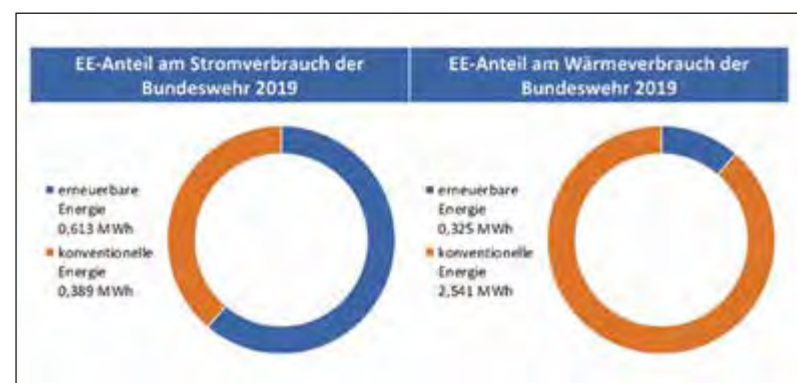


Abb. 1: Anteil der Erneuerbaren Energien am Strom- und Wärmeverbrauch der Bundeswehr 2019 (Quelle: Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr (Hg.) (2019): Energiebericht Bundeswehr 2019)



Abb. 2: Bausteine für ein innovatives Energiesystem der Zukunft

Dr. Martin Becker
 Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE
 Kaiserslautern

info@iese.fraunhofer.de

Prof. Dr. Michael Faulde
 Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
 Erding

wiwebposteingang@bundeswehr.org

gung von Bundeswehrliegenschaften dar und sind Inhalt verschiedener Projekte und Studien (siehe Abb. 2). Des Weiteren wurden Prozesse und Anlagen zur Herstellung klimaneutraler, NATO-SFP-konformer Flüssigkraftstoffe hinsichtlich militärspezifischer Anforderungen und Bedarfe betrachtet (NATO Single Fuel Policy).

Zur kurzfristigen Stromspeicherung (zirkadiane oder „Kurzzeitspeicher“) wurden Lithium- und Redox-Flow-Batterien (RFB) als Technologien mit dem höchsten Potenzial unter militärischen Rahmenbedingungen identifiziert und für eine praktische Evaluation empfohlen.

Für die längerfristige effiziente Speicherung (saisonale oder „Langzeitspeicher“) eignet sich insbesondere der per Elektrolyse gewonnene Wasserstoff mit anschließender Methanisierung (PtG). Das Methan kann zur Wärmeerzeugung in Liegenschaften weiterverwendet werden. Eine direkte resiliente Rückverstromung der chemisch gebundenen Energie bieten Brennstoffzellen, stationäre Verbrennungskraftmaschinen oder Mikrogasturbinen.

Zur Herstellung klimaneutraler Flüssigkraftstoffe (sogenannte e-Fuels) aus Strom, Wasserstoff und Kohlendioxid (PtL) wurden Fischer-Tropsch-Systeme auf Basis von Mikroreaktoren be-

trachtet, welche für niedrigere Leistungen bereits kommerziell angeboten werden. Verglichen mit den vorgestellten Speicheroptionen weisen sie eine niedrigere technologische Reife auf, die noch nicht die erforderliche militärische Robustheit besitzen. Klimaneutrale PtL Kraftstoffe werden kohlenstoffbasierte fossile Energieträger wie bislang NATO-SFP-konforme in absehbarer Zeit ersetzen müssen, denn für viele militärische Anwendungen wird es keinen alternativen Energieträger mit der erforderlichen volumetrischen Energiedichte geben (siehe Abb. 3).

Ergebnisse der Studie wurden in einem digitalen Architekturmodell dokumentiert, um eine gemeinsame Grundlage für das Verständnis zu schaffen. Hierzu wurde das bundeswehreigene Modellierungsframework „Architekturdatenmodell der Bundeswehr“ (ADMBw) verwendet. Auf diese Weise wird eine effektive und kostengünstige Entwicklung militärischer Fähigkeiten unterstützt (NAFv4).

Wir bedanken uns bei allen Partnern des Vorhabens im Besonderen den Kollegen der Abteilung IUD I und IUD II 5 im BMVg, dem WIWeB in Erding, der Universität der Bundeswehr in München sowie dem BAIUDBw und BAABw.

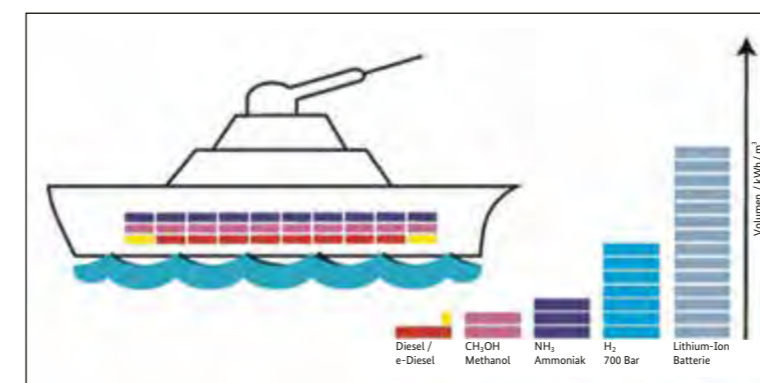


Abb. 3: Platzbedarf verschiedener Energieträgertanksysteme auf einem Hochseepatrouillenschiff (18 MW Hauptantrieb) (Quelle: nach Chatterjee, Daniel (2021): Power-to-X ein Schlüsselement der Energiewende. Workshop Rolls-Royce und PlgABw, PlgABw, 05. 10. 2021)

Dr. - Ing. Peter Gerber
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Claudio Tagliabue, M. Sc.
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal

info@ict.fraunhofer.de

Leistungsgesteigerte Unterwassersprengstoffe

Das Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Ausarbeitung, Herstellung, Verarbeitung und Charakterisierung von kunststoffgebundenen Sprengstoffen zu gepressten oder gegossenen Sprengladungen. Durch den Einsatz von geeigneten Mischtechnologien sowie neuen Komponenten können Wirkladungen mit verbesserter Leistung und reduzierter Empfindlichkeit für Unterwasserladungen hergestellt werden.

Unterwassersprengstoffe werden für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt, u. a. für die Bekämpfung von Minen. Während man früher hauptsächlich Wirkladungen auf Basis von Trinitrotoluol (TNT) eingesetzt hat, ein Beispiel ist der in der Bundeswehr eingesetzte Sprengstoff SSM TR 8870, werden heute kunststoffgebundene Ladungen (PBX) auf Basis von Ammoniumperchlorat (AP) und Aluminium eingesetzt, die neben einer hohen Leistung vor allem eine geringe Empfindlichkeit aufweisen.

Für die Reaktion der Sprengladung unter Wasser ist es wichtig, dass ausreichend Sauerstoff für die Detonationsreaktion zur Verfügung steht. AP wird in der Formulierung als Oxidator eingesetzt, d. h. bei einer Reaktion kann AP Sauerstoff abgeben. Die Verwendung des neuen Oxidators Ammoniumdinitramid (ADN) kann bei Unterwassersprengstoffen nützlich sein. Da ADN im Gegensatz zu AP chlorfrei ist, kann keine Salzsäure bei einer Detonation erzeugt werden, so kann es als umweltfreundlich angesehen werden. ADN bietet auch Vorteile bei der Erarbeitung der Sprengstoffrezeptur. Es ist nicht nur Oxidator sondern auch ein Sprengstoff. In Abhängigkeit von der Dichte



Abb. 1: Sprengladung, ausgearbeitete Formulierung für Unterwasseranwendungen



Abb. 2: Initiierungstest – Nachweisplatte

und Formulierung liegt die Detonationsgeschwindigkeit im Bereich von 5000 – 6000 m/s, was für eine Energieübertragung auf das Meerwasser günstig ist.

Für die Bewertung des Einsatzpotenzials von ADN im Vergleich zu AP in Unterwassersprengstoffen erfolgte die Berechnungen der thermodynamischen Daten u. a. mit Hilfe des ICT-Thermodynamik-Codes. Berechnet wurden für eine Vielzahl an möglichen Formulierungen unter anderem der Druck und die Temperatur, welche sich unmittelbar nach der Reaktion einstellen. Des Weiteren erfolgte die Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit sowie der Heat of Detonation, ein Maß für die frei werdende Energie während der Detonation.

Hierdurch konnte die Auswahl an möglichen Formulierungen eingegrenzt werden. Nach Überprüfung der Kompatibilität, ob alle eingesetzten Rohstoffe miteinander verträglich sind, wurden 9 Formulierungen auf Basis Kunststoffbinder / Weichmacher / ADN oder AP / Hexogen und Aluminium erarbeitet. Hierfür müssen alle Komponenten aufeinander abgestimmt werden, sodass nach dem Mischprozess trotz einem möglichst hohen Füllstoffgehalt eine niedrige Viskosität der Vergussmasse erreicht wird, welche es ermöglicht, die Mischung im Gießprozess zu verarbeiten. Abb. 1 zeigt beispielhaft Ladungen im Durchmesser von 21 mm.

Durch Initiierungstests wurde zunächst der Durchmesser bestimmt, ab welchem eine Initiierung der Sprengladung möglich ist. Bei erfolgreicher Initiierung weist die Nachweisplatte ein Loch auf, wie Abb. 2 zeigt. Anschließend wurden Ladungen mit unterschiedlichen Durchmessern hergestellt, um den Durchmesser zu bestimmen, ab welchem die Deto-

nationsgeschwindigkeit unabhängig vom Ladungsdurchmesser ist. Gleichzeitig wurde auch ein Plate-Dent-Test durchgeführt, so dass auch ein relativer Vergleich der Brisanz der verschiedenen Formulierungen vorgenommen werden konnte. Hierbei wurde die Beultiefe in einem Stahlblock – siehe Abb. 3 – ausgewertet.

Um die Leistungsfähigkeit einer Formulierung zu evaluieren, wurden 50-mm-Kupferzylinder-Tests durchgeführt. Hierbei wurde in ein Kupferrohr die gemischte Formulierung gegossen. Mit Hilfe der Photonic-Doppler-Velocimetry wurde mit einem Laser während der Detonation die Wandgeschwindigkeit des sich ausdehnenden Kupferrohres bestimmt. Aus diesen experimentellen Messdaten wurden Parameter für eine Zustandsgleichung ermittelt und in ein numerisches Simulationsverfahren implementiert, um verschiedene Szenarien von Unterwassersprengstoffen in Abhängigkeit von Zündtiefe, Ladungsgröße oder Entfernung zum Ziel zu berechnen. Die Ergebnisse bestätigen im Vergleich zu Referenzladungen die vielversprechenden Eigenschaften von ADN in Unterwassersprengstoffformulierungen.



Abb. 3: Plate-Dent-Test zur Bestimmung der Beultiefe

Moderne Leistungsbestimmung von Sprengstoffen

Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT deckt als einziges Forschungsinstitut in Deutschland alle Aspekte der Explosivstoffforschung ab. Ein wesentlicher Fokus liegt auf der Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der Leistung und Sicherheit bei geringem Materialeinsatz. Die Kombination von neuen und etablierten Verfahren umfasst – von der Synthese im Labor bis zu systemnahen Anwendungen – die gesamte Bandbreite.

Zu den etablierten Verfahren gehört der Kupferzylindertest, bei dem die Ausdehnungsgeschwindigkeit des mit Sprengstoff gefüllten Kupferrohrs mit Photon-Doppler-Velocimetry (PDV) zeitaufgelöst erfasst wird. Dabei wird der Doppler-Effekt (vergleichbar mit der Frequenzänderung bei Schall) zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzt. Die daraus berechnete Expansionsarbeit erlaubt die Bestimmung der Zustandsgleichung des Sprengstoffs, die dann in Simulationen für beliebige Anwendungen eingesetzt werden kann. Abb. 1 zeigt den Aufbau des Kupferzylindertests für Sprengladungen mit 50 mm Durchmesser und adaptierter PDV-Messtechnik. Der am ICT entwickelte Zylindertest kombiniert dabei modernste Messtechnik mit einer am ICT entwickelten Auswertemethode, die die präzise Bestimmung von Zustandsgleichungen ermöglicht.

Um die Blastwirkung von Sprengladungen besser charakterisieren zu können wurde am ICT eine modulare Lanze entwickelt (Abb. 2), die bis zu drei Blastdrucksensoren auf 1 m an die Sprengladung heranführt und auch bei Splitterbildung eingesetzt werden kann. Dadurch können selbst kleine Ladungen ab 100 g

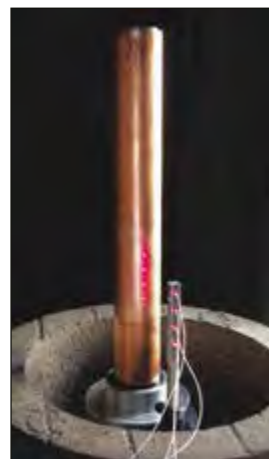


Abb. 1: Der 50 mm Kupferzylindertest



Abb. 2: Lanze für Blastdruckmessungen im streichenden Einfall

hochaufgelöst charakterisiert werden. Durch die Zustandsgleichung aus dem Zylindertest besteht zudem eine Schnittstelle zwischen Simulation und Experiment, wie dies beispielhaft für einen Blastdruck-Verlauf in Abb. 3 dargestellt ist.

Die Bestimmung der Detonationsgeschwindigkeit als wesentlichen Leistungsparameter erfordert normalerweise Explosivstoffmengen im Bereich von Kilogramm. Durch ein am Fraunhofer ICT neu entwickeltes Verfahren konnten bereits validierte Messungen auf wenigen Millimetern Lauflänge an einer Sprengladung mit nur 150 mg Masse durchgeführt werden. Dazu kommen gedruckte Leiterplatten zum Einsatz, die ein Array aus 16 Kurzschlusskontakten mit nur jeweils 0,4 mm Abstand bilden. Dadurch kann die Detonationsgeschwindigkeit auch an Zündersystemen und Zündverstärkern ermittelt werden.

Der Detonationsdruck definiert den Ausgangszustand der Expansionsisentrophen. Dessen experimentelle Bestimmung ist durch den Einsatz von PDV akkurat möglich. Dazu wird eine dünne Metallfolie durch die Detonation beschleunigt und die freie Oberflächengeschwindigkeit bestimmt. Durch Massen- und Impulserhaltung sowie bekannte Materialparameter des Metalls kann der sprengstoffseitige Druck – der Detonationsdruck – berechnet werden. In Abb. 4 ist der kombinierte Versuchsaufbau zur Detonationsdruckbestimmung und Detonationsgeschwindigkeitsmessung für eine typische Sprengstoffmasse von ca. 20 g dargestellt.

Die Initiierung von Sprengstoffen durch Schockwellen ist ein physikalisch komplexer Vorgang, für den je nach Anwendung insbesondere bekannt sein muss, wie weit der Initiierungs-

stimulus vom Schwellenwert (Go / No-Go) entfernt liegt. Für Sicherheitsbarrieren in Zündsystemen möchte man beispielsweise sicherstellen, dass bei einer fehlerhaft ausgelösten Zündung der Impuls nicht auf die Hauptladung übertragen wird. Dazu wird am Fraunhofer ICT in Simulationen und durch Modellierung die Initiierung quantifiziert, was beispielhaft für das James-Modell in Abb. 5 für zwei Fälle (mit und ohne Barriere) dargestellt ist. Mit Barriere wird die Schwelle zuverlässig nicht erreicht, sodass die Initiierung sicher verhindert wird.

Auch zukünftig werden bei der Entwicklung neuer Explosivstoffe die etablierten Verfahren mit hohem Sprengstoffeinsatz erforderlich bleiben. Die neuen experimentellen und numerischen Methoden bilden eine Ergänzung zu etablierten Verfahren und können bereits in einer frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden, was den Prozess beschleunigt, die Kosten reduziert und eine optimale Wirkung garantiert.

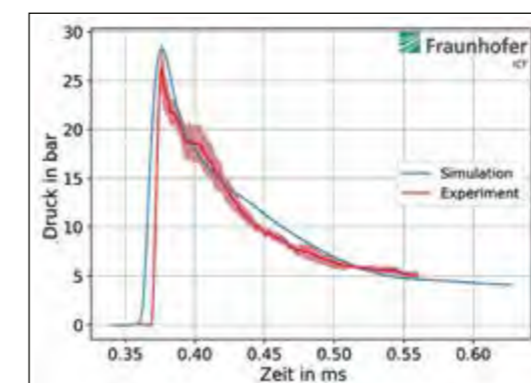


Abb. 3: Gemessener und simulierter Blastdruck-Verlauf



Abb. 4: Kombiniertes Versuchsaufbau zur Bestimmung von Detonationsdruck und Detonationsgeschwindigkeit

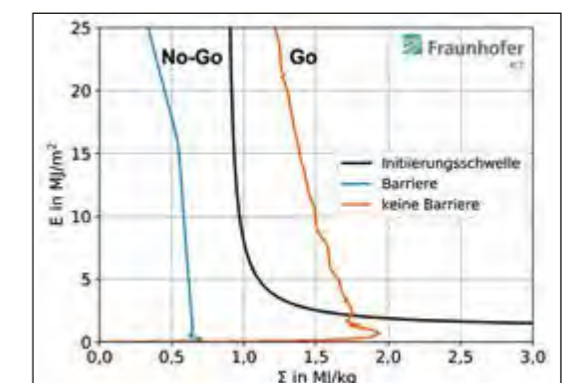


Abb. 4: Initiierungsimpuls mit und ohne Barriere

Prof. Dr.-Ing. Frank Flemisch
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

info@fkie.fraunhofer.de

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

info@fkie.fraunhofer.de

„Meaningful Human Control“ von Automatisierung und KI in Waffensystemen

Neue Technologien der künstlichen Intelligenz (KI), gesteigerte Anforderungen und der demographische Wandel führen dazu, dass in Waffensystemen immer mehr Aufgaben durch Assistenz und Automation übernommen werden. Eine existentielle Fragestellung dabei ist, wie bei aller maschineller „Intelligenz“ immer noch Menschen eine bedeutsame Kontrolle (Meaningful Human Control) ausüben können.

Motiviert durch die weltpolitische Lage, wie z. B. dem Krieg in der Ukraine, und angetrieben durch technischen Fortschritt werden Waffensysteme der Bundeswehr neu konzipiert oder durch Kampfwertsteigerungen angepasst. Sie stehen dabei im Spannungsfeld von Kampfkraft, Agilität, Schutz der eigenen Soldaten, Sicherheit für eigene Kräfte und Zivilbevölkerung.

Dabei spielen neben den Aspekten der Kampfwertsteigerung bei verringerter Besetzung insbesondere die Frage der Nutzung von künstlicher Intelligenz (KI) und Automatisierung, und damit die Kontrollierbarkeit (Meaningful Human Control, MHC) eine entscheidende Rolle.

Anwendungsfälle für KI, Automation und MHC sind moderne, zukünftige Kampfsysteme wie das Future Combat Air System (FCAS) oder das Main Ground Combat System (MGCS), in denen künftig Bewegungsplattformen mit und ohne Besetzung integriert werden. So zeigt Abb. 1 einen Anwendungsfall von MHC, der Einsatz von Augmented Reality im Joint Operational Demonstrator for Advanced Appliances, JODAA, des BAAINBw. Darüber hinaus stellen Smart Munition und Präzisions-Abruf-



Abb. 1: Links: Joint Operational Demonstrator for Advanced Applications (JODAA). Rechts: Innenraumsicht mit den von Fraunhofer FKIE entwickelten Augmented Reality Overlays im Kamera-Monitor-System

munition („Loitering Munition“) Wirkmittel mit einem hohen Anteil von Automatisierung dar, die gleichzeitig dauerhaft von menschlichen Operateurinnen und Operateuren an Bodenkontrollstationen überwacht und kontrolliert werden müssen.

Meaningful Human Control wird einerseits beeinflusst durch Situationsbewusstsein, Gebrauchstauglichkeit und Transparenz, andererseits geprägt durch ethische und rechtliche Vorgaben. Das genaue Zusammenwirken dieser Faktoren ist Ziel wissenschaftlicher Untersuchung und Diskussion, mit hohem Bedarf für nationale und internationale Abstimmung.

Sowohl in der grundfinanzierten Forschung zum Thema der kooperativen Bewegungsführung als auch in der NATO Research Task Group 330 „Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems“ erforscht die Abteilung Systemergonomie mit Expertinnen und Experten aus den USA, Niederlanden, Großbritannien, Frankreich, Italien und Deutschland Fragen der Organisation, Gestaltung, Recht, Ethik, Validierung und Verifikation. Vorläufige Ergebnisse der militärischen Arbeitsgruppe wurden 2022 mit zivilen Experten abgeglichen und werden 2023 im „Handbook of Meaningful Human Control“ veröffentlicht. Abb. 2 zeigt ein Grundmodell der kooperativen Kontrolle, das den von Boyd 1995 vorgestellten sog. Observe-Orient-Decide-Act (OODA) Zyklus weiterentwickelt, erweitert u. a. um die Kooperation zwischen natürlichen und künstlichen Agenten.

Abb. 3 zeigt, dass MHC nicht nur das lokale Waffensystem aus Kampfbesetzungen und KI / Automationen betrifft, sondern unsere Soldatinnen, Soldaten und Waffensysteme mit den betreibenden Organisationen, z. B. Bundeswehr und NATO sowie

den Gesellschaften und ihren politischen und rechtlichen Organen, verbindet. Nur wenn diese Ketten aus Fähigkeiten, Autorisierung, Vertrauen, Kontrolle und Verantwortung intakt und leistungsfähig sind, können wir von Meaningful Human Control über leistungsfähige Verteidigungssysteme sprechen.

Der nächste Schritt ist die Operationalisierung dieses generellen Modells in überprüfbare Vorgaben, mit denen sich zukünftige Waffensysteme wie FCAS und MGCS rechtssicher bzgl. MHC verifizieren und validieren lassen, ohne den durch den Ukraine-Konflikt offensichtlich gewordenen Bedarf und Aufhol-Aktivitäten zu behindern. Erste Schritte dazu zeigt Abb. 1, in dem neue Führungssysteme in einem Versuchspanzer der Bundeswehr auf Kontrollierbarkeit hin entworfen und überprüft werden.

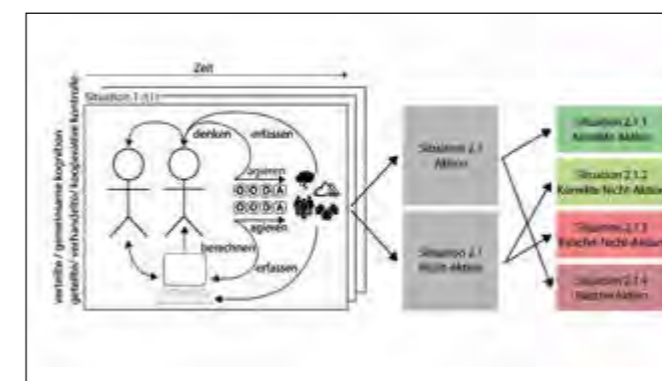


Abb. 2: Joint Signal Detection and Action Modell (Dilemma-Modell) als Grundlage für MHC

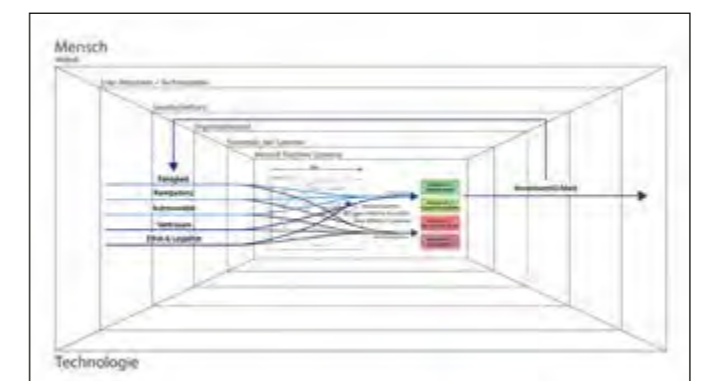


Abb. 3: Holistisches Bowtie-Modell der Meaningful Human Control

2

Wehrmedizinische und Militärpsychologische Forschung

Die Zeitenwende in der Sicherheitspolitik hat sich im Jahr 2022 auch in der wehrmedizinischen und militärpsychologischen Forschung widerspiegelt. Dies zeigt sich durch vielfältige Beiträge aus dem Medizinischen ABC-Schutz, zu den Auswirkungen intensiver Belastungen im militärischen Dienst, zur Optimierung der Notfallmedizin und langfristiger Rehabilitation nach psychischer Belastung bzw. Erkrankung.

Das Institut für Radiobiologie der Bundeswehr untersucht die langfristigen Folgen einer Kernwaffenexplosion anhand der Auswertung medizinischer Befunde nach akzidenteller Exposition von frühem Fallout beim atmosphärischen Kernwaffen-Versuch „Castle Bravo“. Das Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr stellt eine neue diagnostische Fähigkeit zum schnellen Nachweis von *Yersinia pestis* mittels Rezeptorbindenproteinen aus Bakteriophagen vor. Zugleich bleiben Alternativmethoden zum Tierversuch ein wichtiger Schwerpunkt der wehrmedizinischen Forschung, für die das Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr die Etablierung von humanen Lebersphäroiden und Untersuchungen zur Lebertoxizität beiträgt.

Das Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr befasst sich mit der Gefährdung durch Hitzestress in geschützten Fahrzeugen. Unbemannte Flugkörper spielen eine immer größere Rolle. Das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe untersucht hierzu die Psychischen Beanspruchungen und Belastungsfolgen im UAS HERON 1 in einer empirischen Studie. Das Schiffahrtmedizinische Institut der Marine stellt die Erprobung und Evaluierung circadianer Seewachsysteme vor. Das Bundeswehrkrankenhaus (BwKrhs) Hamburg untersucht die Auswirkung der körperlichen und psychischen Belastungen

während der Kampfschwimмераusbildung in einer sportmedizinischen und sportpsychologischen Untersuchung.

Mehrere BwKrhs fokussieren ihre diesjährigen Beiträge auf die Notfallmedizin: Das Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz beschreibt die Anwendung eines Quantenzählenden CT-Scanners im Schockraum-Setting zur Diagnostikoptimierung polytraumatisierter Patienten. Das BwKrhs Berlin untersucht die Patientensicherheit in der Notfallmedizin anhand einer Risikoanalyse von latentem Informationsverlust. Bei dem Bundeswehrkrankenhaus Westerstede steht bei dem Human Extremity Recovery Ordnance (H.E.R.O.)-Projekt die Rettung von Gliedmaßen im Mittelpunkt.

Das Bundeswehrkrankenhaus Ulm zeigt mit dem Forschungsverbund Süd (FvS) – Schulterchluss zwischen dem BwKrhs Ulm und der Universität der Bundeswehr München für die zukünftige universitäre Traumaforschung, welches Potenzial die Verzahnung der Medizininformatik und der Traumaver-sorgung bieten kann.

Das Psychotraumazentrum der Bundeswehr am BwKrhs Berlin befasst sich mit der Evaluation eines medizinisch-dienstlich orientierten Rehabilitationstrainings für psychische Erkrankungen mit dem Ziel Mental Fit zurück in den Dienst.

In einem weiteren Beitrag des Psychotraumazentrums wird das erstmalige Auftreten psychischer Störungen nach einem Auslandseinsatz mittels einer neuen längsschnittlichen Betrachtungsweise analysiert. Dazu werden Soldatinnen und Soldaten, die ein kritisches Ereignis erlebten, mit Kameradinnen und Kameraden desselben Einsatzes, die keinem solchem Ereignis ausgesetzt waren, verglichen.

Schneller Nachweis von *Yersinia pestis* mittels Rezeptorbindeproteinen aus Bakteriophagen

Am Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr werden Viren, die spezifisch Bakterien infizieren (Bakteriophagen), benutzt, um hochpathogene Erreger nachzuweisen. Für die schnelle mikroskopische Detektion von *Yersinia pestis*, dem Erreger der Pest, werden die Rezeptorbindeproteine dieser Phagen im Labor biotechnologisch hergestellt und als Sonden für Fluoreszenzmikroskopie eingesetzt.

Die Pest, die durch das Bakterium *Yersinia pestis* verursacht wird, ist eine hoch ansteckende Infektionskrankheit, die zwischen Nagern und ihren Flöhen übertragen wird. Durch Flohbisse kann der Erreger auch Menschen anstecken und eine Beulenpest auslösen. Gelangt der Erreger in die Blutbahn, kann dies eine Pestsepsis und durch Infektion der Lunge eine sekundäre Lungenpest zur Folge haben. Im Vergleich zu den anderen Pestformen, ist Lungenpest auch durch Tröpfcheninfektion von Mensch zu Mensch übertragbar. Bei den Betroffenen bildet sich dann eine primäre Lungenpest aus, die unbehandelt meist nach wenigen Tagen zum Tod führt.

Obwohl die Pest in Westeuropa als ausgerottet gilt, existieren weiterhin natürliche Pestherde, v. a. im Globalen Süden, wodurch ein Infektionsrisiko für Soldatinnen und Soldaten in Auslandseinsätzen sowie eine Verschleppungsgefahr des Erregers nach Europa besteht. Außerdem kann *Y. pestis* als biologischer Kampfstoff missbraucht werden. Somit stellt der Erreger nach wie vor ein Risiko für militärische Einsätze und den Gesundheitsschutz der Bevölkerung dar.

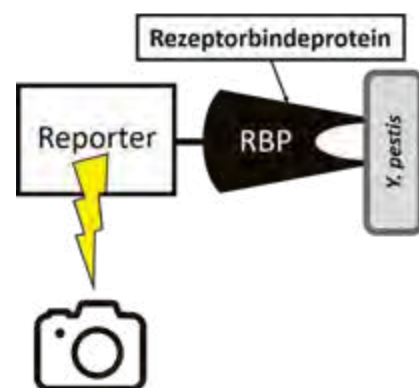


Abb. 1: Nutzung von Rezeptorbindeproteinen von Bakteriophagen zur Detektion von *Y. pestis*: Während der RBP-Teil des Fusionsproteins spezifisch an *Y. pestis*-Zellen bindet, generiert der Reporterteil ein Signal, welches von einem Detektor (z. B. Fluoreszenzmikroskop) verfolgt werden kann

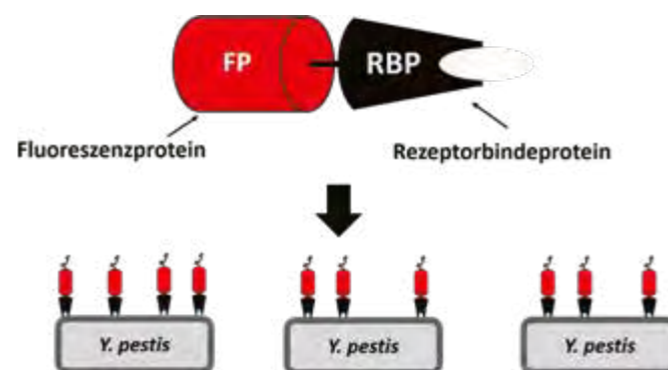


Abb. 2: Fusionsprotein aus Fluoreszenzprotein und RBP aus Bakteriophagen: Als Reporterprotein wird ein Fluoreszenzprotein verwendet, welches bei Anregung mit Licht einer bestimmten Wellenlänge bei einer anderen Wellenlänge Licht emittiert. Nach Bindung an *Y. pestis*-Zellen kann dieses Signal von einem Fluoreszenzmikroskop aufgenommen werden

Dem fulminanten Krankheitsverlauf der Pest kann nur durch eine sofortige Antibiotika-Therapie entgegengewirkt werden. Dafür ist ein schneller und eindeutiger Erregernachweis nötig. Als Standardverfahren gelten die Polymerase-Kettenreaktion (PCR), der Nachweis des F1-Kapselantigens (meist durch Schnelltests), sowie eine Kultur-basierte Erreger-Identifizierung. Alternativ können diagnostische Bakteriophagen (kurz: Phagen), also Viren die Bakterien infizieren, für die Identifizierung von *Y. pestis* eingesetzt werden. Diese klassischen Phagen-Tests sind zwar hochspezifisch, die Ergebnisse können aber meist erst nach Tagen ausgewertet werden, da sie eine Reinkultur des Erregers voraussetzen und daher v. a. für eine akute Lungenpest-Diagnostik zu lange dauern.

Wir haben daher Nachweistests entwickelt, die sich die hohe Spezifität der diagnostischen Phagen zunutze machen und innerhalb Minuten zum Ergebnis führen. Hierzu wurden die Rezeptorbindeproteine (RBPs) dieser Phagen verwendet, die für die Erkennung und Bindung an den bakteriellen Wirt (*Y. pestis*) verantwortlich sind.

Die Proteine werden biotechnologisch, als Fusion mit einem Reporterprotein produziert und gereinigt. Die Proteinfusionen (RBP + Reporter) können dann für die Detektion von *Y. pestis* und somit für die Pest-Diagnostik eingesetzt werden: Der RBP-Teil der Fusion bindet spezifisch an die *Y. pestis*-Zellen und der Reporter-Teil generiert ein quantifizierbares Signal (Abb. 1).

Je nach Kombination von Reporterprotein und RBP sind verschiedene Einsatzmöglichkeiten denkbar, z. B. kann ein Fluoreszenzprotein als Reporter eingesetzt werden (Abb. 2). Hier kann die Bindung der RBPs an Zellen von *Y. pestis* durch

Fluoreszenzmikroskopie überprüft werden. Die spezifische Bindung der RBP-Reporter-Fusionen an den Zellen führt zur Fluoreszenzmarkierung (Abb. 3), wenn in der Probe *Y. pestis*-Zellen enthalten sind, falls nicht, wird das Protein herausgewaschen. In Abb. 4 ist ein Test einer Probe mit *Y. pestis*-Zellen gezeigt. In der Durchlichtmikroskopie (linke Abb.) sind Bakterienzellen zu sehen, die aber allein aufgrund ihrer Form noch nicht auf *Y. pestis* schließen lassen. Wird das Fluoreszenzsignal der Probe aufgenommen, erkennt man gut die rote Markierung der RBP-Fluoreszenzprotein-Fusionen (rechte Abb.). Somit handelt es sich bei den in der Probe enthaltenen Bakterien um *Y. pestis*.

Der neu entwickelte Test ist hochspezifisch und kann in kurzer Zeit durchgeführt werden. Ergebnisse können schon nach 10 min erzielt werden. Die Methode kann zur schnellen, bestätigenden Identifizierung von *Y. pestis* genutzt werden, um so früh wie möglich eine gezielte Antibiotika-Therapie einleiten zu können und die Überlebenschancen von Infizierten bei einem natürlichen Ausbruch oder nach einer gezielten Erreger-Freisetzung zu verbessern.

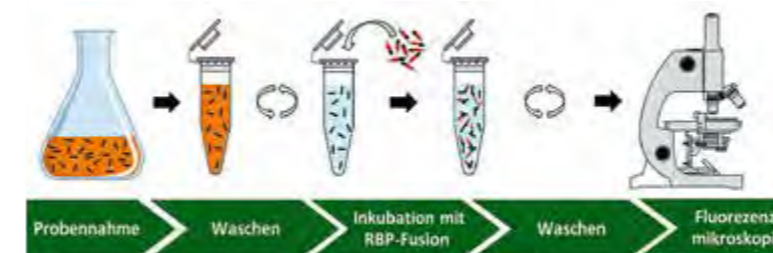


Abb. 3: Schematischer Ablauf des RBP-Reporter basierten Nachweisverfahrens zur Untersuchung von Proben auf das Vorhandensein von *Y. pestis*-Zellen mit Hilfe von RBP-Fluoreszenzprotein-Fusionen und Fluoreszenzmikroskopie

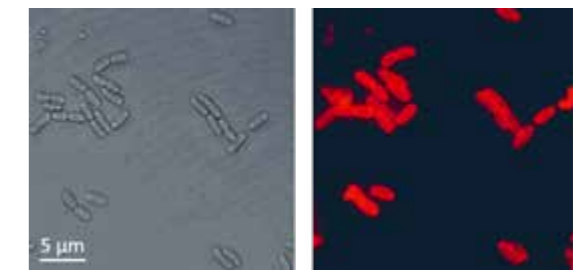


Abb. 4: Exemplarisches Ergebnis des RBP-Reporter basierten Fluoreszenzmikroskopie-Nachweisverfahrens: Einer Probe, mit *Y. pestis*-Zellen wurde der RBP-Reporter zugegeben und mikroskopisch analysiert. Die linke Abbildung zeigt Bakterienzellen in einer Durchlichtaufnahme. Die rechte Abbildung zeigt den selben Bildausschnitt der Probe unter Fluoreszenzlicht

Oberstabsarzt Dr. Dr. Gabriele Horn
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

Oberfeldarzt Prof. Dr. Timo Wille
Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr
München

InstitutfuerPharmakologieundToxikologie@bundeswehr.org

Alternativmethoden zum Tierversuch: Etablierung von humanen Lebersphäroiden und Untersuchungen zur Lebertoxizität

Zur Reduktion von Tierversuchen in der Forschung werden humane in-vitro Modelle benötigt. Am Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr wurden Lebersphäroide etabliert und die postulierte leberschädigende Wirkung von Oximen untersucht, die als Antidote bei Vergiftungen mit phosphororganischen Verbindungen dienen. Bei therapeutischen Konzentrationen waren Oxime nicht lebertoxisch.

Die Leber hat eine große Bedeutung bei Stoffwechselfvorgängen und ist Manifestationsort von arzneimittelbedingten Nebenwirkungen. In der modernen Arzneimittelforschung werden zunehmend tierfreie Forschungs- und Testmethoden etabliert, um eine bessere Übertragbarkeit der Studienergebnisse auf den Menschen zu erreichen und Tierversuche zu reduzieren.

Menschliche Zellen oder Gewebe können mittels in-vitro-Verfahren außerhalb des Organismus kultiviert werden. Anhand von dreidimensionalen Geweben, die aus mehreren Zelltypen hergestellt werden, können die Auswirkungen von Substanzen oder Medikamenten auf einzelne Organe simuliert und eine toxikologische Risikobewertung durchgeführt werden.

Die Therapie mit dem Reaktivator Obidoxim (Toxogonin®) bei Vergiftungen mit phosphororganischen Pestiziden ist durch Berichte, bei denen Leberschädigungen mitgeteilt wurden, diskreditiert worden. Am Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr wurde die leberschädigende

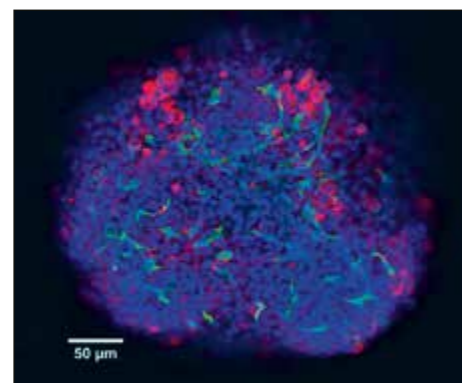


Abb. 1: Immunhistochemische Studie von Lebersphäroiden: Overlay-Bild von Zytokeratin 8/18 in HepaRG-Zellen (rot), Vimentin in hepatischen Sternzellen (grün) und 4',6-Diamidino-2-phenylindol zur Färbung der Zellkerne (DAPI, blau). Maßstab, 50 µm

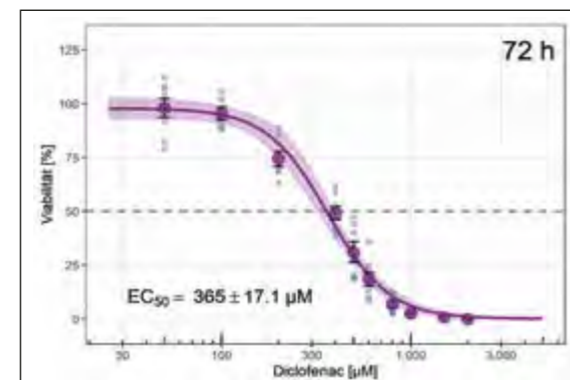


Abb. 2: Stoffwechselaktivität nach Diclofenac-Exposition für 72 h. Die Viabilität wurde auf die jeweiligen Lösemittelkontrollen normiert. Die Daten sind als Mittelwerte \pm SEM (farbige Punkte mit schwarzen Fehlerbalken), einzelne Datenpunkte (blaue Quadrate) und 99 % Konfidenzintervall (farbiges Band) dargestellt

Wirkung des Obidoxims und drei weiterer Oxime (Pralidoxim, MMB-4, HI-6) untersucht. Dafür wurden dreidimensionale Lebersphäroide aus einer humanen, hepatischen Zelllinie (HepaRG) und humanen, primären, hepatischen Sternzellen hergestellt (s. Abb. 1).

Methoden zur Lagerung der Lebersphäroide wurden soweit optimiert, bis die Lagerfähigkeit der Lebersphäroide bis auf 72 Stunden verlängert werden konnte. Anschließend wurde die arzneimittelinduzierte Hepatotoxizität anhand einer bekannten lebertoxischen Substanz (Diclofenac) und Oximen untersucht. Nach Exposition gegenüber Diclofenac kam es zu einem Abfall der Viabilität sowie zur erhöhten Freisetzung der Leberschädigungsparameter AST und ALT (s. Abb. 2 und 3). Die Untersuchungen haben ergeben, dass bei fachgerechter Anwendung von Obidoxim bei Vergiftungen mit phosphororganischen Verbindungen nicht mit einer Leberschädigung zu rechnen ist.

Momentan werden am Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr weitere Organmodelle etabliert. Auf sogenannten Multiorganchips können Gewebe aus verschiedenen Organen in Kompartimenten kultiviert werden, die durch mikrofluidische Kanäle miteinander verbunden sind (s. Abb. 4). Die mikrofluidische Zirkulation wird durch



Abb. 3: AST-Freisetzung aus Lebersphäroiden nach Exposition gegenüber Diclofenac für 72 h. AST-Freisetzung [pg/mL] nach Exposition gegenüber Lösemittelkontrolle, 500 µM, 1.000 µM oder 2.000 µM Diclofenac. Die Daten sind als Boxplots dargestellt. Einzelne Datenpunkte sind als schwarze Dreiecke gezeigt. Signifikanz im Vergleich zur Lösemittelkontrolle: **: $p < 0,01$ vs. Kontrolle

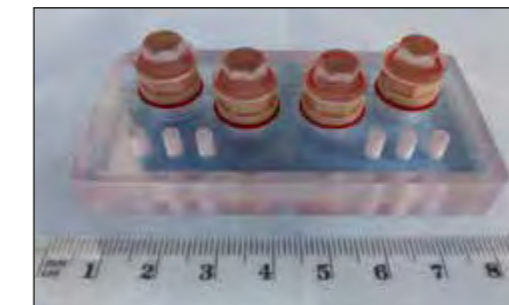


Abb. 4: Multi-Organchip zur gemeinsamen Kultivierung von zwei unterschiedlichen Organmodellen



Abb. 5: Kontroll- und Steuereinheit für Multi-Organ-Chips

eine Mikropumpe gewährleistet und versorgt die Organoiden mit Nährlösung. Die Multi-Organ-Chips bieten einen innovativen Ansatz zur Studie der Wirksamkeit oder Toxizität von Arzneimitteln in einem komplexen, physiologischen Kontext (s. Abb. 4 und 5).

Dr. Maria Richter
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedA@bundeswehr.org

OStFw Stefan Freitag
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedA@bundeswehr.org

Gefährdung durch Hitzestress in geschützten Fahrzeugen: Herausforderungen und Lösungswege

Hitzestress ist eine erhebliche Gefährdung für die Gesundheit und Leistung von Soldatinnen und Soldaten. Auch in geschützten bzw. gepanzerten Fahrzeugen kann es trotz des Einsatzes von Klimaanlage zu kritischen Hitzebelastungen kommen. Derzeit werden für diese komplexe, einsatzrelevante Problematik verschiedene, sich ergänzende Lösungen entwickelt.

Erfahrungsberichte von Soldatinnen und Soldaten weisen darauf hin, dass es nicht nur in heißen Einsatzgebieten, sondern auch unter mitteleuropäischen Witterungsbedingungen in geschützten bzw. gepanzerten Fahrzeugen trotz Klimaanlage zu hohen Hitzebelastungen kommen kann. Diese wird durch die hohe Wärmeisolation militärischer Bekleidung sowie der modularen ballistischen Schutz- und Trageausrüstung sogar noch erheblich gesteigert. Derartige Arbeitsbedingungen können in der einsatznahen Ausbildung bzw. im Einsatz zu gesundheitsgefährdendem Hitzestress mit kritischen physischen und mentalen Leistungsminderungen führen.

Obwohl die einsatzrelevante Problematik nicht neu ist, gibt es kaum publizierte Erkenntnisse über das Ausmaß von Hitzebelastungen in militärischen Fahrzeugen.

Um für die komplexe Problematik evidenzbasierte Lösungswege entwickeln zu können, mussten in einem ersten Schritt mit technischen Arbeitsplatzanalysen Basisdaten ermittelt werden: Hierfür wurden in Kooperation mit der Wehrtechnischen Dienststelle 41 (WTD 41) verschiedene geschützte Fahrzeuge in



Abb. 1: Untersuchung des EAGLE V in der Klimakammer der WTD 41



Abb. 2: Im Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr entwickelte Dummies für die Simulation der Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe der Fahrzeugbesatzungen mit der Messtechnik für die Erfassung der WBGT-Werte

Dr. Karl Jochen Glitz
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedA@bundeswehr.org

einer Klimakammer einem Wüsten- sowie Tropenklima ausgesetzt und das resultierende Innenraumklima gemessen.

Der hierzu bislang genutzte Prüfaufbau wurde vorab überarbeitet, insbesondere um die für die physiologische Bewertung wichtigen Wärme- und Feuchtigkeitseinträge der Besatzung bzw. der elektrischen Geräte im jeweiligen Fahrzeug realitätsnäher abzubilden. Das Institut entwickelte zu diesem Zweck Dummies, die die Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe von Menschen während der Klimakammeruntersuchungen simulieren. Für die Bewertung der Klimawirkung auf den Menschen sind neben der Lufttemperatur u.a. auch relative Luftfeuchte und Wärmestrahlung wesentliche Kenngrößen. Diese Faktoren werden in Klimatestsummenmaßen, wie dem Wet-Bulb-Globe-Temperature-Index (WBGT) zusammengefasst, anhand derer man die Auswirkungen der Klimabelastung besser beurteilen kann.

In den Messungen mit dem überarbeiteten Prüfaufbau wurden WBGT-Werte bis zu 37° C ermittelt. Eine gesundheitliche Gefährdung durch Hitzestress sowie physische und mentale Leistungsminderungen können indessen bereits bei einem WBGT von 30° C eintreten.

Die Ergebnisse belegen die mögliche hohe Hitzestressbelastung der Besatzungen und zeigen die Notwendigkeit präventiver



Abb. 3: Probandin mit der exakt an die SK4-Weste angepassten Körperkühlweste. Die Kühlweste wurde gemeinsam mit dem WIWeB entwickelt und konfektioniert

Oberfeldarzt PD Dr. Manuela Andrea Hoffmann
Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr
Abteilung A: Gesundheits- und Leistungsförderung
Andernach

InstPraevMedA@bundeswehr.org

Gegenmaßnahmen. Das Institut verfolgt zur Reduzierung der Hitzebelastung in Fahrzeugen mehrere Lösungswege:

1. Testung schnell verfügbarer technischer Sofortmaßnahmen (z. B. Barracuda-Netz, getönte Scheiben) mit dem optimierten Standardprüfverfahren, in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Ausrüstung, Information und Nutzung der Bundeswehr und der WTD 41.
2. Das Institut überprüft derzeit das Potential eines Strategiewechsels: Weg von der alleinigen Kühlung der Fahrzeuge, hin zur ergänzenden, direkten Kühlung des Menschen. Derzeit wird die Effektivität einer luftdurchströmten Kühlweste bei simulierten Patrouillenfahrten im Wüsten- und Tropenklima an Probandinnen und Probanden getestet. Diese wird unter der ballistischen Schutzweste getragen und während der Fahrtsimulation von trockener, temperierter Luft durchströmt, um so die Schweißverdunstung als effektivsten Weg der Entwärmung zu fördern. Das Prinzip basiert auf einem im Institut entwickelten und patentierten Verfahren zur Körperkühlung in Ganzkörperschutzanzügen.

Die Beispiele zeigen, dass die Verbesserung der komplexen Problematik nur interdisziplinär und dienststellenübergreifend und mit innovativen Ansätzen zu bewältigen sein wird.



Abb. 4: Probandin während der Klimakammeruntersuchung zur Untersuchung der Effektivität der Körperkühlweste

Flottillenarzt PD Dr. med. Alexis Rump
 Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
 München

Oberstabsapotheker Cornelius Hermann
 Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
 München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

Auswertung medizinischer Befunde nach akzidenteller Exposition von frühem Fallout beim atmosphärischen Kernwaffen-Versuch „Castle Bravo“

Die Auswertung medizinischer Daten von Opfern, die nach dem Atomwaffentest mit dem Codenamen „Castle Bravo“ frühem Fallout ausgesetzt waren, belegt, dass die größte Gefahr von der externen Bestrahlung ausgeht. Nur im Fall der Schilddrüse ist die aufgenommene Strahlendosis hauptsächlich durch die Inkorporation von Radiojod bedingt, wobei die Aufnahme zum größten Teil durch Ingestion erfolgt.

Die Bombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki waren Luftdetonationen mit zahlreichen Opfern durch sofortige Wirkkomponenten (Explosion, Verbrennungen, ionisierende Initialstrahlung). Es wurde aber wenig Fallout erzeugt. Der Atomwaffentest mit dem Codenamen Castle Bravo auf den Marshallinseln (1. März 1954, 15 Mt) verursachte keine sofortigen Todesopfer, erzeugte aber große Mengen an Fallout, die innerhalb weniger Stunden zu einer Exposition der Bewohner nahe gelegener Atolle und der Besatzung eines japanischen Fischerbootes (Lucky Dragon) führten (Abb. 1). Dieser Unfall erlaubt, die Gesundheitsauswirkungen zu untersuchen, die sich allein aus einer frühen Fallout-Exposition ergeben.

Für die Bewohner des Rongelap-Atolls wurde die externe Strahlendosis mit 1,6 Gy ermittelt (Symptomschwelle 1 Gy). Basierend auf hämatologischen Daten (Abb. 2) und dem METREPOL-System (METREPOL: Medical Treatment Protocols for Radiation Accident Victims) kann das akute Strahlensyndrom als mild eingestuft werden (H1 auf einer Skala von H0 bis H4). Bluttransfusionen oder Antibiotika waren nicht erforderlich. Nur die von der Schilddrüse aufgenommene

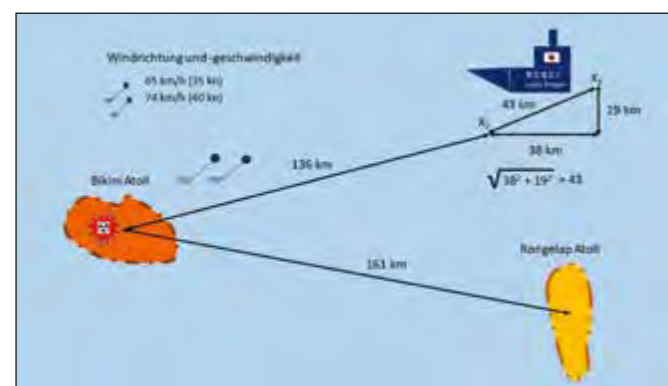


Abb. 1: Karte mit Darstellung des Bikini-Atolls (Detonation des nuklearen Sprengkopfes), des nahe gelegenen Rongelap-Atolls und der möglichen Positionen des japanischen Fischerbootes Lucky Dragon (X1 oder X2; für das Schiff wurden zum Zeitpunkt der Detonation unterschiedliche Breiten- und Längengrade angegeben). Die Windrichtung (angezeigt durch Fahnenmast und Punkt) von Südwest nach Nordost und seine Geschwindigkeit (angegeben durch die Fahne mit Strichen; ein voller Strich: 10 Knoten) wurden für eine Höhe von 10 bis 12 km mit den meteorologischen Standardsymbolen angegeben

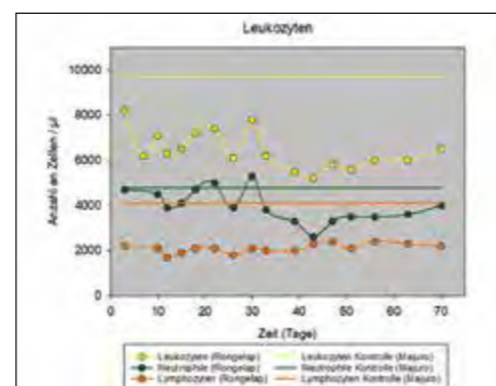


Abb. 2: Mittlere Zellzahlen der gesamten weißen Blutkörperchen (Leukozyten), der Neutrophilen und der Lymphozyten im peripheren Blut über die Zeit bei den Bewohnern des Rongelap-Atolls. Die ersten Blutproben wurden nach der Evakuierung drei Tage nach Beginn der Fallout-Exposition untersucht. (Quelle: Cronkite et al., 1954; Abbildung angepasst von Rump et al., im Druck)

Oberstabsarzt Dr. med. Andreas Lamkowski
 Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
 München

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

Dosis resultierte hauptsächlich aus der Radiojod-Inkorporation mit geschätzt 7,6 Gy (Abb. 3). Die Spätfolgen waren Schilddrüsendysfunktionen, einschließlich Hypothyreosen, Knoten und bösartige Tumore.

Das Institut für Strahlenbiologie der Bundeswehr ist im Besitz einer Datenbank mit detaillierten Informationen zu den 23 exponierten japanischen Fischern. Sie waren dem Fallout zeitlich früher ausgesetzt als die Rongelap-Opfer und wurden mit höheren Dosen bestrahlt (2,9 Gy). Die Differentialblutbilder zeigen niedrigere Zellzahlen und das akute Strahlensyndrom war mittelgradig schwer (H2). Bemerkenswert ist die große interindividuelle Variabilität, mit Schweregraden von „keine Veränderungen“ (H0) bis zum schweren Verlauf (H3) (Abb. 4).

Die Opfer wurden mit Bluttransfusionen und Antibiotika behandelt. Einige von ihnen entwickelten Leberfunktionsstörungen mit Gelbsucht. In den 1990er Jahren wurde bei Vielen eine Hepatitis C diagnostiziert sowie eine hohe Mortalität durch hepatozelluläre Karzinome beobachtet. Schilddrüsenfunktionsstörungen wurden nicht gemeldet, möglicherweise weil die an Bord gelagerten Nahrungsmittel nicht radioaktiv kontaminiert waren und / oder weil die iodreiche Ernährung in Japan einen natürlichen, wenn auch unzureichenden Schutz gegen die Konzentration von Radioiod in der Drüse bietet.

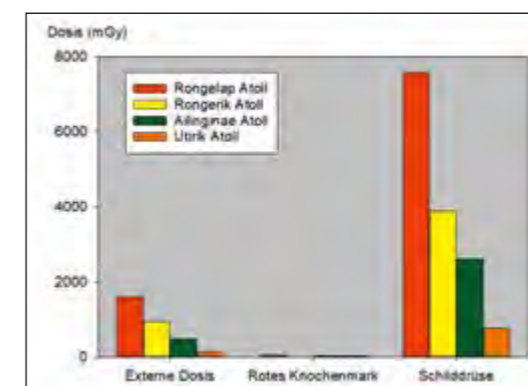


Abb. 3: Radiologische Dosis durch externe Bestrahlung und interne Dosen durch Radionuklid-Inkorporation, die vom roten Knochenmark und der Schilddrüse von Opfern auf verschiedenen Atollen der nördlichen Marshallinseln absorbiert wurden. Das Rongelap-Atoll ist dem Bikini-Atoll (Ort der Kernwaffen-Detonation) am nächsten und das Utrik-Atoll ist am weitesten entfernt (Quelle: Simon et al., 2010; Abbildung angepasst von Rump et al., im Druck)

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

InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org

Ein Besatzungsmitglied starb nach sechs Monaten mit Symptomen eines subakuten Leberversagens. Die Autopsie ergab eine Lungenentzündung und eine Leberatrophie mit entzündlicher Zellinfiltration. Eine Analyse zeigte, dass nur die Knochen mit Spaltprodukten kontaminiert waren. Obwohl die Todesursache nicht vollständig geklärt ist, stimmen die Befunde mit einer Transfusionshepatitis und Leberversagen überein und sprechen gegen eine Strahlenhepatopathie.

Der Castle Bravo Unfall bestätigt, dass früher Fallout nach einer Kernwaffendetonation, im Unterschied zu globalem Fallout, aus größeren Partikeln besteht und reich an kurzlebigen Radionukliden ist, die mit einer sehr hohen Anfangsaktivität verbunden sind, die aber auch schnell abnimmt. Die Hauptgefahr ist die externe Bestrahlung und das rasche Aufsuchen von Schutzräumen ist die wichtigste Schutzmaßnahme. Nur bei der Schilddrüse überwiegt die Bestrahlung von Innen. Die Vermeidung von kontaminierten Lebensmitteln und Wasser ist der beste Schutz. Die Schilddrüsenblockade kann eine Zusatzmaßnahme sein, ist aber definitiv zweitrangig.

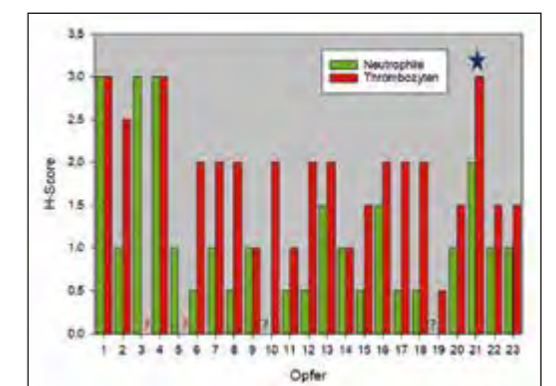


Abb. 4: Schweregrad des akuten Strahlensyndroms, ausgedrückt als H-Score des METREPOL-Klassifikationssystems, basierend auf Neutrophilen- oder Thrombozytenzahlen im peripheren Blut der 23 Besatzungsmitglieder des japanischen Fischerbootes Lucky Dragon. H0: keine Auswirkungen; H1: mild; H2: mäßig schwer; H3: schwer; H4: schwerwiegend/tödlich. Im Zweifelsfall zwischen zwei Stufen wurde der Mittelwert angegeben (zwischen H1 und H2, Score 1,5). ? : Hämatologische Daten ließen keine Einstufung zu. Blauer Stern auf Opfer Nr. 21: Klassifizierung des Fischers, der im September 1954 verstarb. (Quelle: SEARCH-Datenbank)

Oberfeldarzt Dr. Franziska Langner
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Berlin

Oberstarzt Dr. Gerd Willmund
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Berlin

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

Mental fit zurück in den Dienst – Evaluation eines medizinisch-dienstlich orientierten Rehabilitationstrainings für psychische Erkrankungen

Das Psychotraumazentrum der Bundeswehr evaluiert ein niedrigschwelliges Rehabilitationstraining. Erste Erkenntnisse führten zur Anpassung der Methodik als auch der programmatischen Inhalte. Schon jetzt stellt sich das medizinisch-dienstlich orientierte Rehabilitationstraining (MDOR) als ein effektives und zeitökonomisches Rehabilitationsmodul für psychisch Erkrankte mit fehlender bzw. reduzierter Dienstfähigkeit dar.

Bei psychisch Erkrankten kann bei langwierigen Behandlungsverläufen die fehlende Wiederaufnahme des Dienstes den Gesundungsprozess beeinflussen. Lange Zeiten der Arbeitsunfähigkeit führen zu einer deutlich reduzierten Lebensqualität, zu einer Minderung der sozialen Unterstützung und auch zu einer Persistenz der psychischen Symptomatik. Längere Arbeitsunfähigkeit stellt ein Hindernis in der weiteren Betreuung für die medizinischen und psycho-sozialen Dienstleistenden dar.

Chronifizierte psychische Erkrankungen begründen über 83 % der eingeleiteten Dienstunfähigkeitsverfahren und die Mehrheit der eingeleiteten einsatzassoziierten Wehrdienstbeschädigungsverfahren.

Das 23-tägige Rehabilitationstraining (Abb.1) für psychisch erkranktes militärisches Personal beinhaltet drei Kernmaßnahmen wie berufsbezogene psycho-educative Gruppen (13 Sitzungen von jeweils 120 min Dauer), Belastungserprobungen mit Arbeitstraining (8 Sitzungen plus Projekttag, sportpsychologisch entwickelte und begleitete Bewegungstherapie mit 10 Einheiten usw.) sowie zusätzliche Maßnahmen



Abb. 1: Schematische Darstellung der Rehabilitationsmodule



Abb. 2: Neben Sport; Ergo- und Arbeitstherapie, Gruppen- und Einzelgesprächen erfolgen naturbezogene Aktivitäten zur Förderung des psychischen und physischen Wohlbefindens

OTL d. Res. Anna-Katharina Börke, M.Sc.
Bundesministerium der Verteidigung
Berlin

Oberstarzt Prof. Dr. Peter Zimmermann
Zentrum für Psychotraumatologie und
Posttraumatische Belastungsstörungen
Berlin

BMVgBeauftrPTBS@bmvg.bund.de

BwKrhsBerlinPsychotraumazentrum@bundeswehr.org

wie Sozialberatungen, Einzelgespräche als auch ein gemeinsames Abschlussprojekt (Abb. 3).

Wiedereingliederung, Verbesserung der Tagesstruktur, Steigerung der Dienstzufriedenheit und des eigenen Selbstwertes.

Die Evaluation erfolgte mittels semi-strukturierter Rückmeldungen der Teilnehmenden und quantitativen Angaben zur Dienstfähigkeit (wöchentliche Dienstzeit, Krankschreibungstage) sowie eingesetzter psychometrischer Verfahren. Die erste und zweite Datenerhebung erfolgte zu Beginn (t0) und Ende des Gruppentrainings (t1). Nach 3 (t2) bzw. 6 Monaten (t3) nach Intervention wurden Verlaufsdaten erhoben.

Aus den Erfahrungen der Pilotstudie wurde ein entsprechendes Forschungsprogramm mit drei wesentlichen Schwerpunkten entwickelt. Aktuell wird das modifizierte Rehabilitationstraining in einer kontrollierten Hauptstudie standardisiert evaluiert. In einem weiteren Vorhaben wird die Adaption der Maßnahme zu einem regional durchführbaren Basismodul für die regionalen Sanitätseinrichtungen des Sanitätsdienstes der Bundeswehr vorgesehen. Daneben werden bereits jetzt mittels qualitativer Interviews und Fokusgruppen Daten zum Bedarf von Versorgten und Versorgenden im Rahmen der Interdisziplinären Patientenzentrierten Rehabilitations-Teams (IPR) erhoben, um zukünftige Rehabilitationsmaßnahmen noch anwendungsnäher und zielgruppengerechter auszurichten.

Die durchschnittliche Anzahl der Krankentage (krank zu Hause (KzH)) sank von 30,1 (vor Training) auf 11,8 Tage (katamnestisch). Die Krankentage verringerten sich somit signifikant von t0 zu t2 (Z: - 2,511, p = .012). Die durchschnittliche wöchentliche Dienstzeit stieg von 15,6 Stunden vor (t0) auf 21,3 Stunden drei Monate nach dem Training (t2). Die Dienstdauer erhöhte sich somit signifikant von t0 zu t2 (Z= - 2,805, p = .005). Es zeigten sich dabei Hinweise, dass das berufliche Rehabilitationstraining in der Bundeswehr eine sinnvolle Ergänzung eines Gesamtbehandlungsplans ist.

Neben einer Zunahme der täglichen Dienstzeit und Reduktion von Krankheitstagen zeigten sich positive Trends mit Steigerung von Zuversicht im Hinblick auf das Gelingen der dienstlichen



Abb. 3: Nahezu tägliches sportliches Training dient auch der Förderung der individuellen Grundfertigkeiten (IGF) der Teilnehmenden. Die hier gezeigte „Battle Rope“-Übung fördert Kraft, Ausdauer und Koordination

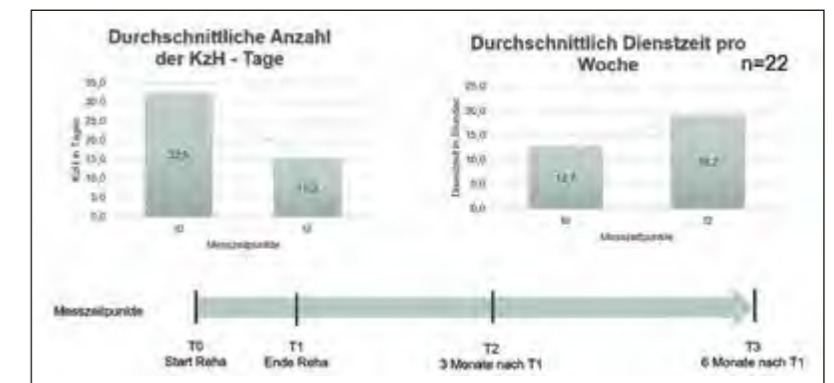


Abb. 4: Erste Ergebnisse der Evaluation wiesen deutliche Effekte auf Dienstzeit und Dienstfähigkeit nach

Oliver Daum
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe
Manching

OLT z.S. Rebecca Haase
Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe
Manching

ZentrLuRMedLWI3aErgonomieu.Erprobung@bundeswehr.org

ZentrLuRMedLWI3aErgonomieu.Erprobung@bundeswehr.org

Psychische Beanspruchungen und Belastungsfolgen im UAS HERON 1 – Eine empirische Studie

Die Fähigkeit zur abbildenden Aufklärung ist eine zentrale Voraussetzung, um Informationen zu gewinnen und ein Lagebild zu erstellen. Unter militärpsychologischen Gesichtspunkten sind nicht nur die Arbeitssituation des dafür eingesetzten Personals, sondern vor allem mögliche resultierende psychische Beanspruchungen relevant, um Belastungsfolgen zu erkennen, zu minimieren und entsprechend zu behandeln.

Im Zuge der Definitionsstudie EU MALE RPAS (Eurodrohne) wurde eine Analyse des Arbeitsplatzes der Bediener HERON 1 – Pilot und Operateur – durchgeführt, um Erkenntnisse für die Gestaltung der zukünftigen Bodenkontrollstation Eurodrohne aus Sicht der Arbeitsplatzinhaber und -inhaberinnen zu gewinnen. In diesem Zusammenhang wurde deutlich, dass auch eine Bewertung der psychischen Beanspruchungen und Belastungsfolgen der Bediener und Bedienerinnen als auch der Luftbildauswerter und -auswerterinnen notwendig sein wird. Der durch den Beauftragten PTBS des Bundesministeriums für Verteidigung angezeigte Bedarf wurde gemäß einer Weisung des Generalarztes der Luftwaffe in der vorliegenden Studie umgesetzt (Abb. 1).

Insgesamt haben 131 Probanden an der Untersuchung teilgenommen, was einer Rücklaufquote von 41 Prozent entspricht. Es konnten 125 vollständige Datensätze für die Auswertung verwendet werden. Die Stichprobe enthielt 92,4 Prozent männliche und 7,6 Prozent weibliche Probanden. Davon waren 24,4 Prozent Piloten und Pilotinnen, 26,0 Prozent Tactical Operator und 48,1 Prozent Luftbildauswerter und -auswerterinnen (Abb. 2).

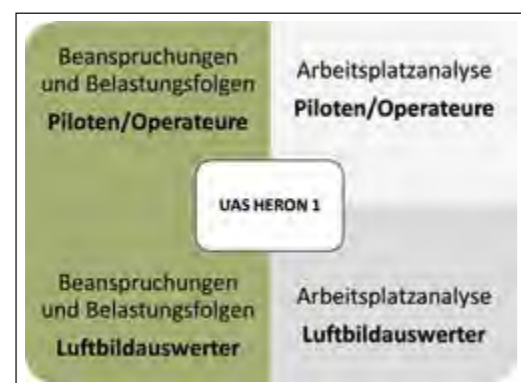


Abb. 1: Untersuchung UAS HERON 1

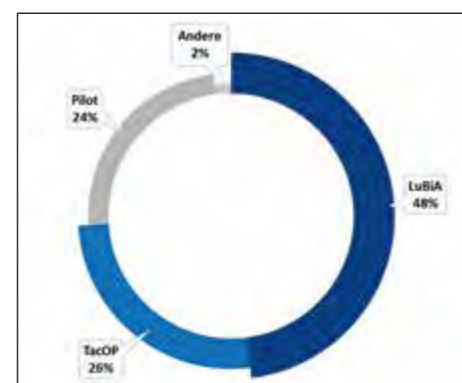


Abb. 2: Stichprobenanteile UAS HERON 1

Die Befragung erfolgte als empirische Querschnittstudie, die in einem Onlineformat auf den Dienstrechnern der Probanden bearbeitet werden konnte. Dazu wurden mittels etablierter und validierter Fragebogenverfahren aus den Bereichen des somatoformen Syndroms, der psychosozialen Belastung, der Depression, der Angst-/Panikstörung, des Substanzmissbrauchs (hier Alkohol), der Posttraumatischen Belastungsstörung und der Anpassungsstörung Daten erhoben, die anschließend sowohl quantitativ (geschlossene Formate) als auch qualitativ (Inhaltsanalyse der offenen Frageformate) ausgewertet wurden. Die Studie stellt somit ein Screening dar, da sie den zum Zeitpunkt der Befragung aktuellen Stand erfasst und nicht zur Diagnose einzelner psychologischer Konstrukte dient.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die untersuchte Stichprobe insgesamt ein signifikant höheres Belastungsniveau aufweist als der Durchschnitt der deutschen Bevölkerung, wobei die Gruppe der Luftbildauswerter und -auswerterinnen durch die höchsten Werte gekennzeichnet ist. Während die Gruppe der Piloten und Pilotinnen mehrheitlich von psychosozialen Belastungen betroffen ist (Abb. 3), zeigt sich dies zwar auch bei den Operateuren und Operateurinnen, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß. Dagegen ist der Anteil derer, die ein erhöhtes Risiko eines Substanzmissbrauchs aufzeigen, höher (Abb. 4). Bei den Luftbildauswertern und -auswerterinnen sind dagegen neben einem großen Anteil psychosozialer Belastungen auch somatische Belastungen und Depression deutlich stärker vertreten (Abb. 5). Auf einen korrelativen Zusammenhang dieser Belastungen des im UAS HERON 1 eingesetzten Personals mit der Tätigkeit im jeweiligen Bereich als Pilot, Operateur oder Luftbildauswerter kann die vorliegende Studie keine Aussagen treffen, wenn auch die Freitextanalysen einige



Abb. 3: Belastungsprofil Piloten und Pilotinnen UAS HERON 1

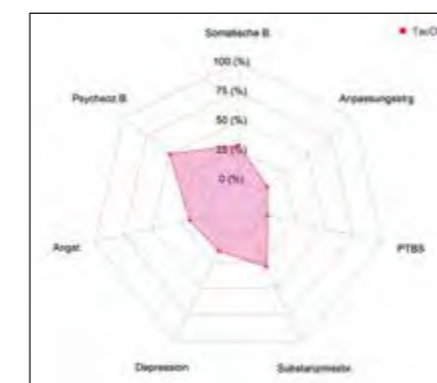


Abb. 4: Belastungsprofil Operateure und Operateurinnen UAS HERON 1

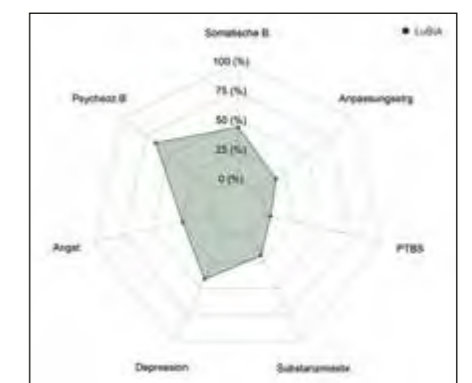


Abb. 5: Belastungsprofil Luftbildauswerter und -auswerterinnen UAS HERON 1

Tendenzen der Belastungsfaktoren erkennen lassen. So zeigen sich psychosoziale und soziefamiliäre Faktoren, wie z. B. Trennungen, gesundheitliche Erkrankungen, Konflikte im familiären und Arbeitsumfeld oder finanzielle Probleme, als Ursachen. Im dienstlichen Umfeld sind dies im wesentlichen Unzufriedenheit mit dem Arbeitsplatz und der aktuellen Tätigkeit (27,9%), oder Probleme mit der Bewältigung von Einsatzereignissen (19,9%). Zur Einordnung dieser Ergebnisse in den Kontext allgemeiner soldatischer Belastungen in der Bundeswehr fehlt es derzeit an einer hinreichend umfangreichen Vergleichsstichprobe.

Insgesamt liefert die Studie einen wesentlichen Beitrag in der Bewertung der psychischen Beanspruchung und der Belastungsfolgen im UAS HERON 1 und bietet damit Angriffspunkte für Prävention und allgemeine Maßnahmen. Weiterhin lassen sich Erkenntnisse für ein zukünftiges Betreuungskonzept des im Nachfolgesystem Eurodrohne eingesetzten Personals als originäre Maßnahme in der Phase der Gestaltung der Arbeitsplatzumgebung ableiten und umsetzen.

Melanie Giesche
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

Dr. Stefan Röttger
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine
Kronshagen

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

SchiffMedInstM@bundeswehr.org

Erprobung und Evaluierung circadianer Seewachsysteme für die Deutsche Marine

Das Schiffahrtsmedizinische Institut der Marine in Kronshagen möchte zukünftig als direkt verfügbare Kompetenzstelle für Wachplanberatung und Fatigue Management fungieren. Hierzu gibt es seit 2021 intensive Forschungsbemühungen, die zeigen sollen, wie sich optimierte, an den circadianen Rhythmus angepasste Wachsysteme auf Regeneration und Leistungsfähigkeit der Besatzungen auswirken.

Die derzeit in der Deutschen Marine eingesetzten Wachsysteme entsprechen teilweise nicht dem aktuellen Kenntnisstand über die circadiane Rhythmik des Menschen und aktuellen Leitlinien zur Gestaltung von Wachsystemen. In Versuchen der Deutschen Marine sollen daher traditionelle und gemäß den Leitlinien circadianer Wachplanung optimierte Wachsysteme mit zwei, drei und vier Wachen erprobt und in ihren Auswirkungen auf Befinden, Schlaf und Leistungsfähigkeit der Besatzungen verglichen werden. Bei Zweiwachsystemen steht die Frage im Vordergrund, ob auch mit Wach- und Ruhephasen kürzer als acht Stunden eine Verbesserung von Befinden und Leistungsfähigkeit erzielt werden kann. Bei Dreiwachsystemen sollen Vor- und Nachteile rotierender und konstanter Wach- und Ruhezeiten verglichen werden.

Um die motorische Aktivität und somit Wach- und Schlafphasen der Teilnehmenden abzubilden, tragen diese während der Erprobungen Aktigraphen am Handgelenk (Abb. 1). Die subjektive Müdigkeit und Erschöpfung werden mittels verschiedener Fragebögen ermittelt. Die Vigilanz, also die Fähigkeit, einen zu einem unbekanntem Zeitpunkt erscheinenden



Abb. 1: Studienteilnehmer trägt den Aktigraphen über der Uniform



Abb. 2: Durchführung des dreiminütigen Vigilanztests mit dem Aktigraphen

Stimulus zuverlässig zu entdecken und schnell auf diesen zu reagieren, wurde mittels eines dreiminütigen Psychomotor Vigilance Tests erhoben. Dieser war auf den Aktigraphen programmiert (Abb. 2) und jeweils zu Wachbeginn und -ende durchzuführen.

Im Rahmen eines Sonderforschungsprojektes wurden auf den Minenjagdbooten (MJB) DATTELN und FULDA vom 04.02. bis 23.02.2022 in der Ostsee zwei verschiedene Wachsysteme erprobt. Verglichen wurde das von den Minenjagdbooten eingesetzte traditionelle Wachsystem mit einem anhand des aktuellen Forschungsstandes optimierten circadianen Wachsystem (Abb. 3).

Bei dem bisher gefahrenen Seewachsystem findet alle sechs Stunden ein Wachwechsel (beginnend 00.00 Uhr) statt. Durch das neue Wachsystem sollen längere Schlafperioden realisiert werden, die zudem für beide Wachhälften wenigstens zum Teil in der Nacht, also in der Zeit des erholsamsten Schlafes liegen. Beide an der Studie teilnehmenden Einheiten führen mit unterschiedlichen Wachsystemen das gleiche Missionsprofil im gleichen Seegebiet. Nach einer Woche (während eines Hafenaufenthaltes) wechselten die beiden Einheiten das Wachsystem und der Versuch wurde für die Dauer einer weiteren Woche fortgesetzt (Abb. 4).

In der Abschlussbefragung wurde hervorgehoben, dass sich Teile der Besatzungen während des circadianen Wachsystems ausgeruhter fühlten und tagsüber leistungsfähiger gewesen seien. So sprachen sich abschließend 42 % für das neue Wachsystem aus.

Gegenwärtig werden Aktigraphie und Vigilanztests ausgewertet. Es bleibt daher abzuwarten, ob sich die subjektiven Wahrnehmungen und Einschätzungen mit den objektiv erhobenen Daten decken.

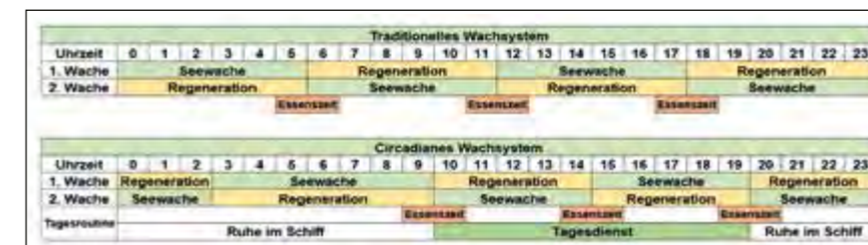


Abb. 3:
Oben: Traditionelles Wachsystem (6-6-6-6 Wachwechsel 00.00 Uhr)
Unten: Circadianes Wachsystem (7-5-5-7 Wachwechsel 03.00 Uhr)

	Hafen Kiel	In See	Hafen Tallinn	In See
MJB Dateln	Vor- und Nachbereitung	Circadianes Wachsystem	Vor- und Nachbereitung	Traditionelles Wachsystem
MJB Fulda	Nachbereitung	Traditionelles Wachsystem	Nachbereitung	Circadianes Wachsystem

Abb. 4: Versuchsaufbau zur Erprobung der 2-Wachsysteme auf den MJB FULDA und DATTELN

Oberstabsarzt Dr. Sophia Wilk-Vollmann
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Berlin

Oberstabsarzt Julia Taeye
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Berlin

BwKrhsBerlinKlinik10@bundeswehr.org

BwKrhsBerlinKlinik10@bundeswehr.org

Patientensicherheit in der Notfallmedizin: Risikoanalyse von latentem Informationsverlust

Informationsverlust ist eine bekannte Ursache für Patientengefährdung. Um latente Risiken für Misskommunikation im Arbeitsalltag zu identifizieren, wurden Teilnehmende aus allen Arbeitsbereichen in der Notfallmedizin dazu befragt. Ableitend daraus werden Adaptationen evaluiert, um den NATO 9 Line MEDEVAC REQUEST (9-liner) als mögliche Vorlage sicherer Kommunikation in einem zivilen Setting zu nutzen.

Obwohl Meldesysteme (CIRS) oder Arbeitsprozessanalysen beim Erkennen und Beheben von Zwischenfällen helfen, bilden sie unzureichend die verschiedenen Informationsbedürfnisse der einzelnen Berufsgruppen in der Notfallversorgung ab. Organisatorische Probleme oder Dysbalancen zwischen Berufsgruppen können mit diesen Methoden nicht betrachtet werden. Die Studie untersuchte daher latente Patientengefährdung im Arbeitsalltag, um Ausbildungsmaßnahmen und Versorgungsstrukturen anzupassen und Schnittstellenkommunikationen zu verbessern. Weiterhin wurden Ursachen evaluiert, weshalb Prozedere für einen sicheren Informationstransfer nicht angewendet werden. Anschließend sollte beurteilt werden, ob der 9-liner für ein ziviles Melde- und Nachforderungsschema adaptiert werden kann (Abb. 1). Denn ein Schema für einen strukturierten Informationstransfer und zur Ressourcenanforderung aus der zivilen prähospitalen Notfallversorgung existiert bislang nicht. In der Untersuchung wurden Situationen und Arbeitsbedingungen betrachtet, in denen es zu Informationsverlusten kommen kann.

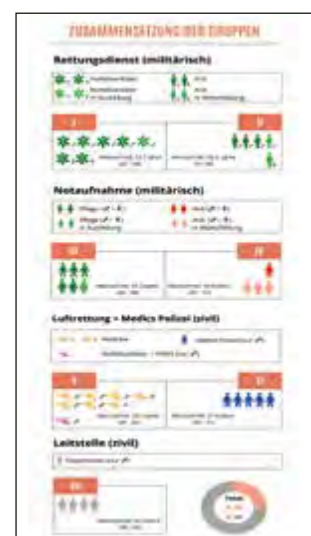


Abb. 1: Zusammensetzung der Fokusgruppen

NATO 9 LINE MEDEVAC REQUEST			
1. Location (grid of pic up zone)			
2. Call sign/frequency			
3. Number of patients (by type)			
P1 (urgent - 1 h):	P2 (priority - 4 h):	P3 (routine - 24h):	
4. Special equipment required			
A: None	B: Host/winch	C: Extraction	D: Fan
5. Number to be carried laying/sitting			
L (Litter):	A (Ambulatory):	E (Escort, e.g., child):	
6. Security at Pick-up Zone			
N: No Enemy	E: Enemy in Area	P: Possible Enemy	X: Hot pick-up zone
7. Pick-up zone marking method			
A: Panels	B: Pyro	C: Smoke	D: None
8. Nationality/status			
A: Coalition Forces	B: Coalition Civilian	C: Non-Coalition Force	D: Non-Coalition Civilian
9. Pick-up zone terrain obstacles:			

Abb. 2: NATO 9 Line MEDEVAC Request

Insgesamt 39 Teilnehmende wurden gezielt aus Arbeitsbereichen mit hoher Informationsdichte für Fokusgruppenanalysen rekrutiert (Abb. 2): Ärztliche als auch nicht-ärztliche Mitarbeitende einer militärischen Notaufnahme (Bundeswehrkrankenhaus Berlin) und dem Rettungsdienst (zivile und militärische Teilnehmende), so genannte Medics spezialisierter Polizeikräfte und Mitarbeitende einer zivilen Feuerwehrleitstelle. Alle Teilnehmende sollten in speziellen Kommunikations- und Übergabetechniken geschult sein, die das Risiko von Misskommunikation vermindern.

Die Studienergebnisse deuten an, dass militärisch geschultes Personal Schemata souveräner in dynamischen Situationen innerhalb der Notfallversorgung anwenden. Die Teilnehmenden der Fokusgruppenanalyse nahmen andere Kommunikationsrisiken wahr, als es Ergebnisse aus CIRS- und Arbeitsprozessanalysen darlegen.

Demnach bleiben Ursachen für Informationsverluste häufig unerkannt: Bestehende Präventions- und Schulungsmaßnahmen für die Patientensicherheit werden in der täglichen Praxis entweder uneinheitlich umgesetzt oder das Personal ist trotz Einsatz in einem Hochrisikoumfeld dennoch unzureichend geschult.

Weitere 10 Risikofaktoren für Informationsverlust konnten kategorisiert werden: Organisatorische Faktoren (Schulung / Ausbildungsdefizit, Schnittstelle, technische / normierte Vorgaben); Umgebungsbedingungen; zwischenmenschliche Einflüsse (Hierarchie und Informationsmangel); und personenbezogene Einflüsse (Stress / Fatigue, stereotypes Denken, mangelnde Konzentration und Fehleinschätzung / Fehlinterpretation).

Je nach Berufsgruppe sind unterschiedliche Schwerpunkte für Misskommunikation angeführt. Notfallsanitäter nannten beispielsweise ein stressiges Umfeld („Konzentrationsverlust“), während Pflegende in der Notaufnahme eine schlechte Schnittstellenkommunikation anführten. Ein Schema, das Informationen aus der prähospitalen Notfallversorgung weitergeben und Ressourcen nachfordern kann, sollte daher intuitiv, strukturiert und einfach zu etablieren sein. Besondere Einsatzsituationen müssen sowohl verständlich als auch kommunizierbar sein. Das Design des 9-Liners sei vorteilhaft, da Informationen auf eine standardisierte Weise übermittelt würden. Nachteile des Schemas für eine Verwendung in der zivilen Notfallversorgung konnten benannt werden (Abb. 3). Verschiedene Anforderungen an ein Schema sollten berücksichtigen werden: I) Inhalt, Design und Schulungsanforderungen; II) kritische Informationen je nach Einsatzgebiet, Situation und Informationsempfänger; III) Anpassung an besondere Einsatzsituationen (z. B. Ausfall von Kommunikationsinfrastruktur), unterschiedliche Krankheitsentitäten und Sicherheitslagen.

Adaptierte militärische Meldestrukturen können in der zivilen Notfallmedizin Vorlage sein, um die Schnittstellenkommunikation zu verbessern.



Abb. 3: Vor- und Nachteile des 9-Liners als Kommunikationsschema

Oberstabsarzt PD Dr. med. Alexander Kaltenborn, MHBA
 Bundeswehrkrankenhaus Westerstede
 Westerstede

bwkrswesterstedeforschung@bundeswehr.org

PD Dr. med. Nicco Krezdorn
 Medizinische Hochschule Hannover
 Hannover

info@mh-hannover.de

Das Human Extremity Recovery Ordnance (H.E.R.O.)-Projekt – Ex-vivo Perfusion von Extremitäten zur erfolgreichen Re- und Transplantation

Aktuell ist die Wahrscheinlichkeit eine Replantation nach gefechtsbedingter Amputation durchzuführen sehr gering. Auch die Rekonstruktion mittels allogener Transplantation (also von einem Menschen zu einem anderen) ist in Deutschland noch nicht etabliert. Diese Situation wird adressiert durch die Entwicklung des H.E.R.O. zur ex-vivo Perfusion von Extremitäten im BwKrhs Westerstede und der Medizinischen Hochschule Hannover.

Bereits 2008 prognostizierte eine US-amerikanische Studie, dass die Zahl von Amputierten in den USA bis 2050 um 72 % steigen wird. Die sozio-ökonomischen Konsequenzen sind beträchtlich. Betroffene verlieren ihre Arbeit, erleben einen sozialen Abstieg und leiden an Depressionen.

Die Ergebnisse der Replantationschirurgie variieren je nach Grund der Amputation, dem Gesamtzustand des Patienten und der Qualität der Behandlung. Neuere Daten zeigen Vorteile der Allotransplantation hinsichtlich der Lebensqualität und Funktionalität im Vergleich zur Prothesenversorgung und lassen hoffen.

Sowohl Re- als auch Transplantation sind hochanspruchsvolle, mikrochirurgische Eingriffe, die ein hohes Maß an chirurgischer Erfahrung und interdisziplinärer Zusammenarbeit erfordern. Hinzu kommen verkomplizierende Faktoren, so bestimmen logistische Hürden wie etwa die kalte Ischämiezeit des Amputats die Machbarkeit.

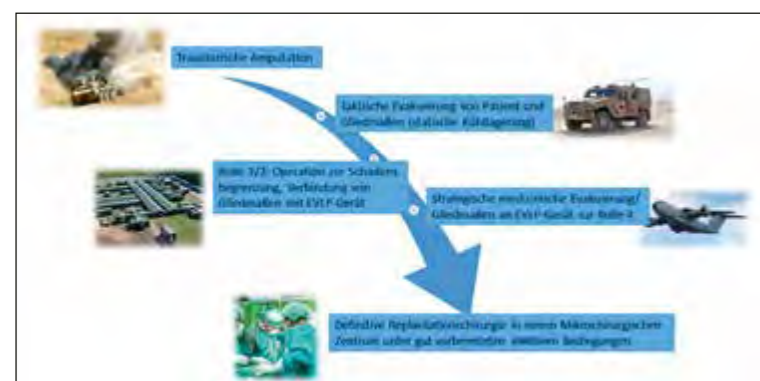


Abb. 1: Möglicher Ablauf eines Einsatzes des H.E.R.O. Systems nach Gefechtsverletzung

Die Anzahl polytraumatisierter Patienten mit schweren Extremitätenverletzungen steigt, oftmals gilt die Devise „life before limb“ und eine akute Replantation kommt nicht in Betracht.

Diese Herangehensweise betrifft die zivile Medizin und die Wehrmedizin gleichermaßen. Im militärischen Setting ist die traumatische Amputation darüber hinaus charakterisiert durch taktische Anforderungen des Gefechts, lange kalte Ischämiezeiten sind die Folge. Das Amputat ist massiv mikrobiologisch kontaminiert, insbesondere bei Blast Injuries kommt es zu einem erheblichen Weichteilschaden. Aktuelle Daten zeigen, dass etwa die Hälfte aller Gefechtsverletzungen die Extremitäten betreffen. Bei schweren Verletzungen kommen nur eine Amputation oder begrenzte Erhaltungsversuche zum Einsatz, eine Replantation unter diesen Bedingungen ist nicht möglich.

Vielversprechend sind aktuelle Ergebnisse der ex-vivo Extremitätenperfusion (Ex-vivo limb perfusion EVLP), die zeigen, dass die EVLP eine essentielle Lösung für die Herausforderung darstellen könnte. Alle bisherigen Tierversuchstudien wurden allerdings mit einer Perfusionszeit von 24 Stunden durchgeführt, zu kurz für das wehrmedizinische Setting. Schließlich muss die strategische Evakuierung in ein Level 4-Krankenhaus mit mikrochirurgischer Expertise in Deutschland erfolgen. Ein standardisiertes Gerät sowie Perfusionsprotokolle sind ebenfalls nicht verfügbar. Daher erforschen die Medizinische Hochschule Hannover und das Bundeswehrkrankenhaus Westerstede gemeinsam die Möglichkeiten der EVLP im H.E.R.O.-Projekt. Einen möglichen Einsatzablauf zeigt Abb. 1.

Das Ziel des H.E.R.O.-Projekts ist es, die Fähigkeitslücke der Re- sowie Transplantation von Amputationsverletzungen zu

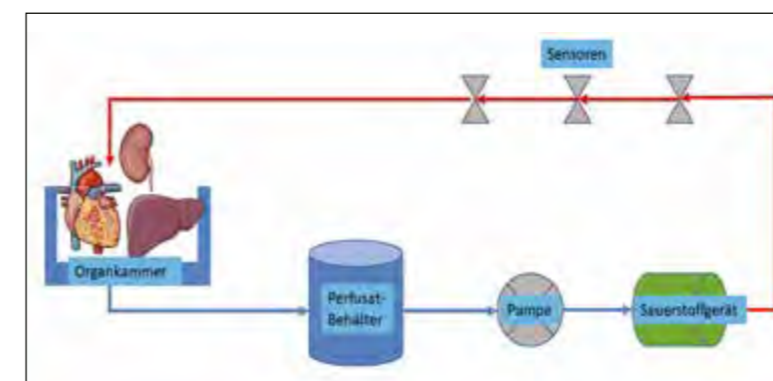


Abb. 2: Schematische Darstellung eines EVLP-Geräts

schließen. Daher wird in diesem Rahmen an porcinen und humanen Modellen ein EVLP-Gerät entwickelt (siehe Abb. 2). Einen rudimentären, klinisch durch das Forschungsteam bereits eingesetzten Prototyp zeigt Abb. 3. Die Benefits der EVLP sind vielschichtig:

- Verlängerung der kalten Ischämiezeit
- Chirurgische Flexibilität
- Mikrobiologische Behandlung, bspw. mit übermaximal dosierten Antibiotika
- Reduktion des lebensbedrohlichen systemischen Ischämie-Reperfusionsschadens
- Evaluation der Gewebefunktion
- Allotransplantation und Immunkonditionierung während der Perfusion

Bei erfolgreichem Abschluss des H.E.R.O.-Projekts verfügt der Sanitätsdienst der Bundeswehr als internationalem Alleinstellungsmerkmal über ein hohes Maß an taktischer und strategischer Flexibilität bei schwersten Extremitätenverletzungen. Die Rate der gefechtsbedingten Amputation wird drastisch gesenkt. Aus zivilmedizinischer Sicht kann die EVLP der disruptive Wegbereiter einer strukturierten Implementierung der Alltransplantation von bspw. Hand und Gesicht sein, sodass diese vielversprechenden Eingriffe immer weiter als Maximalstandard etabliert werden können.



Abb. 3: Klinisch eingesetzter Prototyp

Dr. habil. Mark Melnyk
Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Ulm

Oberstarzt Prof. Dr. Benedikt Friemert
Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Ulm

BwkrhsUlmForschung@bundeswehr.org

BwkrhsUlmForschung@bundeswehr.org

Forschungsverbund Süd (FvS) – Schulterchluss zwischen dem Bundeswehrkrankenhaus Ulm und der Universität der Bundeswehr München für die zukünftige universitäre Traumaforschung

Informationstechnologie (IT) und damit die Informatik haben längst alle Lebensbereiche durchdrungen, hiervon ist auch die Medizin in besonderem Maße betroffen. Insbesondere die moderne Forschung und Wissenschaft ist ohne IT-Unterstützung nicht mehr vorstellbar. IT ist einerseits wesentlicher Enabler für die Durchführung von Forschungsvorhaben, kann andererseits aber auch selbst Forschungsgegenstand der Medizin sein.

Die Verzahnung der Medizininformatik und Traumaversorgung bietet dabei das Potenzial, die beiden Disziplinen Informatik und Medizin zunehmend zu „verschmelzen“. Insbesondere ist die Simulation ein ganz wesentlicher Teil, der insbesondere im Forschungsverbund Süd (FvS) eine wesentliche Rolle spielen soll. Der Forschungsverbund Süd umfasst als tragende Säulen die klinische Traumaforschung am Bundeswehrkrankenhaus (BwKrhs) Ulm und die medizininformatische Lehre und Forschung an der Universität der Bundeswehr (UniBw) München (Abb. 1). Mit dem Ziel am künftigen Zentrum für Multidimensionale Traumawissenschaften (MTW) der Universität Ulm „auf Augenhöhe“ eingebunden zu werden.

2020 initialisierten OTA Dr. Neuhoff, OTA Prof. Dr. Friemert (BwKrhs Ulm), Prof. Dr. Hofmann (UniBw München) und Dr. habil. Melnyk (BwKrhs Ulm) den Verbundgedanken. Es entwickelte sich schnell ein Verständnis, wie die Expertise in Simulation und Künstlicher Intelligenz mit traumatologischen Fragestellungen erfolgreich genutzt werden können. Die Perspektive, Expertisen aus klinischer Forschung und aus

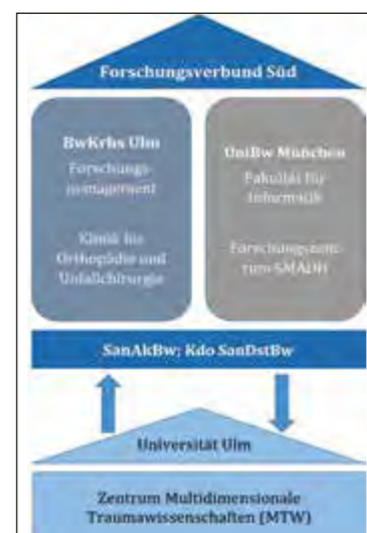


Abb. 1: Wesentliche Elemente des Forschungsverbund Süd

Prof. Dr. Marko Hofmann
Universität der Bundeswehr München
Institut für Technische Informatik
Neubiberg

info@unibw.de

Generalarzt Dr. Johannes Backus
Kommando Sanitätsdienst der Bundeswehr
Koblenz

KdoSanDstBwA@bundeswehr.org

der KI-Forschung sowie Simulation erfolgreich für die klinische Versorgung in der Gesundheitsversorgung der Bundeswehr (GesVersBw; GA Dr. Backus) und zudem der zivilen Gesundheitsversorgung eng zu verzahnen, ist evident.

Im Frühjahr 2021 formierte sich am BwKrhs Ulm eine Arbeitsgruppe, die sich mit der vollständigen Digitalisierung des TDSC table top Spiels (TDSC: Terror and Disaster Surgical Care) beschäftigte, so dass unterschiedliche Formen der Ausbildungssituationen eines Massenanfalls (MANV) von Verletzten zur Einsatzausbildung sowie für die zivile Ausbildung (TerrorMANV) zukünftig als Simulation möglich sein werden (Abb. 2). Federführend sind hier die Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie als treibender Partner der klinischen Versorgung, das Forschungsmanagement BwKrhs Ulm und das Smart Digital Health der UniBw München.

In der präklinischen Forschung ist der konkrete Schulterchluss zwischen der UniBw München und dem BwKrhs Ulm herbeigeführt. Zum Thema „Stressresilienz durch Exposition in der simulierten Vorsichtung“ wurde im BMBF Call „Forschung zur Zivilen Sicherheit“ von einem Forschungskonsortium bestehend aus zwei mittelständischen Unternehmen, der UniBw München und dem BwKrhs Ulm ein Antrag mit Start 06/2023 eingereicht. Ziel ist es, einen Demonstrator für das gezielte Stressstraining

von Ärzten, Rettungsanitätern zur Vorbereitung auf einen MANV zu erstellen und die richtigen Handlungsoptionen zu trainieren.

Ein drittes Forschungsgebiet wird zwischen der Klinik für Nuklearmedizin BwKrhs Ulm und der Forschergruppe Künstliche Intelligenz der UniBw München aufgebaut. In dieser Zusammenarbeit sollen mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz radiologische Bildgebung nach Krankheiten und Vitalitätsdiagnostik in der Traumatologie besser und schneller identifiziert werden.

Die Intensivierung der inhaltlichen und ressourcenseitigen Ausprägung des FvS ist in vollem Gang. In 2023 werden zunächst drei zusätzliche Dienstposten als Forscherstellen ausgeschrieben, die auf dem Gebiet der klinischen und grundlegenden Forschung als patientennahe Gebiete sowie Traumaforschung unter Nutzung der KI und Simulation. Sie werden auf Forschungsk Kooperationen mit der Universität Ulm aufsetzen können. Das Forschungsgebiet Trauma mit KI soll mit der UniBw München eine Allianz aufbauen und zudem mit Gruppen ähnlicher Ausrichtung der Universität Ulm Forschungsinitiativen auf den Weg bringen.



Abb. 2: Links eine Patientenkarte des TDSC®-Spiels, rechts die korrespondierende „virtuellen“ Patientenkarte im elektronischen Codebook (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Wehrmedizinischen Monatszeitschrift)

Oberfeldarzt Dr. Lorenz Scheit, M.Sc.
Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
Hamburg

bwkrhshamburgforschung@bundeswehr.org

Flottillenarzt Dr. Katrin Bender
Sanitätsversorgungszentrum Fritzlär
Fritzlär

SanVersZFritzlärLeiter@bundeswehr.org

Auswirkung der körperlichen und psychischen Belastungen während der Kampfschwimmerausbildung – Eine sportmedizinische und sportpsychologische Untersuchung

Bei der Ausbildung von Kampfschwimmern und -schwimmerinnen werden hohe physische und psychische Ansprüche gestellt. Die Bestenauslese geht mit kleiner Bewerberzahl und hoher Ausfallsquote einher. In dieser Studie sollen wissenschaftliche Fragestellungen während der Kampfschwimmerausbildung mittels Analysen sowie psychologischen Fragebögen und physiologischen Messungen erfasst und wissenschaftlich ausgewertet werden.

Zur Umsetzung der Studie arbeiten das Bundeswehrkrankenhaus Hamburg, die Universität Kiel, die Universität Hamburg, die Sektion Maritime Medizin des Schiffahrtsmedizinischen Institutes der Marine in Kiel Kronshagen und das Kommando Spezialkräfte der Marine (KSM) in Eckernförde kooperativ zusammen. Kampfschwimmer sind professionell ausgebildete Spezialkräfte der Marine, welche unter extremen Umweltbedingungen und unter hoher physischer und mentaler Belastung effizient ihren Auftrag erfüllen müssen. Die Auswahl dieser auch als „tactical athlete“ zu bezeichnenden Soldatinnen und Soldaten unterliegt strengen Kriterien. Hierzu gehört das Ausüben der körperlichen Belastungen zu unterschiedlichen Tages- und Nachtzeiten mit teilweise sehr kurzen Regenerations- und Schlafphasen, die gezielte Deprivation von Nahrung während mancher Ausbildungsabschnitte, der bewusst herbeigeführte hohe Stresspegel, sowie das Fehlen einer engen sport- und ernährungsmedizinischen Betreuung.

Diese erste Ausbildungsphase besteht regelhaft nur eine kleine Anzahl an leistungsfähigen Soldatinnen und Soldaten im Rahmen der Bestenauslese, welche in den folgenden



Abb. 1:
Kampfschwimmer
im Tauchbecken



Abb. 2: Kampfschwimmerausbildung

3 Jahren zu Kampfschwimmern und -schwimmerinnen ausgebildet werden.

Das Ziel der Studie ist es, die Auswirkungen der fordernden körperlichen und psychischen Belastung während des ersten Abschnittes der Kampfschwimmerausbildung (Sportausbildung und Hallenphase) auf die Körperzusammensetzung, die adaptive Thermogenese, die Ausdauerleistungsfähigkeit, die Explosivkraft der unteren Extremität, die physische Regenerationsfähigkeit und die psychovegetative Belastung der teilnehmenden Soldaten zu untersuchen. Aus den Ergebnissen sollen sportphysiologische und -psychologische, sowie ernährungsmedizinische Empfehlungen abgeleitet werden, die zu einer Optimierung der Ausbildung führen können.

Methodisch handelt es sich um eine prospektive Anwendungsbeobachtung im Pre-/Post-Design an Kampfschwimmerschülerinnen und -schülern während des ersten Abschnittes der Kampfschwimmerausbildung an wenigstens acht voneinander unabhängigen Zeitpunkten, über einen Zeitraum von jeweils elf Wochen.

Neben anthropometrischen Daten werden Bioimpedanzanalyse, die quantitative Magnet Resonanz Methode (EchoMRI), die Air Displacement Pletysmographie (ADP) und die Herzfrequenzanalyse (HRV) mittels Pulsuhr durchgeführt. Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung des Ruheenergieumsatzes (indirekte Kalorimetrie), sowie die Bestimmung von Blutbild, Harnstoff, Elektrolyte, Schilddrüsenwerte, Leptin, Testosteron, Cortisol und Insulin werden regelmäßig durchgeführt. Außerdem werden die Schläfrigkeit mittels standardisierter Fragebögen (Standort-Sleepiness-Scale) und das subjektiv-mentale



Abb. 3: Kampfschwimmer

Belastungsempfinden (Erholungs- und Belastungsfragebogen Sport) erfasst.

Einer von mehreren Aspekten dieser Studie dient dazu diejenigen zu selektionieren, welche für den fordernden Beruf des Kampfschwimmers bzw. der Kampfschwimmerin geeignet sind, daher werden die Teilnehmenden bewusst an ihre physischen wie psychischen Grenzen heran- bzw. auch darüber hinaus geführt. Es ist bisher nicht bekannt, ob die Soldaten dabei eventuell einen Zustand erreichen, welcher als Überlastung (engl. overreaching syndrom = ORS) bezeichnet wird. Dieser ist gefürchtet ist, da er zum Übertrainingssyndrom (engl. overtraining syndrome = OTS) und zu mehrmonatigen Trainingspausen oder sogar zum Karriereende eines Leistungssportlers bzw. einer Leistungssportlerin führen kann. Aufgrund der Coronapandemie kam es zu Verzögerungen der Datenakquise, sodass die ersten Ergebnisse der Studie in 2023 erwartet werden.

Oberstarzt Dr. Stephan Waldeck
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Klinik VIII – Diagnostische & interventionelle Radiologie & Neuroradiologie
Koblenz

BwZKAbtVIII@bundeswehr.org

Oberfeldarzt Dr. Kai Nestler
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Klinik VIII – Diagnostische & interventionelle Radiologie & Neuroradiologie
Koblenz

BwZKAbtVIII@bundeswehr.org

Quantenzählender CT-Scanner im Schockraum-Setting – Diagnostikoptimierung polytraumatisierter Patienten

Schwerverletzte Patientinnen und Patienten werden im Schockraum erstversorgt und die Traumafolgen mittels Computertomographie diagnostiziert. Eine neue CT-Generationsgeneration ermöglicht eine schnellere und hochauflösendere Bildgebung. Die hohe diagnostische Sicherheit, klinische Anwendungen und der Einfluss auf therapeutische Entscheidungen zur hochwertigen Patientenversorgung werden untersucht.

Das Bundeswehrzentral Krankenhaus (BwZKrhs) Koblenz verfügt über 506 Betten, versorgt jährlich ca. 20.000 stationäre Patientinnen und Patienten und führt als Krankenhaus der Schwerpunktversorgung etwa 220.000 ambulante Behandlungen durch. Als überregionales Traumazentrum ist die präzise und schnelle Diagnostik von schweren Verletzungsmustern die Voraussetzung, um eine zielgerichtete Therapie umgehend zu ermöglichen.

Die moderne bildgebende Schockraum-Diagnostik basiert auf der Computertomographie. Diese erstellt ein dreidimensionales Bild durch Röntgenstrahlen, die im Körper geschwächt werden und von einem Detektor empfangen werden.

Als eine der ersten Institutionen weltweit wurde im BwZKrhs Koblenz eine neue Generation der Computertomographie (Siemens Healthineers Naeotom Alpha) installiert und weltweit einzigartig in einem Schockraum-Setting für Schwerverletzte angewendet (Abb. 1). War es zuvor bei Computertomographen notwendig, dass die einfallende Röntgenstrahlung im Detektor erst in sichtbares Licht umgewandelt und dann in einem zwei-



Abb. 1: Quantenzählender CT-Scanner im Schockraum-Setting

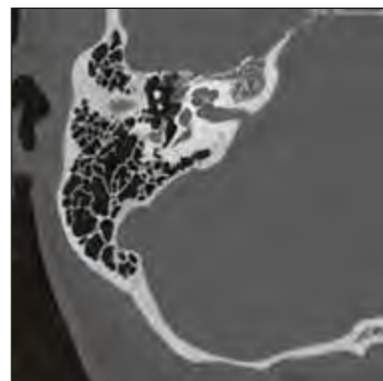


Abb. 2: Ultrahochauflösende CT-Darstellung des Felsenbeins

Oberfeldarzt PD. Dr. Daniel Overhoff
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Klinik VIII – Diagnostische & interventionelle Radiologie & Neuroradiologie
Koblenz

BwZKAbtVIII@bundeswehr.org

Oberstarzt Prof. Dr. Robert Schwab
Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Klinik II – Allgemein-, Viszeral- und Thoraxchirurgie
Koblenz

BwZKrhsKoblenzKlinikIIKlinischerDirektor@bundeswehr.org

ten Schritt in elektrische Signale überführt wurde, erfasst der neue quantenzählende CT-Scanner (PCD-CT) direkt jedes einzelne Röntgenphoton und das zugehörige Energieniveau unmittelbar mittels einer Detektorschicht aus Cadmiumtellurid-Kristallen (CdTe). Die Umwandlung in sichtbares Licht als bisheriger Zwischenschritt bei herkömmlichen CT-Detektoren, einschließlich des damit verbundenen Informationsverlustes, entfällt vollständig.

Anhand der neuen Spektralinformationen lassen sich unterschiedliche Materialien im Körper identifizieren und differenzieren. Selbst die Anzahl der Scan-Untersuchungen kann durch virtuelle Entfernung des typischerweise vorab injizierten Kontrastmittels verringert werden. Durch die beschleunigte Diagnostik ist gleichermaßen ein früherer Behandlungsbeginn möglich. Die verringerte Strahlenbelastung um bis zu 45 % wirkt sich positiv auf Routineuntersuchungen aus, wie z. B. die Früherkennung von Lungenkrebs.

Die quantenzählende Technologie ermöglicht zudem ultrahochauflösende (UHR) Scans mit einer räumlichen Auflösung von 0,2 mm ohne Erhöhung der Strahlendosis. Feine Verletzungen an komplexen anatomischen Strukturen wie etwa dem Felsenbein (Abb. 2), das auf engstem Raum das Innenohr und Leitungsstrukturen beinhalten, können somit sichtbar gemacht

werden. Diesbezüglich konnten im BwZKrhs Koblenz die ersten Forschungsergebnisse überhaupt zur postoperativen Bildgebung mittels PCD-CT nach operativer Versorgung mittels Cochlea-Implantat (CI) erzielt werden. Die Interpretation mit konventioneller Detektor-Computertomographie gestaltet sich aufgrund von Metallartefakten üblicherweise schwierig. Die PCD-CT-Bildgebung erwies sich als vielversprechende Technologie für die CI-Bildgebung mit verbesserter räumlicher Auflösung und besserer Sichtbarkeit kleiner Strukturen. (Abb. 3).

Die verbesserte Diagnostik eröffnet zahlreiche neue Möglichkeiten in fast allen klinischen Bereichen. Das Optimierungspotential, Evaluation neuer klinischer Möglichkeiten und die Rolle des quantenzählenden CT-Scanners bei der klinischen Entscheidungsfindung, insbesondere in der Notfallversorgung schwerstverletzter Patientinnen und Patienten, wird im BwZKrhs Koblenz zukünftig weiter untersucht. Hierzu werden auch im Rahmen von Forschungsk Kooperationen, z. B. mit Siemens Healthineers, Algorithmen und Verfahren der künstlichen Intelligenz entwickelt, die die Diagnostik Schwerstverletzter beschleunigen und verbessern.

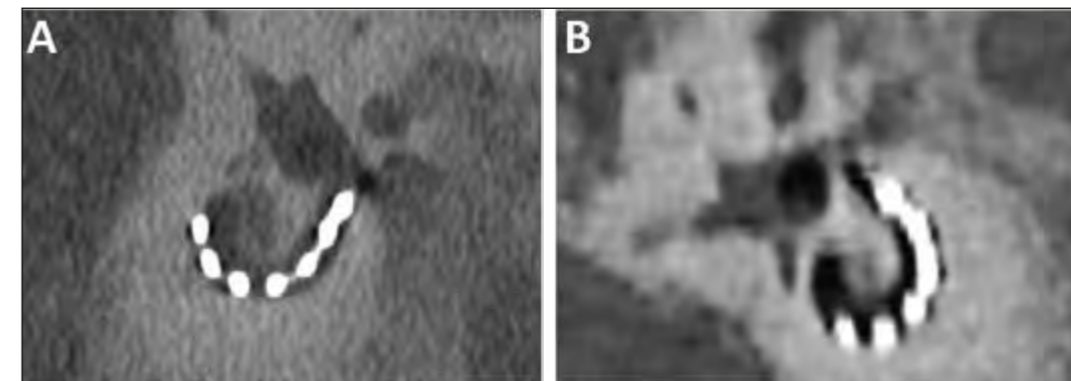


Abb. 3: Vergleich der Darstellung eines Cochlea-Implantats und des umgebenden temporalen Knochens mit verbessertem Metall-Knochen-Kontrast bei PCD-CT (A) und konventioneller Detektor-Computertomographie (B)

Priv.-Doz. Dr. Ulrich Wesemann
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

Oberarzt Prof. Dr. Peter Zimmermann
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

Oberarzt Dr. Gerd Willmund
Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Psychotraumazentrum
Berlin

psychotraumazentrum@ptzbw.org

Neue Ergebnisse einer Längsschnittstudie zu psychischen Störungen nach Auslandseinsätzen der Bundeswehr

In einem neuen Ansatz wird das Neuaufreten psychischer Störungen nach einem Auslandseinsatz längsschnittlich an einer Stichprobe untersucht. Dabei wird Militärpersonal miteinander verglichen, das während des Einsatzes ein vs. kein kritisches Ereignis erlebte. Es fand sich in der Gruppe mit kritischem Einsatzereignis ein 6 bis 7-fach höheres Risiko, an einer psychischen Störung neu zu erkranken.

Trotz deutlicher internationaler Unterschiede belegen umfangreiche Studien eine signifikante Zunahme psychischer Störungen bei militärischem Personal nach Auslandseinsätzen im Rahmen des internationalen Konfliktmanagements. Verglichen wird in der Regel Militärpersonal im Auslandseinsatz mit Militärpersonal, das während des gleichen Zeitraums im Inland seinen Dienst verrichtet. In beiden Gruppen werden die psychischen Störungen vor und nach Einsatz bzw. Dienst im Inland erhoben. Dadurch kann die Differenz neuauftretender psychischer Störungen (mit vs. ohne Einsatz) auf den Auslandseinsatz zurückgeführt werden.

Die vorliegende Studie, die in Kooperation zwischen dem Psychologischen Dienst der Bundeswehr, dem Psychotraumazentrum am BwKrh Berlin, dem King's College London und der UniBw München durchgeführt wurde, vergleicht im Unterschied dazu Soldatinnen und Soldaten desselben Auslandseinsatzes in Afghanistan miteinander. Die Unterscheidung liegt darin, ob sie während des Einsatzes ein kritisches militärspezifisches Ereignis erlebten oder nicht. Da die Rahmenbedingungen wie Abwesenheit von zu Hause, veränderte Sicherheitslage, ständige Bereit-



Abb. 1: Oberfeldwebel mit Frau (Quelle: Bundeswehr/Eisner 2004)



Abb. 2: Sanitäter üben die Aufnahme und den Transport einer verletzten Soldatin im Camp Marmal in Mazar-e Sharif / Afghanistan (Quelle: Bundeswehr / Torsten Kraatz)

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

info@unibw.de

Prof. Dr. Hubertus Himmerich
King's College
Department of Psychological Medicine
London

kcl-PA-Strang@kcl.ac.uk

schaft, etc. während des Einsatzes für alle vergleichbar sind, kann das Neuaufreten von psychischen Störungen auf die kritischen Ereignisse während des Einsatzes zurückgeführt werden. Die allgemeine Bedrohungslage und Summe aller Widrigkeiten werden dabei als erhöhte, aber zum Beruf zugehörige, militärische Belastung betrachtet.

Dafür wurde eine Untersuchung an einer Kampftruppe mit N = 361 Teilnehmenden vor und nach einem Afghanistan-Einsatz (ISAF) 2013-2014 neu ausgewertet. Davon erlebten 81 ein kritisches Ereignis von außergewöhnlicher Bedrohung während des Einsatzes und 280 nicht. Das Vorliegen psychischer Störungen wurde mittels eines klinischen Interviews (Mini-DIPS) vor und nach dem ISAF-Einsatz bestimmt. Dadurch konnte festgestellt werden, wer in diesem Zeitraum eine neue psychische Störung entwickelte.

Das Neuaufreten psychischer Störungen in der Gesamtgruppe aller Soldatinnen und Soldaten des Auslandseinsatzes (Auslandseinsatz mit und ohne kritisches Ereignis – dies entspricht dem bisherigen Ansatz ohne Vergleichsgruppe) lag für Angststörungen bei 5 %, bei posttraumatischen Belastungsstörungen (PTBS) und depressiven Episoden bei jeweils 2 %. Dies deckt sich weitgehend mit den Ergebnissen einer bereits früher durchgeführten Studie innerhalb der Bundeswehr.

In unserer neuen Auswertung wurde nun der Vergleich der beiden Gruppen mit vs. ohne kritische Ereignisse während des Einsatzes durchgeführt. Dabei lag das Neuaufreten für Angststörungen bei 16 % (mit kritischem Ereignis) vs. 3 % (ohne kritisches Ereignis), bei PTBS 6 % vs. 1 % und bei depressiven Episoden 7 % vs. 1 %. Dies belegt, dass nicht der Einsatz selbst einen Einfluss auf die Entwicklung psychischer Störungen hat, sondern die erlebten Ereignisse während des Einsatzes. Das Risiko (Odds Ratio) zum Neuaufreten für jede der genannten psychischen Störungen für Soldatinnen und Soldaten mit kritischen Ereignissen während des Einsatzes ist dabei 6 bis 7-mal höher als für diejenigen, die während desselben Einsatzes keinem kritischen Ereignis ausgesetzt waren.

Aufgrund der Ergebnisse kann der Zuwachs psychischer Störungen nun den kritischen Einsatzereignissen und nicht dem „Einsatz per se“ zugeschrieben werden. Diese Erkenntnisse sollten in der psychologischen Einsatzvorbereitung und in De-Stigmatisierungsprogrammen Berücksichtigung finden. Es ist anzunehmen, dass diese Auswertestrategie auch die Ergebnisse internationaler Studien vergleichbarer macht, da sie die sehr variable direkte Gefährdung bei den Einsätzen berücksichtigt.



Abb. 3: An PTBS erkrankter Hauptfeldwebel (Quelle: Bundeswehr / Jonas Weber)

3

Militärgeschichtliche und Sozialwissenschaftliche Forschung

Das Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) betreibt militärgeschichtliche und sozialwissenschaftliche Forschung im Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung, um mit den dabei gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnissen die öffentlichen Diskussionen über Militär und Sicherheit in Deutschland aktiv mitzugestalten. Das ZMSBw erforscht die deutsche Militärgeschichte nach den allgemein anerkannten Methoden und Standards der Geschichtswissenschaft unter Berücksichtigung der Wechselbeziehungen zwischen Militär, Politik, Wirtschaft, Gesellschaft und Kultur.

Mit seiner sozialwissenschaftlichen Forschung leistet das ZMSBw einen Beitrag zur Fortentwicklung der Sozialwissenschaften sowie zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. Die Verschränkung der Geschichtswissenschaft sowie der Sozialwissenschaften erweitert die Möglichkeiten auf dem Gebiet der Forschung und der Anwendung ihrer Ergebnisse in der historischen Bildung.

Das ZMSBw leistet einen Beitrag zum Verständnis der Rolle von Streitkräften in einer pluralistischen Gesellschaft. In der thematischen Verschränkung mit der Militärgeschichte tragen die Sozialwissenschaften zur Erforschung und Deutung neuer Konflikte und besonderer Einsatzszenarien der Bundeswehr bei.

Die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des ZMSBw sind mit ihren Forschungen Teil der wissenschaftlichen Community. Sie pflegen Kontakte zu Organisationen, Institutionen und Dienststellen des In- und Auslandes sowie zu inner- wie außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Zunehmend wichtig ist die Kooperation mit anderen Institutionen der Bundeswehr, die ausbilden, forschen und erziehen. Die Einsätze der Bundeswehr unterstützt das ZMSBw mit historischen und sozialwissenschaftlichen Analysen.



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

ZMSBwPressestelle@bundeswehr.org

Katholische Friedensarbeit im Kalten Krieg unter besonderer Berücksichtigung der beiden deutschen Staaten

Die Zeit des Kalten Krieges brachte einen kontrovers geführten Diskurs über Friedensethik und Sicherheitspolitik hervor. Am Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) wird dieser Diskurs seit einigen Jahren unter besonderer Berücksichtigung der beiden deutschen Staaten und der zivil-militärischen Verhältnisse erforscht. Eine neue Studie befasst sich dabei mit dem Engagement der römisch-katholischen Kirche in der Friedensarbeit.

„Krieg soll nach Gottes Willen nicht sein!“ Dieser Satz, mit dem sich die erste Vollversammlung des Ökumenischen Rates der Kirchen im Jahr 1948 prominent der Friedensfrage zuwandte, formuliert theologisch eine Aussage, die drei Jahre zuvor in der Charta der Vereinten Nationen völkerrechtlich als allgemeines Gewaltverbot formuliert worden ist. Mit der Kritik an einem freien Recht zur Kriegsführung hier und der moralischen Ächtung des Krieges dort, hervorgegangen aus den Erfahrungen zweier Weltkriege, dem Einsatz von Massenvernichtungswaffen und der hohen Anzahl ziviler Opfer, ergab sich für die Kirchen seit Ende der 1940er Jahre eine neue Form der Friedensverantwortung.

Denn trotz der Zäsur, die das Ende des Zweiten Weltkrieges für die Konflikt- und Friedensethik in Europa und weiten Teilen der Welt bedeutete, bestanden Konflikte und Spannungen weiter und mündeten in einen „kalten“ Krieg, der in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht nur die Außen- und Sicherheitspolitik bestimmt hat, sondern massiven Einfluss auf weite Teile von Kultur und Gesellschaft in den vom Ost-West-Konflikt betroffenen Staaten ausübte.



Abb. 1: Die Friedensbewegung der 1980er Jahre, die sich gegen den NATO-Doppelbeschluss richtete, war eine Protestbewegung, die Millionen Menschen auf die Straße brachte. Auch weite Teile der christlichen Kirchen unterstützten deren Anliegen. Die katholische Organisation „Pax Christi“ positionierte sich in der katholischen Kirche der Bundesrepublik am deutlichsten (Quelle: IMAGO / Sven Simon)



Abb. 2: Emblem der unabhängigen Friedensbewegung in der DDR mit dem Slogan „Schwerter zu Pflugscharen“. Obwohl die auf dem Foto abgebildete Skulptur ein Geschenk der Sowjetunion an die UNO war, wurden Menschen in der DDR, die dieses Emblem trugen, durch Vertreter des Staates diskriminiert (Quelle: Ökumenische FriedensDekade)

Die als Vergleichs- und Beziehungsgeschichte angelegte Studie nimmt das Agieren der römisch-katholischen Kirche in diesem Konflikt in den Blick, indem bisher unveröffentlichte Quellen aus staatlichen, kirchlichen und privaten Archiven ausgewertet werden. Dem geteilten Deutschland als Symbol und Mittelpunkt des Kalten Krieges kommt dabei eine herausragende Bedeutung zu. Nach Gründung der beiden deutschen Staaten kam es nicht nur zu Abgrenzungen und getrennten Entwicklungen, sondern bestanden weiterhin Verflechtungen und Gemeinsamkeiten. Kontakte und Begegnungen blieben gerade zwischen den Christen in beiden deutschen Staaten bestehen oder wurden neu geknüpft. Die katholische Kirche, die bis zuletzt die deutsche Teilung nicht anerkannte, leistete hier einen wichtigen Diskursbeitrag.

Untersucht werden dabei auch die zivil-militärischen Beziehungen. Ausgangspunkt ist die Überzeugung, dass zivilgesellschaftlichen Akteuren, wie etwa den christlichen Kirchen, eine wichtige Funktion in Deutung und Verlauf des Kalten Krieges zukam, die auch auf das Militär zurückwirkte. Hinzu kommt, dass die katholische Kirche sich nicht nur prominent zu militärisch relevanten Themen äußerte, sondern in Form der Militärsorge in direktem Austausch mit dem Militär stand.

Wiederkehrendes Thema der Diskurse ist die Debatte um Berechtigung und Grenze militärischer Gewalt, die in der katholischen Kirche im Spannungsfeld zwischen Kritik und Festhalten an der Lehre vom Gerechten Krieg (bellum iustum) stand, da diese Lehre immer weniger geeignet erschien, Antworten auf die sich wandelnden Kriegsbilder und neuen Bedrohungsszenarien des Kalten Krieges zu geben. Hierzu

zählt das Schwanken zwischen Kritik und Anerkennung der Atomwaffen als Instrumenten des modernen technisierten Krieges und als Druckmittel der Politik. Die ethische Bewertung der nuklearen Abschreckung, aber auch die Angst vor der Anwendung von Nuklearwaffen sowie die Aufklärung über deren fatale Folgen nahmen in der katholischen Friedensarbeit einen breiten Platz ein. Der Zusammenhang zwischen früheren Kriegserfahrungen, aktuellen Bedrohungsperzeptionen und religiösen Gewalttheorien tritt dabei zu Tage.

Ein weiteres Thema war die Frage nach der Vereinbarkeit von Wehrdienst und Gewissen. Am Beispiel der katholischen Kirche kann man die enormen Veränderungen in der Einstellung zu Militär und Wehrdienst sehr gut an der sich verändernden theologischen Bewertung der persönlichen Gewissensentscheidung nachzeichnen. Es kann dabei gezeigt werden, dass dieser Diskurs – weit über die Zeit des Kalten Krieges hinaus – nicht nur die Bewertung der Kriegsdienstverweigerung aus Gewissensgründen veränderte, sondern auch die feste Bindung des Wehrdienstes an das Gewissen zur Folge hatte.



Abb. 3: Auf vielfältige Weise haben sich katholische Soldaten der Bundeswehr zur Friedensarbeit ihrer Kirche bekannt. Mit verschiedenen Publikationen haben sie diese in den 1970er und -80er Jahren auch öffentlich vertreten

Dr. Timo Graf
Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften
der Bundeswehr (ZMSBw)
Potsdam

zmsbw.militaersozioologie@bundeswehr.org

Die ZMSBw-Bevölkerungsbefragung als Gradmesser des verteidigungspolitischen Meinungsbilds

Die Erhebung und Erforschung der öffentlichen Meinung zur Bundeswehr und zur deutschen Verteidigungspolitik ist für die Bundeswehr von großer Bedeutung, weil sie als Armee in der Demokratie auf den Rückhalt der Bürgerinnen und Bürger angewiesen ist. Die jährliche Bevölkerungsbefragung des Zentrums für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr (ZMSBw) ist der Gradmesser für die gesellschaftliche Legitimation, Relevanz und Integration der Streitkräfte.

Seit 1996 dienen die Ergebnisse der Bevölkerungsbefragung des ZMSBw der Bewertung des Verhältnisses zwischen Bundeswehr und Gesellschaft sowie der Evaluation der Öffentlichkeitsarbeit der Bundeswehr (Ressortforschung). Mit der öffentlichkeitswirksamen Publikation der Befragungsergebnisse in vielfältigen Produktformaten (Abb. 1) leistet das ZMSBw zudem einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der deutschen Sicherheits- und Verteidigungspolitik im Sinne des Integrationsziels der Inneren Führung (Wissenstransfer). Darüber hinaus werden die Befragungsdaten in hochwertigen wissenschaftlichen Fachpublikationen veröffentlicht und dienen als Grundlage für sozialwissenschaftliche Qualifikationsarbeiten und die universitäre Lehre (Grundlagenforschung).

Die Daten werden in persönlichen computergestützten Interviews erhoben. Die in einem mehrfach geschichteten Verfahren gezogene Stichprobe ist eine Zufallsstichprobe und repräsentativ für die deutschsprachige und in Privathaushalten lebende Bevölkerung ab 16 Jahren. Die bereinigte Stichprobe umfasst in allen Erhebungsjahren mehr als 2.000 Befragte. Zentrale Themenstellungen der Befragung sind Bedrohungswahrneh-



Abb. 1: Kommunikationsformate der ZMSBw-Bevölkerungsbefragung



Abb. 2: Zustimmung zur Erhöhung der Verteidigungsausgaben und der Zahl der Soldatinnen und Soldaten der Bundeswehr im Zeitverlauf

mungen, Einstellungen zur deutschen Außen-, Sicherheits- und Verteidigungspolitik sowie Haltungen zur Bundeswehr und ihren Einsätzen. Die ZMSBw-Bevölkerungsbefragung ist die einzige verteidigungspolitische Umfragestudie in Deutschland, die verlässliche Trendanalysen über längere Zeiträume ermöglicht.

Dieser einzigartige analytische Wert der ZMSBw-Bevölkerungsbefragung kommt besonders im Erhebungsjahr 2022 zum Tragen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich infolge von Russlands Angriffskrieg gegen die Ukraine ein historischer Wandel im verteidigungspolitischen Meinungsbild vollzogen hat. Mehr Befragte als jemals zuvor begrüßen eine finanzielle und personelle Aufstockung der Bundeswehr (Abb. 2). Waren bis 2021 außen- und sicherheitspolitische Risiken die geringste Sorge der Deutschen, beeinträchtigen sie nun das Sicherheitsgefühl der Bürgerinnen und Bürger am stärksten. Hatte die deutsche Bevölkerung in den letzten Jahren ein ambivalentes Russlandbild, so ist dieses der Erkenntnis gewichen, dass Russland eine Gefahr für die Sicherheit Deutschlands ist. Zudem bestand über viele Jahre ein Missverhältnis zwischen einer großen Zustimmung zum Prinzip der Bündnisverteidigung und einer geringen Bereitschaft zur konkreten militärischen Unterstützung der östlichen NATO-Partner. Diese Lücke wurde im Jahr 2022 weitgehend geschlossen. In all diesen Punkten bildet sich die Zeitenwende im verteidigungspolitischen Meinungsbild deutlich ab.

Die Grundhaltung der Bevölkerung zur Bundeswehr als staatlicher Organisation und gesellschaftlicher Institution ist bereits seit Jahrzehnten positiv (Abb. 3), sodass der Raum für weitere Steigerungen weitaus kleiner ist als bei umstrittenen Fragen, wie

z. B. dem Umgang mit Russland. Die Rückkehr der Bundeswehr zur Landes- und Bündnisverteidigung infolge des Ukraine-Krieges könnte in einem anderen Punkt jedoch zu einer Verbesserung der Beziehungen zwischen Bundeswehr und Gesellschaft führen: Ihr Auftrag wird von den Menschen wieder verstanden und mitgetragen.

Die Befunde der ZMSBw-Bevölkerungsbefragung werden in den Medien, der strategischen Community, der Wissenschaft und der Bundeswehr breit rezipiert. Vor allem im Jahr 2022 ist es dem ZMSBw mit den Ergebnissen der Bevölkerungsbefragung gelungen, in über 40 Medienberichten Erwähnung zu finden und somit dem Anspruch gerecht zu werden, den gesellschaftlichen Diskurs über Deutschlands Außen-, Sicherheits- und Verteidigungspolitik und die Rolle der Bundeswehr durch empirische und wissenschaftlich fundierte Befunde zu bereichern. Die Forschungsberichte zur Bevölkerungsbefragung sind kostenfrei abrufbar unter zms.bundeswehr.de.

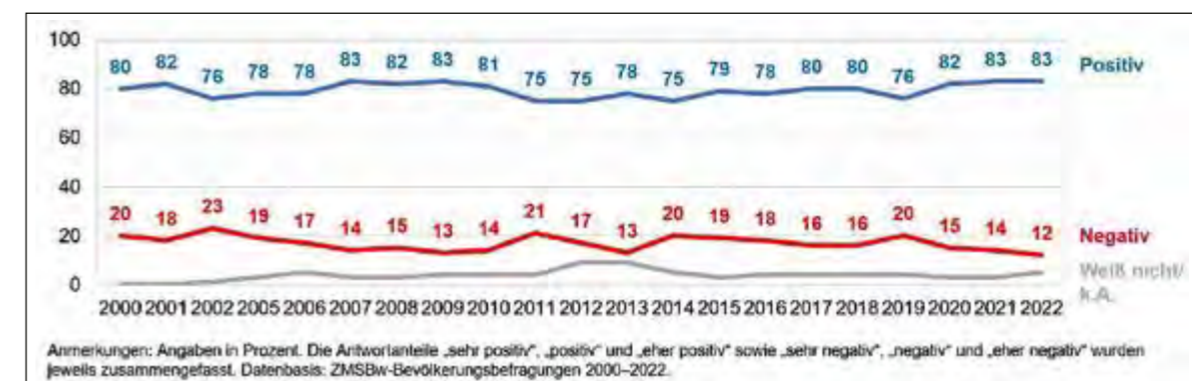


Abb. 3: Persönliche Einstellung zur Bundeswehr im Zeitverlauf

4

Geowissenschaftliche Forschung

Wesentlicher Teil des Leistungsprozesses „Geoinformationswesen sicherstellen“ ist die geowissenschaftliche Forschung. Kerngedanke ist, dass der Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfoDBw) als wissenschaftlicher Fachdienst stets in der Lage sein muss, wissenschaftlich fundierte Lagebeiträge zu liefern und kompetente Antworten auf aktuelle Fragestellungen zu geben.

Die hier im Fokus stehenden Geofaktoren aus insgesamt 18 (geo-) wissenschaftlichen Bereichen sind zum Einen sehr vielfgestaltig und wirken sich zum Anderen auch in verschiedenster Weise, in unterschiedlichen Zeitskalen auf die Planung und Durchführung militärischer Operationen aus. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, bedarf es naturgemäß eines gewissen zeitlichen Vorlaufs, um zum richtigen Zeitpunkt auch die richtigen Erkenntnisse gewonnen zu haben oder, noch besser, das entsprechende Produkt bzw. den entsprechenden Service im Portfolio zu haben.

So beschäftigt sich eine Wissenschaftlerin des ZGeoBw bereits seit längerem mit Vorhersageverfahren zur Geländebefahrbarkeit mit militärischen Fahrzeugen für die strategische und operative Ebene. Dazu wurde auch in der Vergangenheit auch in dieser Publikation berichtet. Dass dieses Verfahren in den Fokus der aktuellen Beratung durch den Geoinformationsdienst der Bundeswehr gerückt ist, dürfte angesichts der aktuellen Lageentwicklung nicht überraschen.

Dies wird zum Anlass genommen, erneut über das Vorhaben zu berichten und auf die in der Zwischenzeit erzielten Fortschritte, sowohl im wissenschaftlichen Ansatz als auch in der technischen Umsetzung, einzugehen.

Das ebenfalls vorgestellte Software-Tool MoGLi (Monitoring GNSS integrity by simple traffic lights) beschäftigt sich nahezu in Echtzeit mit der Integritätsanalyse von GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Die automatisiert abgeleiteten Produkte liefern somit wichtige Informationen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Systeme im militärischen Alltag.



Benjamin Bosbach, M.Sc.
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Euskirchen

Dipl.-Geoökol. Petra Zieger
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Euskirchen

ZGeoBwChdSt@bundeswehr.org

ZGeoBwChdSt@bundeswehr.org

Geländebefahrbarkeitskarten mit CCMoD (Cross-Country Modell)

Nicht nur im Hinblick auf die sichere Verlegung der eigenen Truppen, sondern auch zur Abschätzung feindlicher Bewegungsachsen ist die Kenntnis über die Befahrbarkeit abseits befestigter Wege und Straßen ein strategischer Vorteil. Eine Neuerung im Cross-Country Modell CCMoD stellt die Nutzung höher aufgelöster SoilGrids-Bodendaten in Kombination mit Wetterprognose, Landnutzung und Relief dar.

Geländebefahrbarkeitskarten waren militärisch schon immer von großer Bedeutung. Einerseits geht es darum die eigenen Truppen sicher zum Einsatzort und auch wieder zurück zu bringen, sowie um die Bewegungsmöglichkeiten eigener Fahrzeuge im Gefecht, und andererseits ist es von strategischem Vorteil, auch die möglichen Bewegungs- und potentiellen Angriffsachsen des Feindes abschätzen zu können. Im Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfoDBw) werden die Soldatinnen und Soldaten darin ausgebildet, GIS-Analysen (GIS: Geoinformationssystem) zum Gelände und zur Befahrbarkeit durchzuführen. CCMoD berücksichtigt dabei neben der Landnutzung auch Höhendaten und vor allem das aktuelle Wetter, u. a. Prognosen für den Niederschlag, auch als Schnee und bei Frost (Abb. 1).

Die Berücksichtigung der Böden und insbesondere die Abschätzung der Bodenfeuchte für die kommenden Tage ist für die Befahrbarkeit ebenfalls von großer Relevanz. Diese Bewertung ist herausfordernd, da tiefer gehende hydrologische und bodenkundliche Kenntnisse nötig sind, um abschätzen zu können, ob der feuchte bzw. nasse Boden je nach Fahrzeuggewicht

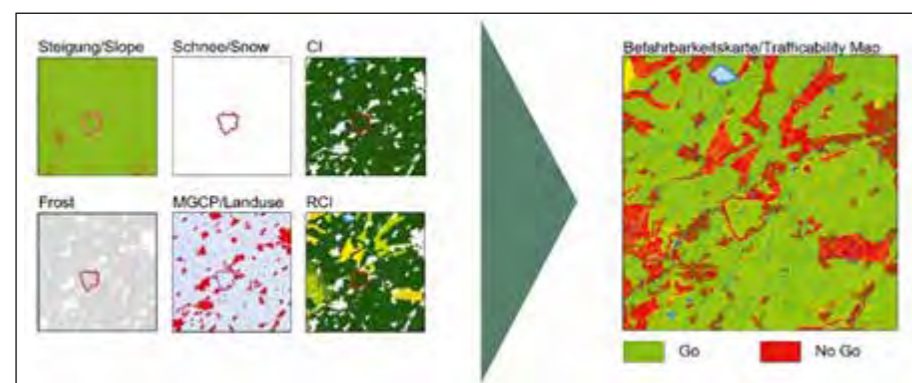


Abb. 1: Von den Inputdaten zur Befahrbarkeitskarte. Die CI- und RCI-Karten stellen ein Maß dar für die Widerstandsfähigkeit (Cone Index) des vorherrschenden Bodentyps gegen Verformung durch einfache (CI) und wiederholte (RCI) Überfahrt

und Kontaktfläche befahrbar ist. Die für die Berechnung notwendigen Daten werden aus öffentlichen Quellen bezogen, beispielsweise vom Deutschen Wetterdienst (DWD), vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) oder von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Die Fahrzeugdaten stammen aus Bundeswehr-internen Datenbanken und sind nicht öffentlich zugänglich.

Als Upgrade in der aktuellen Version von CCMoD werden als Bodendaten die weltweit einheitlich verfügbaren „Soil-Grids“ mit einer Rasterauflösung von 250 Metern verwendet (<https://soilgrids.org/>). Berücksichtigt werden von SoilGrids die Bodenhorizonte bis 60 cm Tiefe und die Gehalte an Sand, Ton und Schluff sowie Steingehalt und Lagerungsdichte. Die organische Substanz von SoilGrids war stellenweise unrealistisch und wurde nur in ihrer relativen Verteilung auf die vier Horizonte genutzt. Die Gesamtmenge an organischem Material wurde aus dem weltweiten GSOM-Layer (Global Soil Organic Matter) genutzt (<http://54.229.242.119/GSOCmap/>). Durch die Nutzung von SoilGrids kombiniert mit GSOM kann eine Befahrbarkeitsanalyse auch für bisher bodenkundlich nicht erschlossenes Gebiet durchgeführt und als erste Planungsgrundlage herangezogen werden.

Hierzu werden mit dem neuen SoilGrids-CCMoD-Tool für ArcGIS Pro automatisiert sieben verschiedene Bodenfeuchte- und auch Befahrbarkeits-Szenarien von extremer Trockenheit bis zu maximaler Feuchte als statische Layer basierend auf den SoilGrids-Bodendaten berechnet (Abb.2). Das Interessensgebiet wird in Teilbereiche zerlegt und für jeden Teilbereich wird durch einen CCMoD-Lauf festgelegt, welches Bodenfeuchte-Szenario für z. B. den kommenden Tag zu erwarten ist. Die in

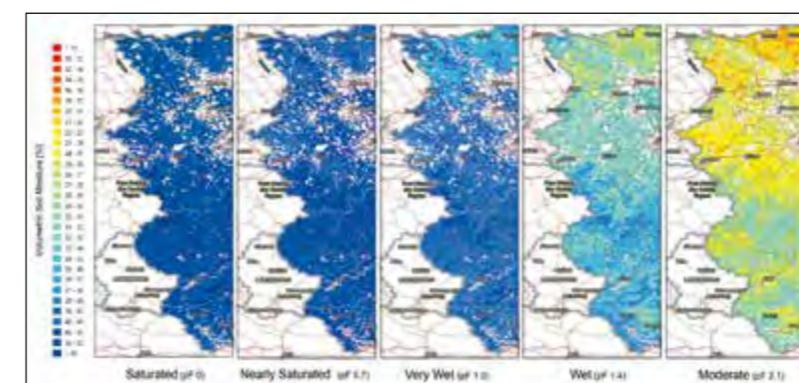


Abb. 2: Beispielhafte Darstellung von 5 der 7 genannten Bodenfeuchte-Szenarien gezeigt für ein Untersuchungsgebiet (ca. 150 x 350 km) im Westen Deutschlands

der Regel für große Gebiete unterschiedlichen Teilbereiche werden im nächsten Schritt zu einem Gesamtbild der Befahrbarkeit zusammengesetzt. Auf diese Art und Weise ist es möglich auch für große Gebiete, wie z. B. ganz Deutschland, eine Abschätzung für die Befahrbarkeit für den kommenden Tag zu berechnen.

Vor der Einführung von CCMoD erfolgte die Erstellung der Befahrbarkeitskarten manuell im GIS. Der Boden und seine Feuchte wurden in der Regel nur sehr grob oder gar nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen soll aufgrund der zunehmenden Komplexität der Inputdaten durch ein automatisiertes, einheitliches GIS-Verfahren ersetzt werden (Abb. 3). In CCMoD geschulte Anwendende aus dem GeoInfoDBw werden dadurch in die Lage versetzt, schnell und auf einheitliche Weise erzeugte Geländebefahrbarkeitskarten für die kommenden drei Tage für Planungsbereiche auf der Ebene Division und Brigade zu erstellen. Der GeoInfoDBw-Berater und die -Beraterinnen können basierend auf den CCMoD-Karten in Briefings Auskunft darüber geben, welche Bereiche befahrbar sind und in welchen Bereichen ggf. durch Pioniere die Befahrbarkeit näher untersucht werden muss.

Letztendlich geht es darum, Leib und Leben unserer Soldatinnen und Soldaten im Einsatz durch valide Geoinformationen zu schützen.

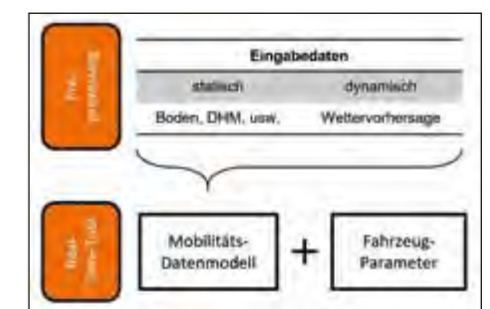


Abb. 3: Der Workflow hinter CCMoD: Statische und dynamische Eingabedaten werden in einem Preprocessing-Schritt miteinander zu einem Mobilitätsdatenmodell kombiniert. Dieses Modell dient in dem sich anschließenden Real-Time-Schritt als Grundlage, in welchem lediglich die Auswahl der zu betrachtenden Fahrzeuge erfolgt. Die Ergebniskarte ist fahrzeugabhängig und nicht ohne weiteres auf andere Fahrzeuge übertragbar

Dr.-Ing. Barbara Görres
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Euskirchen

ZGeoBwChdSt@bundeswehr.org

MoGLi: Eine Anwendung zur GPS – Integritätsanalyse

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) sind eine moderne Technik zur Positionsbestimmung. Am Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) in Euskirchen befindet sich das GNSS-Informations- und Beobachtungssystem der Bundeswehr (GIBSBw). Das Software-Tool MoGLi (Monitoring GNSS integrity by simple traffic lights) leistet eine Integritätsanalyse auf Basis der Beobachtungsdaten von Stationen im Inland und in Einsatzländern.

GNSS werden sowohl im zivilen Leben als auch in der Bundeswehr in vielfältigen Anwendungen unterschiedlicher Genauigkeitsbereiche routinemäßig verwendet. Am ZGeoBw in Euskirchen befindet sich das GIBSBw (Abb. 1). Der bedarfsseitige Hintergrund für diese Einrichtung ist, dass insbesondere GNSS-Nutzer und -Nutzerinnen in der Bundeswehr einen funktionsfähigen Betriebszustand des Raumsegments sowie eine weitestgehende Störungsfreiheit des Signals vom Satelliten zum Empfänger voraussetzen muss. Zudem besteht wachsender Bedarf an der GeoInfo-Beratung der GNSS-Nutzer und -Nutzerinnen sowie der Möglichkeit zur Detektion und Analyse von Störungen von GNSS-Signalen insbesondere aufgrund von Navigation Warfare (NavWar).

GIBSBw besteht hardwareseitig zunächst aus verschiedenen Empfänger- und Antennentypen der zentralen Monitorstation am Standort in Euskirchen, die eine redundante Überwachung der unterschiedlichen GNSS-Signale sicherstellen. Hinzu kommen die Echtzeit-Datenströme der mobilen bzw. transportablen Referenz- und Monitoringstationen in den Einsatzgebieten. Die kontinuierlich aufgezeichneten Beobachtungen



Abb. 1: GIBSBw-Logo



Abb. 2: Bewertungsseite MoGLi aus dem GeoInfoPortal (11. November 2022)

sowie alle Satellitenparameter der GNSS-Empfänger fließen bei GIBSBw in die Analysen zur permanenten Echtzeit-Überwachung der GNSS sowie die Integritätsanalyse MoGLi und weitere Detailuntersuchungen. Zur Vervollständigung des Lagebilds insbesondere in den Interessensgebieten der Bundeswehr wird die bundeswehreigene Sensorik durch Beobachtungsdaten aus dem Stationsnetz des International GNSS Service (IGS) und European Permanent GNSS Network (EPN) ergänzt.

Die zentrale Integritätsprüfung mit dem Analysetool MoGLi ist eine Kernkomponente von GIBSBw und basiert auf den Auswertelgorithmen der Bernese GNSS Software. Dieses wissenschaftliche Softwarepaket besteht aus einer Vielzahl einzelner Programmroutinen, die vom Nutzer nach eigenen Erfordernissen strukturiert werden können. Eigenentwicklungen sind ein Visualisierungstool und die Darstellung der Ergebnisse nach dem Ampelprinzip (Abb. 2).

Analysiert werden zunächst die Verfügbarkeit der zivilen und militärischen Signale an den Beobachtungsstationen und als direkter Indikator zur Bewertung des GNSS-Betriebszustands die Genauigkeit der absoluten Positionsbestimmung durch Vergleich mit Sollkoordinaten (Abb. 3). Hierzu werden Bw-typische Genauigkeitsstufen untersucht, die sich nach verwendeten Satellitenbahninformationen (Broadcast oder präzise Bahndaten) und verwendeten Signaltypen mit oder ohne ionosphärenfreie Linearkombination unterscheiden.

Im Kernteil der Integritätsprüfung werden die Richtigkeit der ausgestrahlten Infos der Satellitenbahnen und -uhren analysiert, indem Informationen des IGS wie beispielweise präzise Satellitenbahn (Abb. 4) und -uhreninformationen zur Bewertung

hinzugezogen werden. Zuletzt wird der Einfluss der ionosphärischen Refraktion, die die Signale verzögert und somit die beobachteten Strecken deutlich beeinträchtigen bzw. verfälschen kann, untersucht und als Analyseergebnisse der sogenannte Vertical Total Electron Content (VTEC) länderweise ausgegeben.

In einer umfassenden Analyse werden täglich alle Beobachtungen des amerikanischen GPS, das in der Bundeswehr primär genutzt wird, des Vortags analysiert und zusätzlich stündlich alle vorliegenden Beobachtungen der letzten Stunde in Nahe-Echtzeit. Alle Ergebnisse werden nach dem Ampelprinzip bewertet und die Ergebnisse zur zeitnahen Information der Nutzer unmittelbar im GeoInfoPortal publiziert. Sie dienen ebenfalls als Grundlage der GNSS-Beratung bei Nutzeranfragen und für Warnmeldungen. Eine Ausweitung auf weitere GNSS ist möglich.

Die GPS-Integritätsanalyse MoGLi geht auf ein Fachprojekt mit der Universität Bonn zurück und arbeitet nach der Operationalisierung für GIBSBw permanent und vollständig automatisiert.

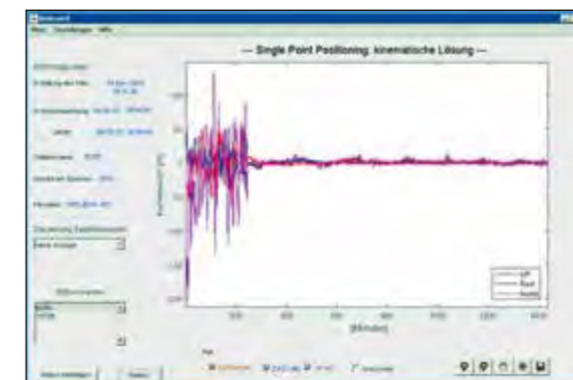


Abb. 3: Analyse der Koordinatengenauigkeit am Beispiel der Abschaltung von SA (Selective Availability) am 2. Mai 2000

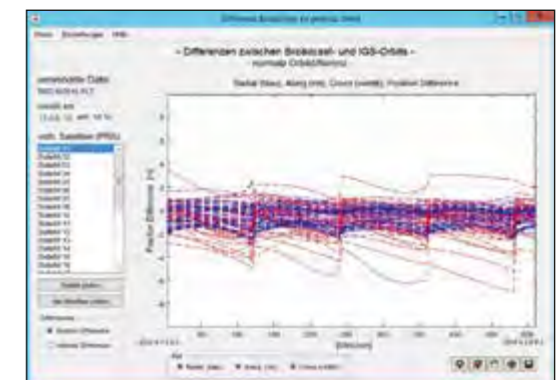


Abb. 4: Analyse der GPS-Broadcast-Bahn – hier sichtbar die Update-Rate des Betreibers

5

Forschung Cyber / Informationstechnik

Wehrtechnische Forschung im Bereich der Cyber- und Informationstechnologien orientiert sich einerseits an zivilen und disruptiven Innovationen wie Künstlicher Intelligenz, andererseits sind die spezifischen Gegebenheiten zukünftiger Konflikte zu berücksichtigen, die zunehmend „hybrid“ geführt werden.

Dabei soll in möglichst großem Umfang auf zivile Technologie zurückgegriffen werden, die für den späteren militärischen Einsatz wo erforderlich angepasst wird. Eine übergreifende Automatisierung in allen wehrtechnischen Forschungsbereichen wird hierbei sichtbar.

Es werden hier einige Beispiele aus dem breiten Spektrum an Forschungsaktivitäten vorgestellt. Diese reichen von internationalen Aktivitäten im Bereich der Standardisierung über Untersuchungen zum Thema Informationssicherheit bis zum Einsatz ziviler Mobilfunktechnologien im militärischen Bereich.



Steffen Pampel
Wehrtechnische Dienststelle für Informationstechnologie und Elektronik
(WTD 81)
Greding

WTD81posteingang@bundeswehr.org

Dr.-Ing. Gerald Ulbricht
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Erlangen

info@iis.fraunhofer.de

Kommerziell verfügbare 5G-Mobilfunktechnologie für die taktische Kommunikation

Der Mobilfunk der 5. Generation (5G) eignet sich für viele Anforderungsprofile und scheint auch für militärische Anwendungen attraktiv. Die Anforderungen an zivile und militärische Funksysteme unterscheiden sich jedoch zum Teil erheblich. Ob und wie sich 5G im hochmobilen taktischen Einsatz und in vernetzten Gefechtsständen eignet, wird daher im Projekt analysiert.

Der Netzausbau für den Mobilfunk der 5. Generation schreitet weltweit schnell voran und spätestens in fünf Jahren wird 5G die vorherrschende mobile Zugangs-Technologie sein. Der neue Mobilfunk-Standard wurde grundsätzlich für drei Anwendungsbereiche mit sehr unterschiedlichen Anforderungen – Enhanced Mobile Broadband (eMBB) für Datenraten von mehr als 10 Gbit/s, Massive Machine Type Communications (mMTC) für die Vernetzung von bis zu einer Million Sensoren auf einer Fläche von einem Quadratkilometer und Ultra Reliable Low Latency Communications (uRLLC) für eine hohe Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringer Latenz von weniger als einer Millisekunde – konzipiert, was ihn damit äußerst attraktiv auch für viele militärische Anwendungen macht. Durch sog. Network Slicing lassen sich diese konkurrierenden Leistungsmerkmale gleichzeitig in einem Netzwerk realisieren.

Damit das Übertragungssystem an die Anforderungen der Applikation angepasst werden kann, lässt sich die Luftschnittstelle weitaus flexibler konfigurieren als noch beim Vorgänger LTE (Long Term Evolution). Der nutzbare Frequenzbereich wurde bis zu den Millimeterwellen (bis 44 GHz) deutlich erweitert,

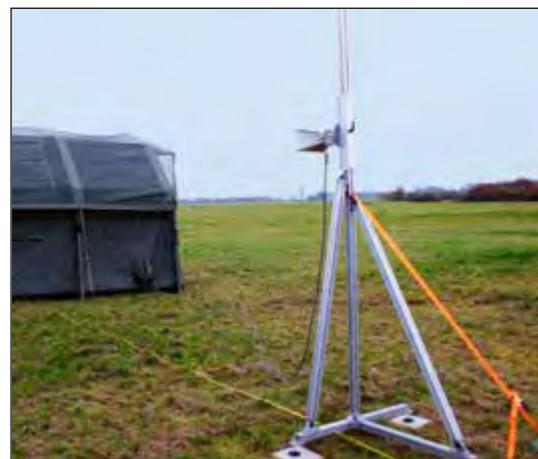


Abb. 1: Aufbau zur Messung der frequenzabhängigen Dämpfung von Zeltmaterial an einem Tragluftzelt für Gefechtsstände

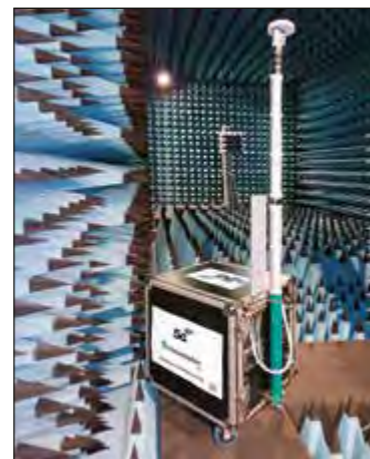


Abb. 2: Mobile Basisstation für 5G-Campusnetze im Frequenzband n78 (3,7 bis 3,8 GHz)

um mit Kanalbandbreiten von bis zu 800 MHz die geforderte Übertragungskapazität realisieren zu können. Zusätzlich wurden bei LTE identifizierte Lücken in der IT-Sicherheit geschlossen (z. B. beim Schutz der Teilnehmer-Identität, gegenseitige Authentisierung). Mehrantennensysteme mit MIMO (Multiple Input, Multiple Output) für Beamforming und Spatial Multiplexing sind integraler Bestandteil von 5G.

Bei einem militärischen Funksystem haben zusätzliche Anforderungen wie eine hohe Zuverlässigkeit unter schwierigen Umgebungsbedingungen, Robustheit gegen bewusste Störung sowie die Vermeidung einer Aufklärung der Funkteilnehmer eine übergeordnete Bedeutung. Das Projekt „Rapid Available Modules for Interoperable Capable Operational Networking in 5G“ (RAM ICON 5G) soll Aufschluss geben, welche Rolle 5G bei der Kommunikation im hochmobilen taktischen Einsatz und in vernetzten Gefechtsständen spielen kann.

Bei der Entwicklung des zivilen Mobilfunk-Standards standen keine militärische Einsatzszenarien im Fokus. Dennoch ist 5G weniger anfällig gegenüber Störaussendungen im Vergleich zu LTE. So ist z. B. zur Störung der Synchronisationssignale die doppelte Störleistung erforderlich.

Da bei sehr hohen Trägerfrequenzen wegen der großen Streckendämpfung beabsichtigte Störung und Aufklärung nur aus geringer Entfernung möglich sind, wird untersucht, inwiefern die Millimeterwellen für die Kommunikation im vernetzten Gefechtsstand geeignet sind. Wegen der kleinen Wellenlänge lassen sich sog. Massive-MIMO-Antennen mit einer großen Anzahl an Antennenelementen sehr kompakt herstellen. Diese Antennen können sich mit sehr schmalen Winkel auf mehrere

Gegenstellen ausrichten, so dass Jamming und Aufklärung aus allen anderen Richtungen deutlich erschwert werden.

In ersten Feldversuchen wurde untersucht, wie z. B. Vegetation oder Zelt- und Tarnmaterial unter unterschiedlichen Witterungsverhältnissen den Empfang von 5G beeinflussen. Abb. 1 zeigt einen Versuchsaufbau bei Untersuchungen an einem Tragluftzelt für Gefechtsstände. Im trockenen Zustand ist das Zelt – auch im getarnten Zustand – für den untersuchten Frequenzbereich bis 28 GHz transparent. Bei Regen wird das Signal durch die nasse Zeltwand bei den Millimeterwellen um knapp 5 dB gedämpft. Messungen mit einer mobilen Basisstation (diesmal bei Schnee, Abb. 2 und 3) bestätigten, dass sowohl im als auch hinter dem Zelt keine Beeinflussung der Übertragung bei 3,6 bis 3,8 GHz zu erwarten ist. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen stand noch kein Equipment für höhere Frequenzen zur Verfügung.

Im weiteren Projektverlauf soll systematisch das Verhalten eines 5G Mobilfunksystems für weitere Einsatzszenarien über einen Frequenzbereich von 600 MHz bis 28 GHz analysiert werden.



Abb. 3: Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses eines Tragluftzeltes für Gefechtsstände auf die Kommunikation mit 5G

Magdalena Dechand
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.frauenhofer.de

Lukas Sikorski
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.frauenhofer.de

Die Etablierung des C2SIM-Informationsstandards in der NATO

Die Befähigung der NATO zu Einsätzen mit interoperablen Systemen ist Ziel des NATO Federated Mission Networking (FMN). Modeling and Simulation (M&S) ermöglicht simulierte Übungen. Die standardisierte M&S-Kommunikation und deren Integration in die FMN-Spezifikation wurde bei der Coalition Warrior Interoperability eXploration, eXperimentation, eXamination eXercise (CWIX) 2022 validiert.

Im Rahmen der WTD-81-Studie „NATO-C2SIM 2022“ unterstützt Fraunhofer FKIE die Anstrengungen der Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), der NATO Modeling and Simulation Group 201 „Modeling and Simulation in Federated Mission Networking (FMN)“ und der NATO Modeling and Simulation Group 194 „Employing the C2-Simulation Interoperation (C2SIM) Standard for Coalition Military Operations and Exercises“, den „Standard for Command and Control Systems - Simulation Systems Interoperation“ (C2SIM) in der NATO zu etablieren.

Innerhalb der SISO wurde der C2SIM-Standard nicht nur entwickelt, es werden weiterhin auch Weiterentwicklungen an den C2SIM-Ontologien und an den Austauschformaten geleistet und Nutzern Unterstützung geboten. Die C2SIM-Ontologien (Abb. 1) bieten dabei eine Wissensbasis für die Initialisierung eines „System-of-Systems“ aus Führungsinformations- und Simulationssystemen und für die Kommunikation zwischen Führung und simulierten Einheiten (Abb. 2).

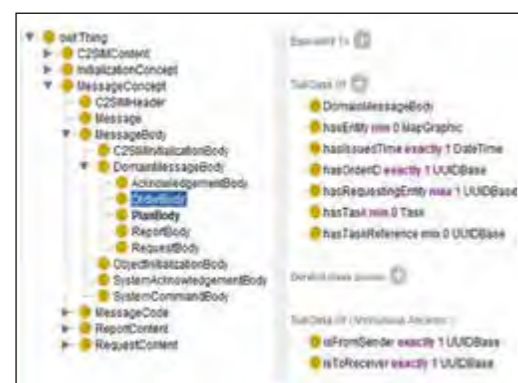


Abb. 1: C2SIM-Ontologien mit Klassenunterordnung und Property-Restrictions zur Definition der Klassen

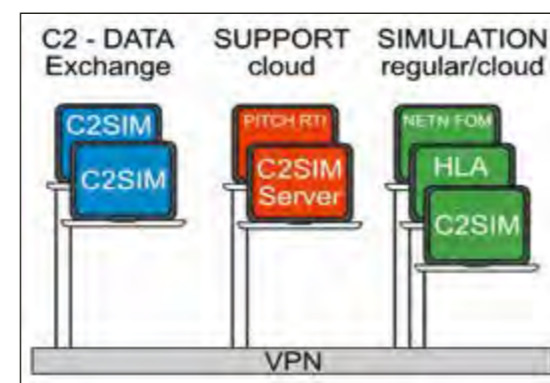


Abb. 2: System-of-Systems zur Kommunikation zwischen Führungsinformations- und Simulationssystemen

Sophie Decher
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.frauenhofer.de

Prof. Dr. Ulrich Schade
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
 und Ergonomie FKIE
 Wachtberg

kontakt@fkie.frauenhofer.de

Der Standard umfasst aktuell ein Modell für Bodenoperationen, wird für weitere Domänen erweitert und kann dann für „Multi Domain Operations“ genutzt werden.

Zur Unterstützung der C2SIM-Nutzer in der NATO werden regelmäßige Schulungsreihen und Workshops, z. B. am „Modeling and Simulation Center of Excellence (MSCoe)“ in Rom, Italien, durch die NATO durchgeführt. Zudem wird die künftige Übernahme von C2SIM als STANAG und in die FMN durch die Integration in die Spezifikation von „FMN Spiral 5 Service Instructions for Modeling and Simulation“ und die „FMN Spiral 5 Procedural Instructions for Mission Rehearsal“ geleistet.

Ein weiterer wichtiger Baustein zur C2SIM-Etablierung ist die Validierung der Spezifikation zur Integration von M&S im Anwendungsfall „Mission Rehearsal“, die im Rahmen der CWIX am „NATO Joint Force Training Centre“ in Bydgoszcz, Polen, durchgeführt wurde. Dazu wurden Fähigkeiten der Partnersysteme beschrieben und insgesamt 84 Testfälle definiert. In diesen wurden grundlegende C2SIM-Fähigkeiten zur Unterstützung einer verkürzten „Mini“-Einsatzprobe (Mini-MR) im Rahmen einer gemeinsamen multinationalen Mission erprobt. Dabei sollte der fiktive Staat „Bogaland“ gegen den Angriff durch einen Nachbarstaat mit einer gemeinsamen

Brigade, bestehend aus Bataillonen aus 3 Nationen und mit Unterstützung durch eine Lufteinheit, verteidigt werden. Dabei verlegten die Bataillone in ihre Einsatzräume, wo der Gegner einen Hinterhalt gelegt hatte. Das Führungssystem des FKIE (C2LG-GUI) wurde in der Rolle des „Providers“ und „Consumers“ eingesetzt. Als „Provider“ hat das C2LG-GUI C2SIM-Befehle erstellt und an unterschiedliche multinationale Simulationssysteme versendet (Abb. 3).

In diesen Simulationssystemen wurden die Befehle ausgeführt und C2SIM-Meldungen an Führungssysteme zurückgesendet. Diese hat das C2LG-GUI als „Consumer“ empfangen, verarbeitet und das eigene Lagebild entsprechend angepasst. Bei diesen Tests konnte die Interoperabilität zwischen den M&S-Systemen mittels C2SIM dargelegt werden. Das C2LG-GUI konnte in allen Testfällen die gestellten Anforderungen erfüllen. Einige wenige Testfälle wurden aufgrund von C2SIM-Implementierungslücken in Simulationssystemen als nicht erfolgreich gewertet. Basierend auf diesen Tests, wird die NATO Modeling and Simulation Group 201 einen weiteren Testdurchlauf auf der CWIX 2023 durchführen und weitere Simulationssysteme in das System-of-Systems integrieren.



Abb. 3: Befehligung im FKIE C2LG-GUI

Daniel Baier, M. Sc.
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Jan-Niclas Hilgert, M. Sc.
Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung
und Ergonomie FKIE
Wachtberg

kontakt@fkie.fraunhofer.de

Analyse smartphonebasierter Malware (Smartphoneforensik)

Digitale Forensik hat die Aufgabe herauszufinden, ob ein System mit Schadsoftware infiziert ist. Diese Studie, die in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE durchgeführt wurde, untersucht diese Fragestellung im Bereich von mobilen Endgeräten näher. Sie zeigt die aktuelle Gefahrenlage und stellt einen Workflow zur Analyse von Smartphones zur Infektionsdetektion vor und bewertet seine Anwendbarkeit.

Schadsoftware hat auch auf Smartphones Einzug gehalten, wie Abb. 1 beispielhaft zeigt. Durch die Menge persönlicher Daten sind sie ein attraktives Ziel für Angriffe, wie die Pegasus-Spyware unter iOS zeigte. Deshalb ist es wichtig, die Auswirkungen von Schadsoftware und Zeichen einer Kompromittierung von Smartphones sicher zu erkennen. In dieser Studie wurde ein dreistufiges Vorgehensmodell entwickelt, anhand dessen sich Analysen potenziell infizierter Smartphones orientieren sollen (vgl. Abb. 2).

An erster Stelle steht hierbei die konkrete Infektionsdetektion unter dem Einsatz bereits bekannter Indikatoren. Diese können in Form von IP-Adressen, Domain-Namen oder Hash-Werten einzelner Dateien auftreten. Lassen sich solche Indikatoren auf einem Smartphone finden, so deutet dies auf eine versuchte oder sogar erfolgreiche Infektion des Geräts hin. Das Mobile Verification Toolkit (MVT) von Amnesty Tech hat sich für diesen Schritt der Analyse als ein geeignetes Werkzeug herausgestellt. Mithilfe mehrerer Module können mit dem MVT verschiedene Artefakte von Android- und iOS-Geräten extrahiert und mit bekannten Indikatoren abgeglichen werden. Essenziell an



Abb. 1: FluBot-Smishing-Angriff als Beispiel für Android-Schadsoftware

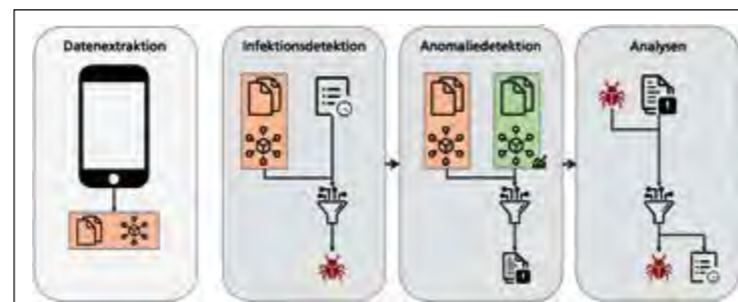


Abb. 2: Workflow zur Analyse eines möglicherweise kompromittierten Smartphones

dieser Stelle ist es jedoch, dass entsprechende Indikatoren für eine vorliegende Infektion vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall oder verhalten sich Indikatoren sehr dynamisch, so stößt dieser erste Teil der Analyse schnell an seine Grenzen.

In einem zweiten Schritt wird hierzu versucht, keine konkreten Indikatoren, sondern lediglich Anomalien auf dem Gerät zu detektieren, welche im weiteren Verlauf der Analysen den entsprechenden Fokus setzen sollen. Das MVT führt hierzu bereits initiale Bewertungen extrahierter Artefakte durch und warnt beispielsweise bei auffälligen Applikationsberechtigungen oder veralteten Systemversionen. Die Definition einer Anomalie ist jedoch in der Regel stark abhängig von dem Anwendungsfall sowie dem Grundzustand eines Geräts. Aus diesem Grund ist es unter Umständen sinnvoll, eine Baseline für den infektionsfreien Grundzustand des Geräts zu erstellen. Hierzu können statische Artefakte wie eine Liste installierter Anwendungen, aber auch dynamische Artefakte wie über die Zeit hergestellte Netzwerkverbindungen als Bestandteil dienen. Bei der Analyse eines vorliegenden Geräts können so durch den Vergleich des Ist-Zustands mit der zuvor erstellten Baseline Auffälligkeiten detektiert und im weiteren Verlauf genauer analysiert werden.

Basierend auf den zuvor gewonnenen eindeutigen Indikatoren oder Auffälligkeiten, werden in dem letzten Schritt des Modells genauere Untersuchungen durchgeführt. Hierbei steht vor allem die Analyse von verdächtigen Applikationen im Vordergrund. Im Laufe der Studie soll hierzu analog zu den Möglichkeiten, welche bereits für Desktopsystemen existieren, eine Sandbox-Umgebung entwickelt werden, in welcher sich Applikationen sicher und spezifisch analysieren lassen, wie Abb. 3 veranschaulicht. Eine wichtige Fragestellung, die in diesem Zusammenhang

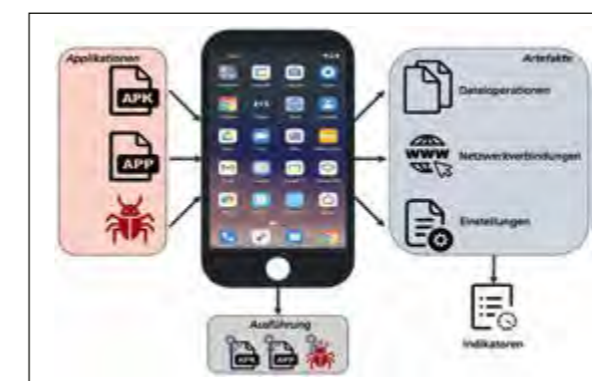


Abb. 3: Sandbox-Umgebung für die Analyse smartphonebasierter Malware

evaluiert wird, betrifft die Ausführung von Anwendungen. Reicht es beispielsweise diese zu starten oder müssen fortgeschrittenere Methoden zum Einsatz kommen, um das relevante Verhalten einer Anwendung auszulösen. Anschließend sollen während der Ausführung der Anwendung verschiedene dynamische Features wie Dateizugriffe oder Netzwerkverbindungen gesichert, protokolliert und dem Analysten oder der Analystin präsentiert werden. Abschließend wird die vorgestellte Sandbox-Umgebung mit verschiedenen gut- sowie böseartigen Applikationen evaluiert und auf seine Anwendbarkeit hin untersucht. Hierbei sollen Erkenntnisse dafür gewonnen werden, Schadsoftware bzw. böseartige Charakteristika schnell und einfach identifizieren zu können. Zusätzlich bietet dies die Möglichkeit, Indikatoren einer Infektion zu erstellen, um diese in zukünftigen Analysen direkt nutzen zu können.



6

Anhang





Bundesministerium
der Verteidigung

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

Abteilung Ausrüstung - A III 5
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 66
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 75
E-Mail: BMVgAIII5@bmvg.bund.de

Abteilung Ausrüstung - A III 6
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 41 80
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 41 89
E-Mail: BMVgAIII6@bmvg.bund.de

Abteilung Cyber / Informationstechnik
- CIT I 2
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 2 61 22
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 3 35 61 21
E-Mail: BMVgCITI2@bmvg.bund.de

Abteilung Führung Streitkräfte – FüSK III 3
Tel.: +49 (0) 30 / 2004 - 2 48 38
Fax: +49 (0) 30 / 2004 - 18 03 68 13
E-Mail: BMVgFueSKIII3@bmvg.bund.de

Abteilung Führung Streitkräfte – FüSK San 1
Tel.: +49 (0) 30 / 20 04 - 2 48 54
fax: +49 (0) 30 / 20 04 - 8 97 00
E-Mail: BMVgFueSKSan1@bmvg.bund.de

Abteilung Personal - P I 5
Tel.: +49 (0) 30 / 18 24 - 2 31 57
Fax: +49 (0) 30 / 18 24 - 8 95 40
E-Mail: BMVgPI5@bmvg.bund.de

Abteilung Personal - P III 5
Tel.: +49 (0) 228 / 99 24 - 1 33 51
Fax: +49 (0) 228 / 99 24 - 4 35 30
E-Mail: BMVgPIII5@bmvg.bund.de



Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
Postfach 70 08 22
22008 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 / 65 41 - 1
Fax: +49 (0) 40 / 65 41 - 28 69
E-Mail: forschung@hsu-hh.de
Internet: www.hsu-hh.de

Universität München

Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Tel.: +49 (0) 89 / 60 04 - 0
Fax: +49 (0) 89 / 60 04 - 35 60
E-Mail: info@unibw.de
Internet: www.unibw.de



Wehrtechnische Dienststelle
für Schutz- und Sondertechnik
(WTD 52)
Oberjettenberg
83458 Schneizlreuth
Tel.: +49 (0) 86 51 / 76 82 - 10 01
Fax: +49 (0) 86 51 / 16 00
E-Mail: WTD52posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wtd52



Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge
und Luftfahrtgerät der Bundeswehr
(WTD 61)
Flugplatz
85077 Manching
Tel.: +49 (0) 84 59 / 80 - 1
Fax: +49 (0) 84 59 / 80 - 20 22
E-Mail: WTD61posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.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
Fax: +49 (0) 43 51 / 467 - 120
E-Mail: WTD71posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wtd71



Wehrtechnische Dienststelle
für Informationstechnologie und Elektronik
(WTD 81)
Bergstraße 18
91171 Greiding
Tel.: +49 (0) 84 63 / 652 - 0
Fax: +49 (0) 84 63 / 652 - 607
E-Mail: WTD81posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wtd81



Wehrtechnische Dienststelle
für Waffen und Munition
(WTD 91)
Am Schießplatz
49716 Meppen
Tel.: +49 (0) 59 31 / 43 - 0
Fax: +49 (0) 59 31 / 43 - 20 91
E-Mail:
WTD91posteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wtd91



Wehrwissenschaftliches Institut
für Schutztechnologien – ABC-Schutz (WIS)
Humboldtstraße 100
29633 Munster
Tel.: +49 (0) 51 92 / 136 - 201
Fax: +49 (0) 51 92 / 136 - 355
E-Mail: WISposteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wis



Wehrwissenschaftliches Institut
für Werk- und Betriebsstoffe
(WIWeB)
Institutsweg 1
85435 Erding
Tel.: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 0
Fax: +49 (0) 81 22 / 95 90 - 39 02
E-Mail: WIWeBposteingang@bundeswehr.org
Internet: www.baainbw.de/wiweb



Zentrum für Geoinformationswesen
der Bundeswehr
Frauenberger Straße 250
53879 Euskirchen
Tel.: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 00
Fax: +49 (0) 22 51 / 953 - 50 55
E-Mail: ZGeoBwChdSt@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Zentrum für Militärgeschichte und
Sozialwissenschaften der Bundeswehr
Zeppelinstraße 127/128
14471 Potsdam
Tel.: +49 (0) 331 / 97 14 - 0
Fax: +49 (0) 331 / 97 14 - 507
E-Mail: ZMSBwZentralesManagement
@bundeswehr.org
Internet: https://zms.bundeswehr.de



Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr
Neuherbergstraße 11
80937 München
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 39 82
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 39 83
E-Mail:
InstitutfuerMikrobiologie@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Pharmakologie und Toxikologie
der Bundeswehr
Neuherbergstraße 11
80937 München
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 29 26
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 23 33
E-Mail:
InstitutfuerPharmakologieundToxikologie
@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Radiobiologie der Bundeswehr
in Verbindung mit der Universität Ulm
Neuherbergstraße 11
80937 München
Tel.: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 22 51
Fax: +49 (0) 89 / 99 26 92 - 22 55
E-Mail:
InstitutfuerRadiobiologie@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin
der Luftwaffe
Flughafenstraße 1
51147 Köln
Tel.: +49 (0) 22 03 / 9 08 - 16 10
Fax: +49 (0) 22 03 / 9 08 - 16 14
E-Mail:
zentrlurmedlwpresseoea@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Schiffahrtmedizinisches Institut
der Marine
Kopperpähler Allee 120
24119 Kronshagen
Tel.: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 01
Fax: +49 (0) 431 / 54 09 - 17 78
E-Mail: SchiffMedInstM@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Institut für Präventivmedizin
der Bundeswehr, Abteilung A
Aktienstraße 87
56626 Andernach
Dienstort:
Andernacher Straße 100
56070 Koblenz
Tel.: +49 (0) 261 / 896 - 7 70 01
Fax: +49 (0) 261 / 896 - 7 70 99
E-Mail: InstPraevMedBw@bundeswehr.org
Internet: www.bundeswehr.de/de/organisation



Deutsch-Französisches
Forschungsinstitut Saint-Louis
Postfach 27
79590 Binzen
F-68300 Saint-Louis
Tel.: +33 (0) 389 / 69 50 - 00
Fax: +33 (0) 389 / 69 50 - 02
E-Mail: isl@isl.eu
Internet: www.isl.eu



Psychotraumazentrum der Bundeswehr
Im Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Scharnhorststraße 13
10115 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 22 89
Fax: +49 (0) 30 / 28 41 - 10 43
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org
Internet: www.berlin.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz
Rübenacher Straße 170
56072 Koblenz
Tel.: +49 (0) 261 / 281 - 89
Fax: +49 (0) 261 / 281 - 26 69
E-Mail: BwZKrhsKoblenz@bundeswehr.org
Internet: https://koblenz.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Berlin
Scharnhorststraße 13
10115 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 / 28 41 - 2 289
Fax: +49 (0) 30 / 28 41 - 10 43
E-Mail: BwKrhsBerlin@bundeswehr.org
Internet: https://berlin.bwkrankenhaus.de




Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
Lesserstraße 180
22049 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 / 69 47 - 0
Fax: +49 (0) 40 / 69 47 - 1 06 29
E-Mail: BwKrhsHamburg@bundeswehr.org
Internet: https://hamburg.bwkrankenhaus.de




Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Oberer Eselsberg 40
89081 Ulm
Tel.: +49 (0) 731 / 17 10 - 24 00
Fax: +49 (0) 731 / 17 10 - 24 03
E-Mail: BwKrhsUlm@bundeswehr.org
Internet: https://ulm.bwkrankenhaus.de



Bundeswehrkrankenhaus Westerstede
Lange Straße 38
26655 Westerstede
Tel.: +49 (0) 44 / 88 50 - 0
Fax: +49 (0) 261 / 896 - 1 31 99
E-Mail: BwKrhsWesterstede@bundeswehr.org
Internet: https://westerstede.bwkrankenhaus.de


 **Fraunhofer**
VVS
Fraunhofer-Leistungsbereich
Verteidigung, Vorbeugung und
Sicherheit VVS
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210
Fax: +49 (0) 721 / 60 91 - 413
E-Mail: info@iosb.fraunhofer.de
Internet: www.vvs.fraunhofer.de


 **Fraunhofer**
EMI
Fraunhofer-Institut für
Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI
Ernst-Zermelo-Straße 4
79104 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 27 14 - 101
Fax: +49 (0) 761 / 27 14 - 316
E-Mail: info@emi.fraunhofer.de
Internet: www.emi.fraunhofer.de


 **Fraunhofer**
FHR
Fraunhofer-Institut für
Hochfrequenzphysik und
Radartechnik FHR
Fraunhoferstraße 20
53343 Wachtberg
Tel.: +49 (0) 228 / 94 35 - 227
Fax: +49 (0) 228 / 94 35 - 627
E-Mail: info@fhr.fraunhofer.de
Internet: www.fhr.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
FKIE
Fraunhofer-Institut für
Kommunikation, Informations-
verarbeitung und Ergonomie
FKIE
Fraunhoferstraße 20
53343 Wachtberg
Tel.: +49 (0) 228 / 94 35 - 103
Fax: +49 (0) 228 / 94 35 - 685
E-Mail: kontakt@fkie.fraunhofer.de
Internet: www.fkie.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
IAF
Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik
IAF
Tullastraße 72
79108 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 51 59 - 458
Fax: +49 (0) 761 / 51 59 - 714 58
E-Mail: info@iaf.fraunhofer.de
Internet: www.iaf.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
ICT
Fraunhofer-Institut für
Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
76327 Pfinztal
Tel.: +49 (0) 721 / 46 40 - 115
Fax: +49 (0) 721 / 46 40 - 111
E-Mail: info@ict.fraunhofer.de
Internet: www.ict.fraunhofer.de

 **Fraunhofer**
IESE
Fraunhofer-Institut für
Experimentelles Software
Engineering IESE
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
Tel.: +49 (0) 631 / 6800 - 0
Fax: +49 (0) 631 / 6800 - 9 - 2296
E-Mail: info@iese.fraunhofer.de
Internet: www.iese.fraunhofer.de


 **Fraunhofer**
IIS
Fraunhofer-Institut für
Integrierte Schaltungen IIS
Am Wolfsmantel 33
91058 Erlangen
Tel.: +49 (0) 91 31 / 776 - 0
Fax: +49 (0) 91 31 / 776 - 20 19
E-Mail: info@iis.fraunhofer.de
Internet: www.iis.fraunhofer.de


 **Fraunhofer**
IOSB
Fraunhofer-Institut für
Optronik, Systemtechnik und
Bildauswertung IOSB


Standort Karlsruhe
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 / 60 91 - 210
Fax: +49 (0) 721 / 60 91 - 413


Standort Ettlingen
Gutleuthausstraße 1
76275 Ettlingen
Tel.: +49 (0) 7243 / 992 - 131
Fax: +49 (0) 7243 / 992 - 299


E-Mail: info@iosb.fraunhofer.de
Internet: www.iosb.fraunhofer.de


 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Programmkoordination Sicherheitsforschung
(PK-S)
Linder Höhe
51147 Köln
Tel.: +49 (0) 2203 / 601 - 40 31
Fax: +49 (0) 2203 / 673 - 40 33
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/sicherheit


 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
DLR AS
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 24 00
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 23 20
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/as


 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik DLR FT
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 26 00
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 28 64
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/ft

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik und
Radarsysteme DLR HR
Oberpfaffenhofen
82234 Weßling
Tel.: +49 (0) 81 53 / 28 23 05
Fax: +49 (0) 81 53 / 28 11 35
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/hr

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Optische Sensorsysteme DLR OS
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin-Adlershof
Tel.: +49 (0) 30 / 6 70 55 - 0
Fax: +49 (0) 30 / 6 70 55 - 102
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/os

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle
Satellitenverbringung DLR RS
Eugen-Sänger-Str. 50
29328 Faßberg/Trauen
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 - 714
Fax: +49 (0) 711 / 68 62 - 788
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/rs

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau DLR SY
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
Tel.: +49 (0) 531 / 295 - 2301
Fax: +49 (0) 531 / 295 - 2838
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/sy

 **DLR**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Technische Physik DLR TP
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 - 773
Fax: +49 (0) 711 / 68 62 - 788
E-Mail: info-pks@dlr.de
Internet: www.dlr.de/tp



HERAUSGEBER

Bundesministerium der Verteidigung
 Unterabteilung A III
 Fontainengraben 150
 53123 Bonn

INHALTLICHE BETREUUNG

Fraunhofer INT, Euskirchen

GESTALTUNG UND REALISATION

Konzeptbüro Schneider, Erfstadt

DRUCK

Warlich Druck Meckenheim GmbH, Meckenheim

STAND

Juli 2023

FOTOS



Seite

© Bundeswehr / Christoph Lammel; Jana Neumann;	01	Bundesministerium der Verteidigung, Bonn
© Bundeswehr / Jana Neumann	08	Bundeswehrkrankenhaus Berlin
© Bundeswehr / Christian Timmig; Sebastian Wilke	09	Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
© Bundeswehr / Mario Bähr	10	Bundeswehrkrankenhaus Ulm
© Bundeswehr / Jana Neumann; Marco Dorow	11	Bundeswehrkrankenhaus Westerstede Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis
© xView, vgl. Lam, Darius, et al. „xview: Objects in context in overhead imagery.“ arXiv preprint arXiv:1802.0785 (2018)	16	DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Braunschweig DLR, Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig DLR, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Oberpfaffenhofen DLR, Institut für Optische Sensorsysteme, Berlin DLR, Institut für Systemleichtbau, Braunschweig DLR, Institut für Technische Physik, Stuttgart
© WAMI-Bildausschnitt: Hensoldt „Appearance and motion based persistent multiple object tracking in wide area motion imagery.“ Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021	16	DLR, Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung, Trauen
© F. Christnacher et al., Adv.Opt.Techn. 8 (6), 403–414 (2019)	30	Fraunhofer EMI, Freiburg i. Br.
© Airbus	40	Fraunhofer FHR, Wachtberg
© Dagmar Benner	42	Fraunhofer FKIE, Wachtberg
© David Porschen	43	Fraunhofer IAF, Freiburg i. Br.
© NASA Orbital Debris Program Office	44	Fraunhofer ICT, Pfinztal
© Hartig, http://dx.doi.org/10.24405/14321	62	Fraunhofer IIS, Erlangen
© Fotoarchiv, HSU/UniBw H, Ulrike Schröder	71	Fraunhofer IOSB, Karlsruhe, Ettlingen
© Abteilung Biomechanik und Unfallforschung am Institut für Rechtsmedizin, LMU München	73	Fraunhofer IESE, Kaiserslautern
© Karr 2015, Deutsche Marine	74	HPS GmbH, München
© Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr (Hg.) (2019): Energiebericht Bundeswehr 2019	90	Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
© Chatterjee, Daniel: Power-to-X ein Schlüsselement der Energiewende. Workshop Rolls-Royce und PlgABw. PlgABw, 05.10.2021)	91	Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Bundeswehr, München
© Cronkite et al., 1954; Abbildung angepasst von Rump et al.	106	Institut für Präventivmedizin der Bundeswehr, Koblenz
© Simon et al., 2010; Abbildung angepasst von Rump et al.	107	Institut für Radiobiologie der Bundeswehr, München
© SEARCH-Datenbank		Psychotraumazentrum der Bundeswehr, Berlin
© Aus S. Scharnholtz et al., https://doi.org/10.4028/p-ztr5d7	117	Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine, Kronshagen
© Wehrmedizinische Monatszeitschrift	119	Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
© Bundeswehr / Eisner 2004	124	WIS, Munster
© Bundeswehr / Torsten Kraatz	124	WIWeB, Erding
© Bundeswehr / Jonas Weber	125	WTD 52, Schneizlreuth
© IMAGO / Sven Simon	128	WTD 61, Manching
© Ökumenische Friedensdekade	128	WTD 71, Kiel WTD 81, Greding WTD 91, Meppen Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Euskirchen Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der Luftwaffe, Fürstenfeldbruck Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr, Potsdam